



**PENGARUH PENAMBAHAN H₂O₂ DAN MINYAK KEDELAI TERHADAP
KARAKTERISTIK GEOPOLIMER DAN APLIKASINYA SEBAGAI
ADSORBEN ION LOGAM BERAT Pb²⁺**

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

oleh
Hasna Bella Afirosa
4311416036

JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2020

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul "Pengaruh Penambahan H_2O_2 dan Minyak Kedelai terhadap Karakteristik Geopolimer dan Aplikasinya sebagai Adsorben Ion Logam Berat Pb^{2+} " karya Hasna Belia Afirosa NIM 4311416036 ini telah dipertahankan dalam Ujian Skripsi FMIPA Universitas Negeri Semarang pada tanggal 22 Juli 2020 dan disahkan oleh Panitia Ujian.

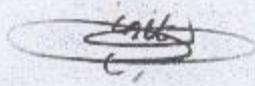
Semarang, 24 September 2020

Panitia



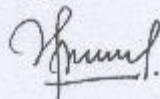
Dr. Sugiarto, M.Si
NIP. 196702191993031001

Sekretaris,



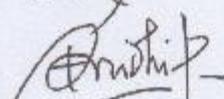
Dr. Sigit Priatmoko, M.Si
NIP. 196504291991031001

Penguji I,



Dr. Jumaeri, M.Si
NIP 196210051993031002

Penguji II,



Dr. F. Widhi Mahatmanti, S.Si, M.Si
NIP 196912171997022001

Penguji III / Pembimbing,



Ella Kusumastuti, S.Si., M.Si
NIP 19821214 2009122004

PERSETUJUAN PEMBIMBING

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

Semarang, 22 Juli 2020

Pembimbing

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'E' inside an oval followed by several vertical lines and a horizontal stroke at the bottom.

Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si

NIP 198212142009122004

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi ini bebas plagiat, dan apabila kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi ketentuan peraturan perundang-undangan.

Semarang, 22 Juli 2020



Hasna Bella Afrosa

4311416036

MOTO DAN PERSEMBAHAN

Moto

Boleh jadi kamu tidak menyenangi sesuatu, padahal itu baik bagimu, dan boleh jadi kamu menyukai sesuatu, padahal itu tidak baik bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui.

(QS Al-Baqarah ayat 216)

Persembahan

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat Allah SWT karena dengan kemurahan-Nya, peneliti dapat menyelesaikan skripsi tepat pada waktunya. Skripsi ini peneliti persembahkan untuk:

- Kedua orang tua, Bapak Budi Eko Prasetyo dan Ibu Setyo Rini.
- Keluarga besar yang selalu memberikan *support* dan doa di setiap perjalanan penulis.
- Seluruh sahabat: Intan Arsitiya, Shafira Moreta, Yemima Agnetha Heldy, Arsenius Olfa Herlistyawan, Destanoel Setya Adi, Septianingtias Hapsari, dan Maria Monalisa, yang selalu ada disetiap saat penulis membutuhkan bantuan dan selalu memberikan semangat serta dukungan kepada penulis.
- Teman-teman kimia rombel 1 2016 yang telah menjadi *partner* mencari ilmu selama 8 semester ini.
- Seluruh pengurus Himamia 2017-2018 yang telah memberikan pengalaman yang baik bagi penulis.

PRAKATA

Pertama-tama, peneliti ucapkan syukur dan terima kasih kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga peneliti dapat menyelesaikan skripsi ini. Penyusunan skripsi yang berjudul “Pengaruh Penambahan H₂O₂ dan Minyak Kedelai terhadap Karakteristik Geopolimer dan Aplikasinya sebagai Adsorben Ion Logam Berat Pb²⁺” disusun dalam kurun waktu 10 bulan. Skripsi ini kiranya tak akan selesai tanpa bantuan dari beberapa pihak yang terus mendorong peneliti untuk menyelesaikannya. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih 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 dengan sabar memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis dalam menyusun skripsi;
4. Dr. Jumaeri, M.Si dan Dr. F. Widhi Mahatmanti, selaku Penguji 1 dan 2 yang telah memberikan masukan serta ilmu kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi;
5. Segenap Bapak dan Ibu dosen di Jurusan Kimia yang telah memberikan dukungan dan arahan;
6. Segenap Karyawan dan Staff Laboratorium Kimia UNNES yang telah membantu dan memberikan pengalaman kepada penulis.

Besar harapan penulis di kemudian hari, skripsi ini bisa bermanfaat bagi pembacanya ataupun penelitian selanjutnya.

Semarang, 22 Juli 2020

Hasna Bella Afirosa
Penulis

ABSTRAK

Afirosa, Hasna Bella. 2020. *Pengaruh Penambahan H₂O₂ dan Minyak Kedelai terhadap Karakteristik Geopolimer dan Aplikasinya sebagai Adsorben Ion Logam Berat Pb²⁺*. Skripsi, Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Ella Kusumastuti, S.Si., M.Si.

Kata Kunci: Geopolimer, H₂O₂, minyak kedelai, adsorben

Geopolimer telah mendapatkan banyak minat untuk aplikasi potensial dalam pengolahan air limbah selama dekade terakhir, yaitu dengan metode adsorpsi. Inovasi terbaru dalam teknologi geopolimer telah membawa berbagai jenis pengembangan produk geopolimer, termasuk material geopolimer berpori yang dihasilkan dari penambahan hydrogen peroksida sebagai *foaming agent*. Penambahan hydrogen peroksida saja pada geopolimer diketahui menghasilkan pori yang tertutup, sehingga aplikasi untuk adsorben akan sangat terbatas. Oleh karena itu diperlukan zat pembentuk struktur pori terbuka berupa surfaktan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kombinasi komposisi hydrogen peroksida sebagai *foaming agent* dan minyak kedelai sebagai agen pembentuk surfaktan terhadap karakteristik pori geopolimer yang dihasilkan, serta terhadap efektifitas penyerapan ion logam Pb²⁺ dalam larutan. Metode yang digunakan untuk sintesis geopolimer berpori yaitu dengan penambahan hydrogen peroksida dan minyak kedelai kedalam pasta geopolimer dengan berbagai variasi komposisi perbandingan hydrogen peroksida : minyak kedelai sebesar 0:0, 0:1, 1:0, 1:1, 1:2, dan 2:1. Geopolimer berpori yang dihasilkan dikarakterisasi, analisis porositas menggunakan SAA metode BET, analisis densitas menggunakan metode gravimetri, analisis fasa mineral menggunakan XRD, dan analisis gugus fungsi menggunakan FTIR. Geopolimer berpori selanjutnya dianalisis efisiensi penyerapannya terhadap ion logam berat Pb(II) dalam larutan adsorbat menggunakan AAS untuk diketahui variasi mana yang memiliki efisiensi penyerapan paling tinggi. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa variasi komposisi hydrogen peroksida dan minyak kedelai berpengaruh pada karakteristik geopolimer yang dihasilkan. Analisis pada produk geopolimer menunjukkan bahwa penambahan H₂O₂ dan minyak kedelai secara sinergis memberikan efek positif yakni luas permukaan poriter besar pada komposisi 1:1, volume poriter besar pada komposisi 1:1, dan rerata jari-jari poriter kecil pada komposisi 1:2. Analisis densitas menunjukkan bahwa densitas terendah pada komposisi 0:1. Analisis dengan XRD menunjukkan bahwa tidak terdapat perubahan yang berarti pada puncak-puncak mineral pada geopolimer. Analisis gugus fungsi menunjukkan bahwa penambahan minyak kedelai memberikan pita serapan pada 2923 cm⁻¹ yang merupakan vibrasi C-H minyak kedelai. Aplikasi geopolimer dalam adsorpsi ion logam berat Pb²⁺ memberikan efisiensi penyerapan terbesar pada komposisi 1:2 yakni sebesar 56,16%.

ABSTRACT

Afirosa, Hasna Bella. 2020. *Effect of Addition of H₂O₂ and Soybean Oil to Geopolymer Characteristics and its Applications as Pb²⁺ Heavy Metal Ion Adsorbent*. Thesis, Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Semarang State University. Advisor Ella Kusumastuti, S.Si, M.Sc.

Keywords: Geopolymer, H₂O₂, soybean oil, adsorbent

Geopolymers have gained much interest for potential applications in wastewater treatment in recent decade. The latest innovations in geopolymer technology have led to various types of geopolymer product development, including porous geopolymer materials produced from hydrogen peroxide as a foaming agent. The addition of hydrogen peroxide is only to geopolymers that produce closed pores, so applications for adsorbents will be very limited. Therefore we need a pore forming agent in the form of a surfactant. This study studied the combination of hydrogen peroxide as foaming agent and soybean oil as surfactant forming agents on the porous characteristics of the geopolymers produced, as well as on the effectiveness of Pb²⁺ ions adsorption in solution. The method used for the synthesis of porous geopolymers is by adding hydrogen peroxide and soybean oil to geopolymer paste with various variations of the composition of hydrogen peroxide: soybean oil of 0:0, 0:1, 1:0, 1:1, 1:1, 1:2, and 2:1. The porous geopolymers produced are characterized, namely porosity analysis using the SAA BET method, density analysis using gravimetric methods, mineral analysis using XRD, and analysis of functional groups using FTIR. Porous geopolymers further improve the efficiency of heavy metal ions Pb(II) adsorption in the adsorbate solution using AAS to get variations which have highest efficiency. The characterization results show that variations in the composition of hydrogen peroxide and soybean oil affect the characteristics of the resulting geopolymer. Analysis of geopolymer products shows that the addition of H₂O₂ and soybean oil synergistically has a positive effect, namely the largest pore surface area at 1:1 composition, the largest pore volume at 1:1 composition, and the average smallest pore radius at 1:2 composition. Density analysis shows that the lowest density is at composition 0:1. Analysis with XRD showed that there was no significant change in mineral peaks in geopolymers. Functional group analysis shows that the addition of soybean oil gives absorption band at 2923 cm⁻¹ which is the C-H vibration of soybean oil. The application of geopolymers in the adsorption of Pb²⁺ metal ions provides the greatest absorption efficiency at a composition of 1:2 which is 56.16%.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN.....	iii
MOTO DAN PERSEMBAHAN.....	iv
PRAKATA DAN UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
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.....	6
2.1 Abu Layang.....	6
2.2 Geopolimer.....	7
2.3 Sintesis Geopolimer.....	11
2.4 Geopolimer Berpori.....	14
2.5 <i>Alkali-Activator</i>	15
2.6 Bahan Pembuat Pori.....	15
2.6.1 <i>Foaming Agent</i>	15
2.6.2 Minyak Kedelai.....	17
2.7 Adsorpsi.....	19
2.8 Adsorpsi Ion Logam Pb ²⁺ dengan Geopolimer Berpori.....	20
2.9 Analisis Komposisi Kimia Abu Layang dengan XRF.....	22
2.10 Analisis Gugus Fungsi dengan Spektrofotometer Inframerah (FTIR).....	23
2.11 Analisis Fasa atau mineral dengan <i>X-ray Diffraction</i> (XRD).....	25
2.12 Surface Area Analyzer (SAA) Metode BET.....	26
2.13 Atomic Absorption Spectrometry (AAS).....	27
BAB III METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Lokasi Penelitian.....	29
3.2 Sampel.....	29
3.3 Variasi Penelitian.....	29
3.3.1 Variabel Bebas.....	29
3.3.2 Variabel Terikat.....	29
3.3.3 Variabel Terkendali.....	30
3.4 Alat dan Bahan.....	30
3.5 Prosedur Penelitian.....	31
3.5.1 Preparasi.....	31

3.5.1.1 Preparasi Abu Layang.....	31
3.5.1.2 Pembuatan Larutan Alkali.....	31
3.5.2 Sintesis Geopolimer Berpori.....	31
3.5.3 Analisis dan Karakterisasi Hasil Sintesis.....	32
3.5.3.1 Analisis Densitas Geopolimer Berpori.....	32
3.5.3.2 Analisis Pori dengan SAA.....	33
3.5.3.3 Analisis Fasa Mineral dengan XRD.....	33
3.5.3.4 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR.....	33
3.5.4 Aplikasi.....	34
3.5.4.1 Pembuatan Larutan Pb ²⁺ 1000 ppm.....	34
3.5.4.2 Pembuatan Larutan Pb ²⁺ 100 ppm.....	34
3.5.4.3 Pembuatan Larutan Deret Kalibrasi Pb ²⁺	34
3.5.4.4 Uji Adsorpsi Ion Logam Pb ²⁺ dengan Geopolimer Berpori..	34
3.5.5 Analisis Serapan Ion Logam Pb ²⁺ dalam Larutan dengan AAS.....	35
BAB IV PEMBAHASAN.....	36
4.1 Tahap Preparasi dan Karakterisasi Bahan Awal.....	36
4.1.1 Preparasi Abu Layang.....	36
4.1.2 Preparasi Larutan Alkali.....	38
4.2 Tahap Sintesis Geopolimer Berpori.....	38
4.3 Tahap Karakterisasi Hasil Analisis Geopolimer Berpori.....	40
4.3.1 Analisis Porositas Geopolimer dengan Metode BET.....	40
4.3.1.1 Analisis Luas Permukaan Pori.....	40
4.3.1.2 Analisis Volume Pori.....	41
4.3.1.3 Analisis Rerata Jari-jari Pori.....	43
4.3.2 Analisis Densitas Geopolimer Berpori.....	45
4.3.3 Analisis Fasa Mineral dengan XRD.....	46
4.3.4 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR.....	48
4.4 Tahap Aplikasi Analisis Kadar Logam Berat Pb ²⁺ dalam Larutan Adsorbat.....	51
BAB V PENUTUP.....	55
5.1 Simpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA.....	57
LAMPIRAN.....	64

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Sifat fisik abu layang batubara.....	6
2. Komposisi kimia abu layang dari berbagai jenis batubara.....	7
3. Komposisi kimia abu layang PLTU Karangandri Cilacap.....	23
4. Pita-pita vibrasi karakteristik pada geopolimer.....	23
5. Hasil interpretasi spektra FTIR pada geopolimer berbusa.....	25
6. Variasi komposisi bahan.....	32
7. Analisis komposisi kimia abu layang (% berat).....	37
8. Analisis komposisi kimia natrium silikat teknis (% berat).....	37
9. Hasil interpretasi spektra FTIR pada abu layang.....	50
10. Hasil interpretasi spektra FTIR pada geopolimer berpori.....	50
11. Hasil analisis kadar logam berat Pb^{2+} dalam larutan adsorbat.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Struktur dan jenis <i>polysialate</i>	8
2. Proses polikondensasi.....	9
3. Representasi skematis dari kerangka geopolimer.....	10
4. Mekanisme Saponifikasi Minyak pada Geopolimer Berpori.....	19
5. Usulan mekanisme adsorpsi Pb^{2+} oleh geopolimer berpori dengan penambahan H_2O_2 dan minyak kedelai.....	20
6. Diagram distribusi spesiasi Pb^{2+} pada pH tertentu.....	21
7. Proses eksitasi dan spektrum sinar-X.....	22
8. Hasil Uji Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR pada Geopolimer Berbusa.....	24
9. Difraktogram abu layang PLTU Cilacap.....	26
10. Difraktogram Hasil Uji Analisis Fasa Mineral dengan XRD pada Geopolimer Berbusa.....	26
11. Tampilan skematik komponen utama instrumen untuk AAS.....	28
12. Tampilan skematik spektrometer berkas ganda.....	28
13. Pasta hasil pencampuran bahan.....	38
14. Hasil sintesis geopolimer berpori dengan berbagai komposisi penambahan H_2O_2 dan minyak kedelai.....	39
15. Grafik luas permukaan pori variasi geopolimer berpori dengan metode BET.....	40
16. Volume pori variasi geopolimer berpori dengan metode BET.....	41
17. Rerata jari-jari pori variasi geopolimer berpori dengan metode BET.....	43
18. Mekanisme saponifikasi minyak nabati.....	44
19. Skema reaksi saponifikasi minyak dalam pasta geopolimer.....	44
20. Grafik densitas geopolimer berpori (g/mL).....	45
21. Difraktogram abu layang dan geopolimer berpori dalam berbagai variasi.....	47
22. Spektra FTIR geopolimer berpori.....	49
23. Grafik persentase penyerapan (%) ion logam berat Pb^{2+}	52

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Skema Prosedur Kerja Penelitian.....	64
2. Perhitungan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dari abu layang dan natrium silikat.....	68
3. Perhitungan fasio mol Na^+ dari NaOH dan Na_2O pada natrium silikat.....	69
4. Perhitungan perhitungan standarisasi NaOH teknis dengan asam oksalat.....	70
5. Perhitungan stoikiometri minyak kedelai dengan NaOH.....	71
6. Perhitungan pembuatan larutan adsorbat Pb(II) 100 ppm.....	73
7. Perhitungan densitas geopolimer berpori.....	74
8. Perhitungan persentasepenyerapan geopolimer berpori terhadap ion logam berat Pb^{2+}	80
9. Kartu PDF (<i>Powder Diffraction File</i>) untuk penentuan jenis mineral dengan XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>).....	82
10. Tabel intensitas puncak difraksi mineral pada geopolimer berpori.....	84
11. Analisis pencilan (<i>outlier</i>) data Tabel 11 menggunakan metode <i>boxplot</i>	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsumsi batubara sebagai sumber energi dari tahun ke tahun selalu mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kebutuhan listrik masyarakat luas. Peningkatan konsumsi batubara ini diikuti meningkatnya produksi batubara tahun 2009-2018 yang cukup besar, dengan capaian produksi pada tahun 2018 sebesar 557 juta ton (*Outlook Energi Indonesia*, 2019). Melihat produksi batubara sebagai sumber energi, ternyata pemanfaatan batubara ini menimbulkan masalah baru terhadap lingkungan sekitar. Pembakaran batubara pada PLTU sebagai sumber energi pembangkit listrik menyebabkan hasil residu pembakaran berupa gas dan padatan. Residu pembakaran batubara berupa gas meliputi gas-gas seperti CO₂, NO_x, CO, dan SO₂ (Muchjidin, 2006).

Residu pembakaran batubara berupa padatan antara lain yaitu abu layang (*fly ash*) yang keluar melalui cerobong asap dan abu bawah (*bottom ash*) yang tertinggal dan terkumpul di bagian dasar tungku pembakaran. Persentase masing-masing abu yaitu kurang lebih 80% untuk abu layang dan 20% untuk abu bawah (Sukandarrumidi, 2009). Meskipun persentase abu layang cukup tinggi yaitu sekitar 80%, namun pemanfaatan residu abu layang masih terbatas yaitu hanya sekitar 20% dari jumlah abu layang yang dihasilkan. Pemanfaatan abu layang yang merupakan residu atau limbah pembakaran batubara di pembangkit listrik diantaranya sebagai bahan campuran semen, bahan atau komponen utama pembuatan adsorben, pupuk, bahan campuran plastik, dan sebagainya (Irani, 2009).

Salah satu pendekatan paling penting untuk mengatasi masalah limbah *fly ash* adalah dengan mengolah limbah tersebut menjadi material yang bermanfaat dan dapat diterapkan (Al-Zboon *et al.*, 2011). Geopolimer adalah material pengikat inovatif yang dapat diproduksi dari bahan aluminosilikat yang banyak tersedia di seluruh dunia. Geopolimer dihasilkan dari material kaya akan silika dan alumina yang bereaksi dengan larutan alkali dan menghasilkan pasta aluminosilikat sehingga bertindak sebagai bahan pengikat. Tingginya tingkat sifat mekanik dan teknologi ramah lingkungannya, geopolimer muncul sebagai bahan konstruksi prospektif untuk

masa depan (Živica *et al.*, 2016). Inovasi terbaru dalam teknologi geopolimer telah membawa berbagai jenis pengembangan produk geopolimer, termasuk material geopolimer berpori, yang dibentuk oleh penambahan agen pembusa ke matriks geopolimer berbasis *fly ash*. Zat yang berfungsi sebagai agen pembusa ini terurai, atau bereaksi dengan matriks cair atau oksigen dalam matriks, menghasilkan pelepasan gas yang membentuk pori-pori saat pengerasan (Ducman & Korat, 2016).

Salah satu bahan pembentuk pori dalam sintesis geopolimer adalah hidrogen peroksida (H_2O_2). Hal ini karena H_2O_2 akan terdekomposisi secara cepat menghasilkan oksigen yang dapat membentuk busa di dalam pasta geopolimer (Vaou & Panias, 2010). Aluminium, silikon, dan H_2O_2 telah digunakan sebagai bahan pembusa pori untuk pembuatan busa geopolimer (Feng *et al.*, 2015; Kopeck *et al.*, 2014). Geopolimer berpori juga dapat dibentuk dengan menambahkan fraksi volume udara yang besar ke dalam campuran, terutama dengan bahan pembusa organik seperti deterjen, saponin, dan protein terhidrolisis (Cilla *et al.*, 2014). Baru-baru ini, rute pemrosesan alternatif untuk pembuatan geopolimer berpori mengedepankan emulsi berbasis minyak (Medpelli *et al.*, 2014; Sharma *et al.*, 2015). Penambahan H_2O_2 pada sampel geopolimer berpori menciptakan sebagian besar pori-pori tertutup, sedangkan kombinasi H_2O_2 dengan minyak (pada jumlah yang lebih tinggi) menyebabkan pembentukan pori-pori yang saling berhubungan dalam matriks (Lertcumfu *et al.*, 2019). Eksperimen lain yang terkait dengan penambahan minyak ke geopolimer, menunjukkan bahwa minyak dapat terperangkap di dalam matriks geopolimer (Cantarel *et al.*, 2015). Surfaktan juga dikombinasikan dengan agen pembusa kimia untuk menstabilkan busa dalam matriks geopolimer dan untuk mengurangi pori-pori kasar. Penambahan surfaktan dan hidrogen peroksida dapat menghasilkan struktur mikro yang homogen dengan pori-pori kecil. Sampel berbusa dengan surfaktan menunjukkan distribusi homogen pori makro (Masi *et al.*, 2014). Pencampuran pasta geopolimer dengan minyak menghasilkan surfaktan karboksilat (molekul sabun) secara *in situ* melalui reaksi saponifikasi trigliserida dengan larutan alkali. Minyak yang ditambahkan berperan sebagai surfaktan mengalami reaksi saponifikasi selama proses homogenisasi pasta geopolimer, yang mengubah trigliserida hidrofobik menjadi senyawa sabun dan gliserol (Medpelli *et al.*, 2014). Minyak yang dipilih yaitu minyak kedelai karena kedelai adalah biji minyak yang

dominan di pasar dunia. Dominasi kedelai berasal dari berbagai faktor, termasuk karakteristik pertanian yang menguntungkan, produk minyak nabati berkualitas tinggi, dan pasokan kedelai berlimpah yang tersedia dengan harga yang lebih murah dibandingkan minyak nabati lainnya (Asbridge, 1995).

Penelitian oleh Cilla *et al* (2014) menunjukkan metode sintesis pori pada geopolimer dengan agen pembuat pori melalui reaksi saponifikasi menghasilkan nilai porositas total (83,5%), rata-rata ukuran pori yang lebih besar ($318 \pm 18 \mu\text{m}$), serta densitas yang lebih kecil. Penelitian lain dilakukan oleh Barbosa *et al* (2018), geopolimer mesopori disintesis menggunakan rute sintesis dengan sumber silika dan alumina, dan minyak kedelai sebagai agen pengarah mesostruktur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa geopolimer mesopori memiliki daya adsorptivitas yang lebih baik dibandingkan dengan geopolimer yang disintesis tanpa menggunakan minyak. Geopolimer dapat dipersiapkan melalui proses yang relatif sederhana dan rendah energi, paling umum yaitu dengan memperlakukan prekursor aluminosilikat dengan larutan alkali hidroksida pekat dan/ atau larutan silikat. Bahan yang dihasilkan secara umum bersifat amorf, memiliki stabilitas fisik dan kimia yang baik, memiliki sifat penukar ion, dan strukturnya berpori. Beberapa prekursor merupakan produk sampingan industri atau bahan murah lainnya yang tersedia, yang semakin meningkatkan kelayakan lingkungan dan ekonomi. Aplikasi material yang teraktivasi alkali dalam pengolahan air dan air limbah adalah sebagai adsorben/penukar ion (Luukkonen *et al.*, 2019).

Geopolimer telah banyak digunakan untuk aplikasi potensial dalam pengolahan air dan air limbah selama dekade terakhir (Luukkonen *et al.*, 2019). Hal ini didasari karena pertumbuhan jumlah penduduk sebanding dengan kebutuhan akan air untuk berbagai keperluan. Pemenuhan kebutuhan air bersih untuk menunjang aktivitas manusia hingga saat ini cukup menjadi masalah yang serius karena kondisi perairan yang diperburuk dengan adanya limbah industri yang dibuang ke lingkungan, yang seringkali mengandung ion logam berat yaitu logam dengan densitas lebih dari 5 g/cm^3 dan afinitas besar seperti merkuri (Hg), kadmium (Cd), timbal (Pb), arsen (As), dan krom (Cr), dan logam berat lainnya yang berpotensi merusak lingkungan dan kesehatan jika masuk dalam tubuh. Logam-logam berat yang berada dalam perairan biasanya ditemukan dalam bentuk partikel-partikel

koloid, ion logam bebas, atau senyawa kompleks (Endrinaldi, 2009). Logam timbal (Pb) dalam perairan umumnya membentuk ion logam bebas dengan bilangan oksidasi +2. Logam timbal memiliki sifat racun yang apabila kontak dengan tubuh manusia, dapat menyebabkan kerusakan pada sistem saraf pusat dan gangguan pada organ. Tingkat maksimum kandungan Pb yang diperbolehkan pada air minum adalah 0,01 mg/L atau setara dengan 0,01 ppm (Permenkes RI Nomor 492 Tahun 2010).

Salah satu metode dalam aplikasi material geopolimer untuk pengolahan air dan air limbah yaitu metode adsorpsi menggunakan adsorben. Adsorben merupakan bahan padat dengan luas permukaan dalam yang sangat besar. Permukaan yang luas ini terbentuk karena banyaknya pori halus dengan ukuran yang beragam. Disamping luas spesifik dan diameter pori, maka kerapatan, distribusi ukuran partikel, maupun kekerasannya merupakan data karakteristik yang penting dari suatu adsorben (Asip *et al.*, 2008). Teknik adsorpsi merupakan teknik yang paling umum digunakan dalam pengolahan air limbah karena teknik yang sederhana, biaya yang dibutuhkan rendah, dan efektivitasnya (Novais *et al.*, 2016). Geopolimer memiliki kapasitas pertukaran kation yang tinggi dan afinitas besar untuk logam berat kationik (Al-Zboon *et al.*, 2011). Selain itu, geopolimer memiliki struktur tiga dimensi dan tetrahedral yang terbentuk karena adanya ikatan silika-alumina dengan atom oksigen yang memiliki situs bermuatan negatif yang dapat menarik zat terlarut bermuatan positif (Hajimohammadi *et al.*, 2010). Berbagai bentuk geopolimer telah disintesis untuk adsorpsi logam berat seperti bentuk serbuk (Al-Harabsheh *et al.*, 2015), bola (Bravo *et al.*, 2019), manik-manik atau *beads* (Cerna *et al.*, 2018), dan spons (Bai *et al.*, 2017).

Secara umum, untuk menangani pencemaran logam berat pada perairan yang mana dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan sekitar, maka perlu dilakukan berbagai upaya. Salah satu upaya untuk mengatasi pencemaran logam berat yaitu dengan metode adsorpsi. Penggunaan geopolimer berpori berbasis abu layang sebagai adsorben ion logam berat terutama ion logam berat Pb^{2+} diharapkan mampu mengatasi masalah pencemaran air dan selain itu juga dapat menangani limbah pembakaran batubara berupa abu layang yang menumpuk.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang dijelaskan sebelumnya, maka diperoleh rumusan masalah yaitu:

1. Bagaimana pengaruh komposisi hidrogen peroksida sebagai *foaming agent* dan minyak kedelai sebagai *porous directing agent* terhadap karakteristik geopolimer yang dihasilkan yang meliputi volume pori, rerata jari-jari pori, dan densitas geopolimer berpori?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi hidrogen peroksida dan minyak kedelai dalam geopolimer terhadap persentase penyerapan ion logam Pb^{2+} dalam larutan?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari latar belakang yang dijelaskan sebelumnya, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui pengaruh komposisi hidrogen peroksida sebagai *foaming agent* dan minyak kedelai, yang keduanya sebagai *porous directing agent*, terhadap karakteristik geopolimer yang dihasilkan yang meliputi volume pori, rerata jari-jari pori, dan densitas geopolimer berpori.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi hidrogen peroksida dan minyak kedelai terhadap persentase penyerapan ion logam Pb^{2+} dalam larutan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan aplikasi material geopolimer berbasis abu layang batubara dengan modifikasi pembentukan pori yang dapat dimanfaatkan sebagai media adsorpsi ion logam berat Pb^{2+} dalam larutan berair. Selain itu, penelitian ini juga bermanfaat untuk menambah nilai ekonomis dan nilai guna abu layang batubara yang melimpah.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Abu Layang

Muchjidin (2006) menyatakan bahwa abu layang batubara merupakan zat anorganik yang tertinggal setelah pembakaran batubara. Sifat-sifat fisika, kimia dan mineralogi abu layang tergantung pada komposisi batubara awal, kondisipembakaran, kinerja dan efisiensi alat pengontrol emisi, penanganan dan penyimpanan serta iklim (Sukandarrumidi, 2009). Beberapa sifat fisik dan sifat kimia dari abu layang, antara lain:

1. Sifat fisik

Sifat fisik abu layang batubara atau fly ash berdasarkan bentuk, warna, ukuran, tampilan, kerapatan, dan luas area spesifikasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisik abu layang batubara(Sukandarrumidi, 2009).

Bentuk	Berbentuk bola padat atau berongga
Warna	Berwarna keabu-abuan
Ukuran	1-100 μm
Tampilan	Sangat halus
Kerapatan	2100 sampai 3000 kg/m^3
Luas area spesifikasi	170 sampai 1000 m^2/kg

2. Sifat kimia

Menurut Sukandarrumidi (2009), komposisi unsur-unsur kimia utama dari abu layang dibedakan menjadi tiga kelompok sebagai berikut.

- a. Oksida logam asam antara lain : SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2
- b. Oksida logam basa antara lain : Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , dan Na_2O
- c. Unsur-unsur lain seperti P_2O_5 , SO_3 , sisa karbon, dan beberapa unsur lain

Adapun secara kimia unsur utama penyusun abu layang adalah Si, Al, Fe, serta Ca, K, Na, dan Ti dalam persentase yang cukup berarti. Oleh karena itu, abu layang disebut sebagai bahan amorf ferroaluminio silikat. Selain komponen utamatersebut, abu layang juga mengandung unsur-unsur lain yaitu Sb, Be, Cu, U, Ge, dan sebagainya (Muchjidin, 2006).

Sifat kimia dari abu layang dipengaruhi oleh teknik pembakaran batubara, penanganan serta penyimpanannya. Abu layang diklasifikasikan berdasarkan adanya perbedaan komposisi kimia yakni kandungan kalsium oksidanya (CaO), antara lain :

a. Tipe C

Menurut ASTM C 618 abu terbang kelas C mengandung >8% berat CaO dari total berat. Senyawa lain yang terkandung didalamnya adalah SiO₂ sebanyak 30-50%. Al₂O₃ sebanyak 17-20%, Fe₂O₃, MgO, Na₂O dan sedikit K₂O.

b. Tipe F

Menurut ASTM C 618 abu layang tipe F mengandung kadar Ca yang rendah (<8% berat CaO). Tabel 2 menunjukkan komposisi kimia abu layang dari berbagai jenis batubara (Al-zeer & Mackenzie, 2019).

Tabel 2. Komposisi kimia abu layang dari berbagai jenis batubara (dalam % berat)

Komponen Oksida	Kelas C	Kelas F
SiO ₂	46,48	66,68
Al ₂ O ₃	19,1	22,46
Fe ₂ O ₃	10,2	5,79
CaO	15,56	1,09
MgO	2,85	0,56
SO ₃	0,45	<0,01
Na ₂ O	0,76	0,18
K ₂ O	0,69	1,05
P ₂ O ₅	0,27	0,18
MnO	0,08	0,09
TiO ₂	1,19	0,99

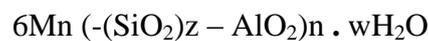
(Al-zeer & Mackenzie, 2019).

Komposisi utama *fly ash* yaitu oksida anorganik seperti SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ dan sebagian kecil senyawa oksida lain. Komposisi utama dari *fly ash* tersebut mendukung *fly ash* memiliki peran dalam berbagai aplikasi (Sarbak & Wachowiak, 2002). Salah satu aplikasi dari *fly ash* yang populer adalah sebagai adsorben untuk adsorpsi ion logam berat, zat organik, anion, dan zat warna dalam air (Suhas *et al.*, 2013).

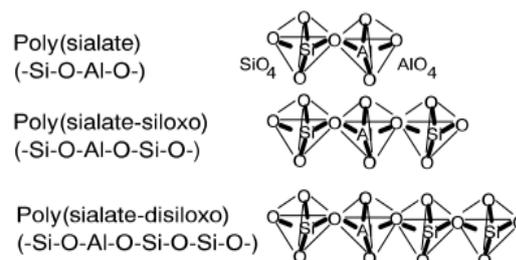
2.2 Geopolimer

Geopolimer adalah bahan polimer anorganik yang diperoleh dengan mencampurkan padatan kering (aluminosilikat) dengan larutan alkali dan konstituen

lain, jika perlu. Konstituen utamanya merupakan bahan sumber yang harus kaya silikon (Si) dan aluminium (Al). Konstituen utama ini bisa berupa mineral alami seperti tanah liat, kaolinit, lumpur merah, abu layang, terak, dan lain-lain yang dikenal sebagai bahan "limbah" (Lloyd & Rangan, 2010). Geopolimer juga dapat didefinisikan sebagai material yang dihasilkan dari geosintesis aluminosilikat polimerik dan alkali-silikat yang menghasilkan kerangka polimer SiO_4 dan AlO_4 yang terikat secara tetrahedral (Davidovits, 1994). Davidovits juga menggunakan istilah “*poly(sialate)*” untuk geopolimer berbasis silika-aluminat. Sialate adalah kependekan dari silikon-okso-aluminat (*siloxo-oxo-aluminate*). Rumus empiris dari *poly(sialate)* adalah:



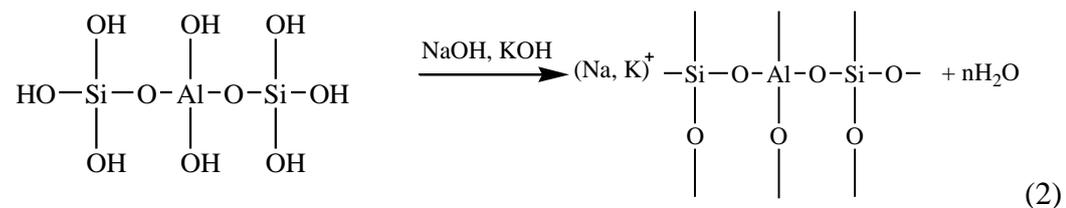
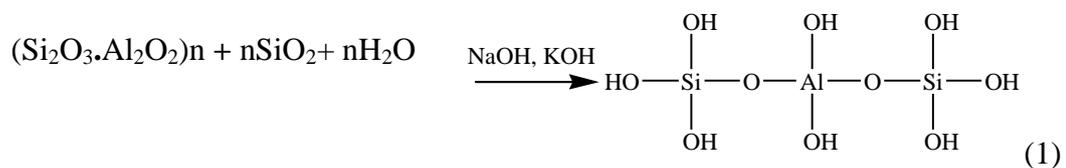
Dimana z adalah rasio Si / Al yaitu bilangan 1, 2, atau 3, sampai dengan 32; M merupakan kation monovalen, seperti kalium atau natrium; dan “ n ” adalah derajat polikondensasi. Davidovits juga membedakan tiga tipe *polysialate* yaitu, tipe *poly(sialate)* (-Si-O-Al-O), tipe *poly(sialate-siloxo)* (-Si-O-Al-O-Si-O), dan tipe *poly(sialate-disiloxo)* (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O). Struktur dari polysialate dapat dilihat pada Gambar 1. Deskripsi awal mengenai aktivasi alkali adalah proses yang terdiri dari dekomposisi, penataan ulang, kondensasi, dan resolidifikasi (Glukhovsky, 1959). Menurut pengetahuan saat ini, proses aktivasi alkali meliputi langkah-langkah utama berikut: (1) dekomposisi sumber aluminosilikat, (2) spesiasi dan keseimbangan aluminat dan silikat, (3) gelasi, (4) reorganisasi, dan (5) polimerisasi dan pengerasan (Duxson *et al.*, 2007). Selain itu, suhu, jumlah air, metode pencampuran, dan sifat fisik bahan baku (ukuran partikel, bentuk dan luas permukaan) semuanya dapat secara signifikan mempengaruhi sintesis (Luukkonen *et al.*, 2019).



Crystalline Poly(sialate) M_n -(-Si-O-Al-O-) $_n$ and Poly(sialate-siloxo) M_n -(-Si-O-Al-O-Si-O-) $_n$

Gambar 1. Struktur dan jenis *polysialate* (Davidovits, 1994).

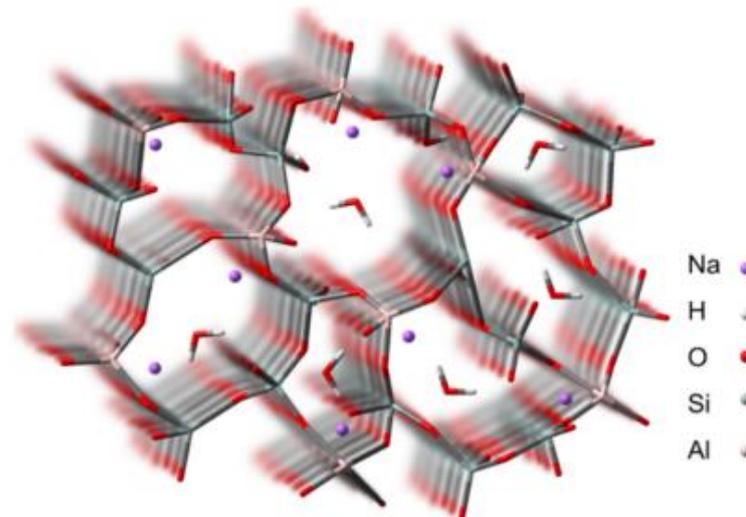
Geopolimer merupakan kelas amorf polimer anorganik aluminosilikat (Provis *et al.*, 2005). Strukturnya terdiri dari unit tetrahedral silikat dan aluminat yang disusun secara acak dan bergabung melalui atom oksigen secara bersama-sama membentuk kerangka 3D (Duxson, 2007; Yao, *et al.*, 2009). Komponen pada geopolimer memiliki komposisi kimia yang mirip dengan zeolit yang terdiri dari kerangka Si-O-Al polimer, namun memiliki sifat yang berbeda dan strukturnya amorf. Sifat-sifatnya sangat tergantung pada sumber Al-Si, aktivator, sumber agregat, sumber air, jumlah campuran masing-masing bahan, waktu pengerasan/pengeringan, suhu, dimensi partikel, dan konsentrasi kalsium (Rajamane & Nataraja, 2018; Swanepoel & Strydom, 2002). Geopolimerisasi atau proses pembentukan geopolimer melibatkan reaksi kimia dari alumina-silikat oksida (Si_2O_5 , Al_2O_2) dengan alkali polisilikat yang menghasilkan ikatan polimer Si-O-Al. Proses polikondensasi oleh alkali menjadi *poly(sialate-siloxo)* ditunjukkan pada persamaan 1 dan 2 (Davidovits, 1994).



Dari persamaan reaksi polikondensasi (1) dan (2) dapat diketahui bahwa pada reaksi kimia pembentukan senyawa geopolimer juga dihasilkan air (H_2O). Molekul air tersebut akan dikeluarkan atau dihilangkan selama proses *curing* (Wallah & Rangan, 2006).

Geopolimer secara konvensional telah digunakan sebagai alternatif ramah lingkungan untuk semen *Portland* karena menghasilkan sifat mekanik yang baik. Geopolimer memiliki sejumlah fitur yang berguna seperti struktur berpori, kemampuannya dalam pertukaran ion, biaya preparasi yang relatif murah, kemudahan sintesis, dan keramahan lingkungan. Dengan demikian, potensi

geopolimer baru-baru ini telah ditunjukkan dalam berbagai aplikasi seperti zat pembawa obat, *photoluminescence*, aplikasi kromatografi, dan katalisis (Al-zeer & Mackenzie, 2019).



Gambar 3. Representasi skematis dari kerangka geopolimer (Al-zeer & Mackenzie, 2019).

Geopolimer menghasilkan material dengan sifat mekanik yang menjanjikan dan tahan terhadap serangan kimia. Sifat mekaniknya mirip dengan semen *Portland* biasa, namun proses memproduksi geopolimer menghasilkan jauh lebih sedikit gas rumah kaca. Dengan sifat mekanik dan keuntungannya maka geopolimer dapat dipandang sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan daripada semen *Portland* biasa (Palomo *et al.*, 1999). Selain itu, semen geopolimer lebih unggul dibandingkan semen Portland dalam hal ketahanan panas dan api, yang mana semen Portland dapat mengalami penyusutan atau penurunan kekuatan tekan yang relatif cepat pada suhu 300°C dibandingkan semen geopolimer mampu mempertahankan kekuatan tekan dan tetap stabil sampai suhu 600°C. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa geopolimer memiliki kekuatan awal yang tinggi, penyusutan yang rendah, *freeze-thaw resistance*, ketahanan terhadap api, dan reaksi agregat alkali (Davidovits, 1994).

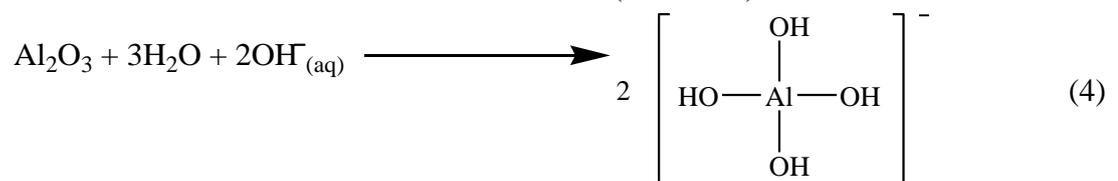
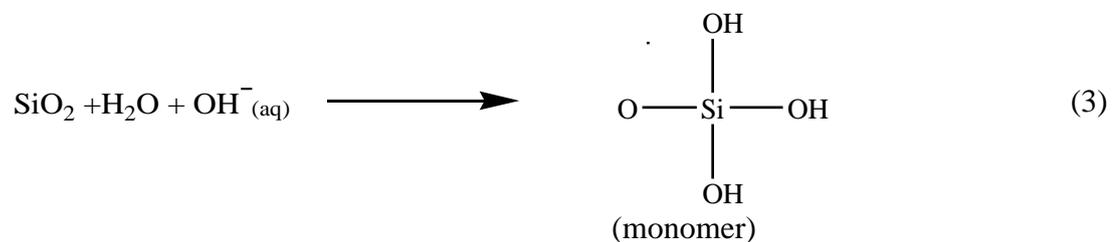
Geopolimer dianggap ramah lingkungan karena selain dibuat menggunakan bahan-bahan atau material limbah, proses geopolimerisasi tidak memerlukan energi

yang tinggi. Selain itu, material geopolimer juga memiliki beberapa keunggulan lainnya yaitu:

1. Geopolimer memiliki kekuatan yang tinggi dan waktu pengerasannya singkat (Jaarsveld *et al.*, 2003).
2. Bersifat amorf, memiliki stabilitas fisik dan kimia yang baik, memiliki kemampuan sebagai penukar ion, struktur berpori (Luukkonen *et al.*, 2019).
3. Geopolimer tahan terhadap lingkungan asam (Bakharev, 2005).
4. Geopolimer dapat menyerap sejumlah besar ion logam alkali dalam air limbah (Luukkonen *et al.*, 2019).

2.3 Sintesis Geopolimer

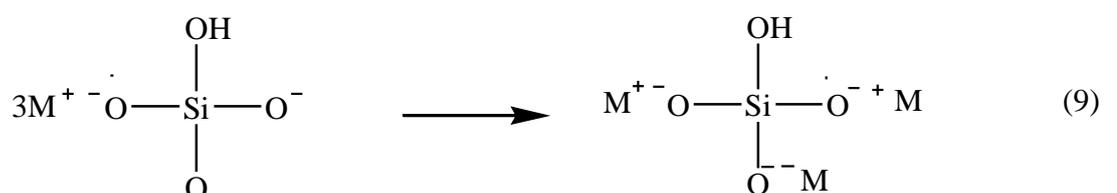
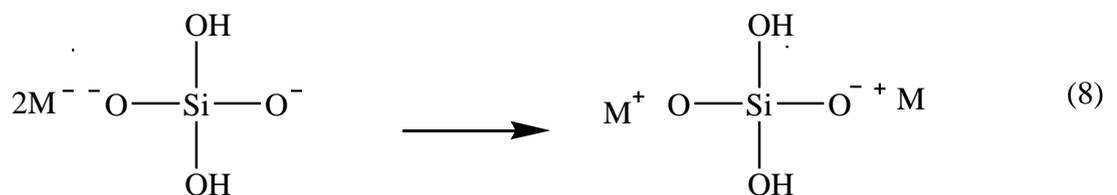
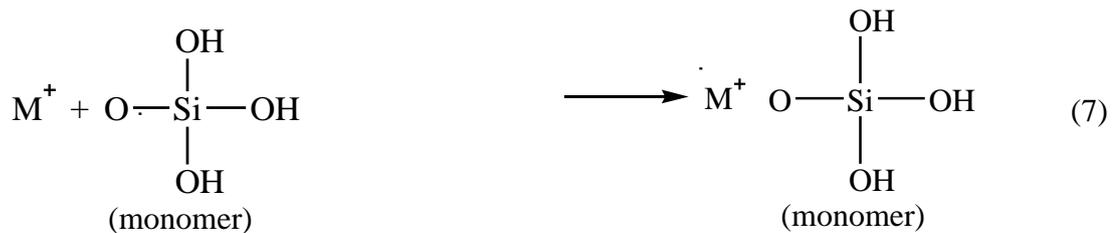
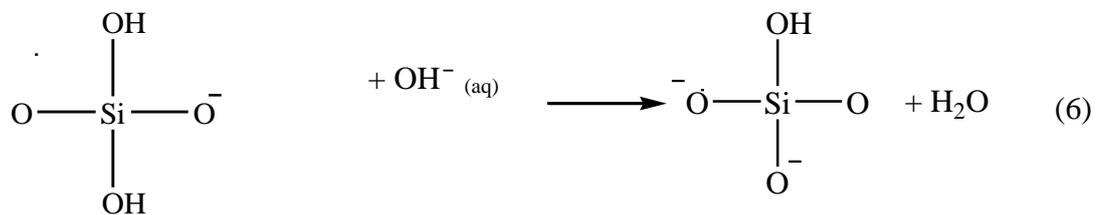
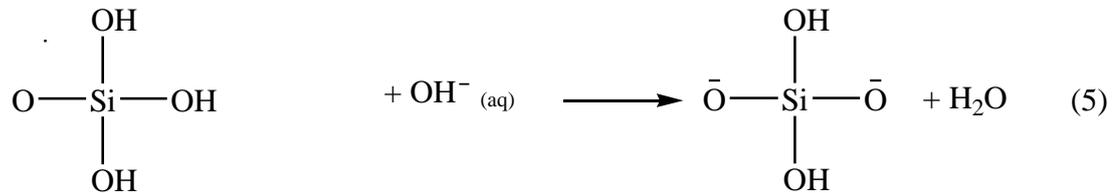
Geopolimer memiliki jaringan anorganik tiga dimensi semi-kristal yang dihasilkan oleh pembubaran dan reaksi dari sumber alumino-silikat padat dengan larutan pengaktif, telah menarik perhatian karena karakteristiknya yang unik dan menguntungkan. Sintesis, karakterisasi, dan aplikasi potensial geopolimer berpori diwujudkan melalui rute pemrosesan yang berbeda (Bai & Colombo, 2018).



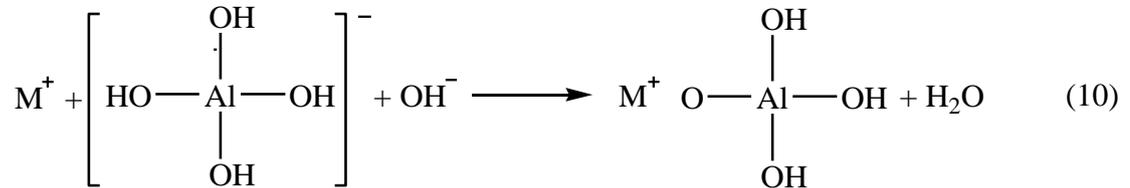
Tahap pertama dari reaksi geopolimerisasi adalah pelepasan monomer aluminat dan silikat dengan serangan alkali pada sumber aluminosilikat padat, yang diperlukan untuk konversi partikel padat menjadi geopolimer gel (Provis & Deventer, 2007). Reaksi hidrolisis terjadi pada permukaan partikel padat, diikuti oleh pembentukan spesies terlarut yang saling silang membentuk oligomer, dan kemudian pengaturan dan pengerasan dikaitkan dengan polikondensasi dan pembentukan jaringan aluminosilikat tiga dimensi. Tahap disolusi, dimulai segera setelah larutan

alkali bersentuhan dengan abu layang. Pada tahap ini, konsentrasi OH yang tinggi dari media alkali mendukung pemecahan ikatan Si-O-Si, Si-O-Al dan Al-O-Al yang hadir dalam fase *vitreous* abu, melepaskan ion silikon dan aluminium ke dalam larutan, di mana komposisi ini membentuk spesies dengan jumlah kelompok Si-OH dan Al-OH yang tinggi. Selama tahap gelasi, spesies ionik hadir dalam larutan (monosilikat dan monoaluminat unit) berkondensasi untuk membentuk ikatan Si-O-Al dan Si-O-Si, sehingga menimbulkan gel aluminosilikat tiga dimensi dengan kation alkali (Jiménez *et al.*, 2006).

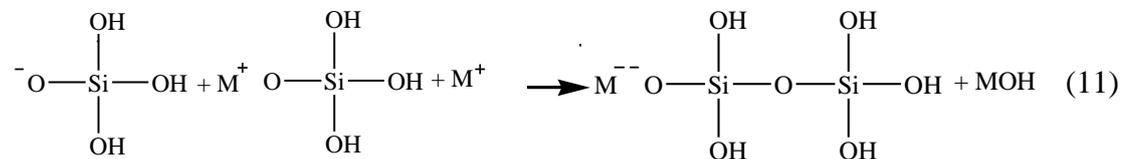
Reaksi monomer silikat dengan basa digambarkan pada persamaan reaksi:



Reaksi monomer aluminat (Xu & Van Deventer, 2000) dalam basa adalah sebagai berikut:



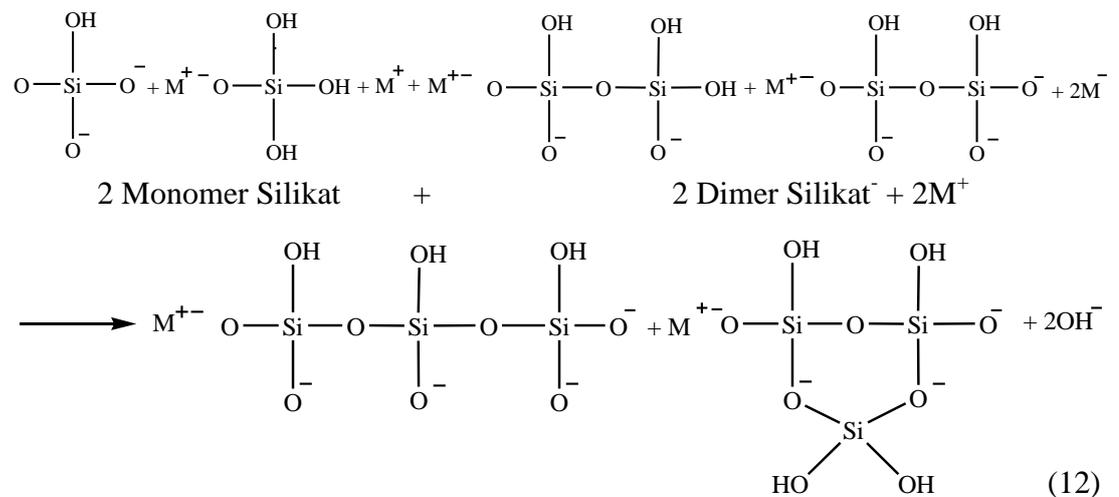
Reaksi pembentukan oligomer silikat digambarkan dengan persamaan reaksi (Xu & Van Deventer, 2000):



monomer

monomer

dimer

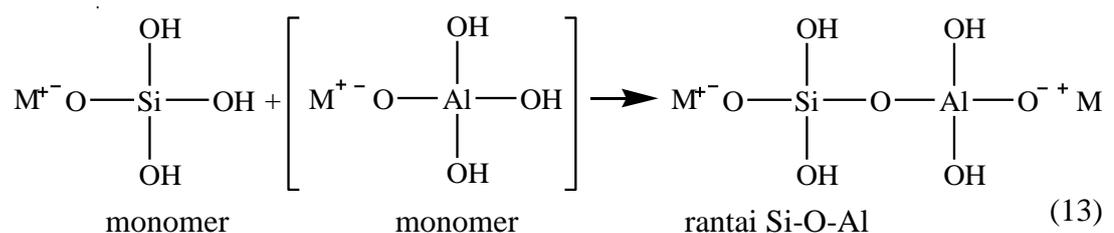


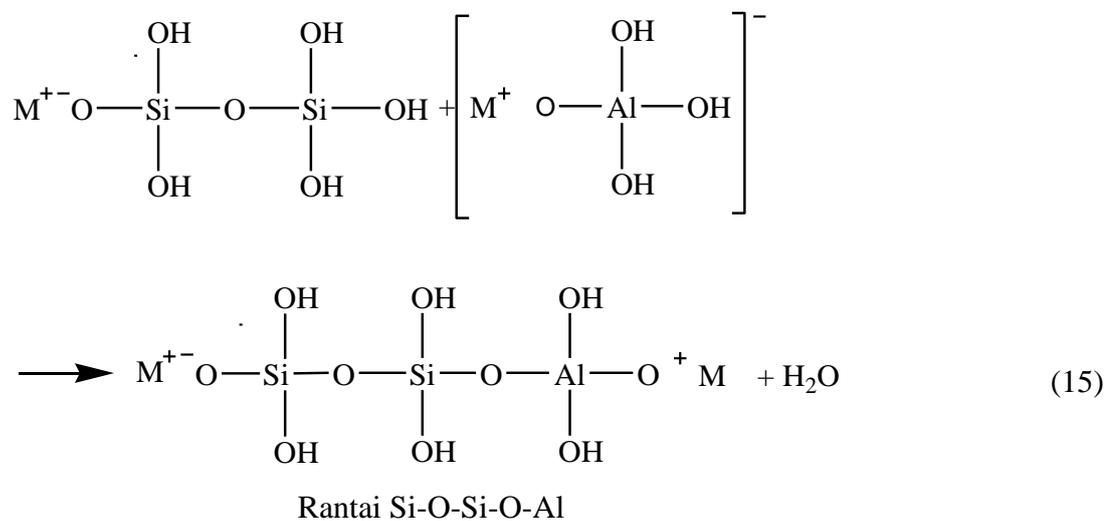
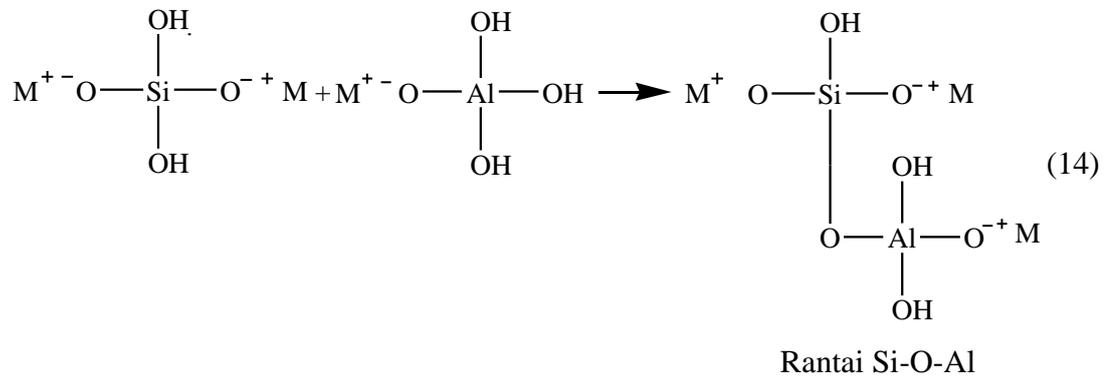
M⁺ Trimer Siklik

+ M⁺ Trimer Linear

+ 2OH⁻

Reaksi kondensasi monomer silikat dan aluminat dengan persamaan reaksi (H. Xu & Van Deventer, 2000):





2.4 Geopolimer Berpori

Metode *direct foaming* (DF) adalah teknik yang paling banyak digunakan untuk memproduksi geopolimer berpori. Dalam metode *direct foaming*, busa geopolimer diproduksi dengan memasukkan udara atau gas ke dalam pasta homogen, yang selanjutnya diatur dengan *curing* pada suhu tertentu untuk memperoleh geopolimer berpori yang terkondensasi. Selama proses *curing*, reaksi geopolimerisasi berlanjut hingga selesai, menghasilkan jaringan anorganik tiga dimensi yang berkelanjutan. Berbusa adalah proses yang secara termodinamik tidak stabil, karena ketidakstabilan busa, pori-pori besar (ratusan mikron) dan berbagai ukuran pori biasanya ada dalam badan geopolimer berpori. Untuk menghindari fenomena ini, pendekatan yang paling sering digunakan adalah menambahkan zat penstabil (seperti surfaktan dan serat) ke suspensi atau media cair. Generasi gas ke dalam cairan homogen atau media pasta dapat direalisasikan dengan menambahkan

blowing agent (BA), yang dapat diklasifikasikan baik sebagai *blowing agent* bahan kimia atau fisik. *Blowing agent* kimia membentuk produk gas (seperti O₂ dan H₂) dan produk sampingan lainnya dengan dekomposisi termal atau reaksi kimia. *Blowing agent* fisik menghasilkan porositas dengan perubahan fasa, misalnya cairan diuapkan atau gas yang dilarutkan dalam sistem di bawah tekanan tinggi dapat diserap oleh dekomposisi (Bai & Colombo, 2018).

Pengembangan porositas makro dalam sistem geopolimer memungkinkan untuk pembuatan komponen dengan konduktivitas termal rendah, jumlah larutan natrium *water glass* dan H₂O₂ adalah parameter utama yang mengendalikan porositas, kepadatan atau massa jenis, konduktivitas termal dan morfologi pori. Dosis H₂O₂ yang lebih tinggi memiliki pengaruh pada porositas yang lebih tinggi pula, kekuatan tekan yang lebih rendah, konduktivitas termal, dan ketidakteraturan morfologi pori (Feng *et al.*, 2015).

2.5 Aktivasi Alkali

Aktivasi alkali adalah istilah umum yang diterapkan pada reaksi aluminosilikat padat (disebut 'prekursor') di bawah kondisi alkali (diinduksi oleh 'aktivator alkali'), untuk menghasilkan pengikat pengeras yang didasarkan pada kombinasi dari fase cairan alkali-aluminosilikat dan / atau fase padat alkali-alkali-aluminosilikat. Sebagai aktivator alkali, senyawa yang paling umum digunakan adalah MOH dan M₂O·rSiO₂, di mana M adalah Na atau K. Lingkup aplikasi pengikat yang teraktivasi alkali begitu luas, dan terus tumbuh, dengan pemanfaatan yang ditunjukkan pada beton bertulang, beton polos, komponen beton pracetak (termasuk elemen ringan) baik yang diperkuat maupun tidak, mortar, beton berbusa dan ringan, matriks untuk imobilisasi limbah beracun dan nuklir, baik organik maupun anorganik (Provis, 2017).

2.6 Bahan Pembuat Pori

2.6.1 *Foaming Agent*

Agen pembusa adalah zat yang dimasukkan ke dalam suatu polimer, dan dalam kondisi yang tepat, mereka mengembangkan polimer dan membuat busa polimer. Ada dua jenis utama agen pembusa, yaitu agen pembusa fisik dan

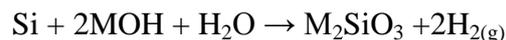
kimia. Agen pembusa fisik cenderung berupa cairan yang mudah menguap atau gas terkompresi yang mengubah keadaan selama pemrosesan lebur untuk membentuk struktur seluler. Agen pembusa kimia adalah senyawa organik berbobot molekul rendah yang terurai pada suhu tertentu dan melepaskan gas, seperti nitrogen, karbon dioksida, atau karbon monoksida. Agen pembusa dapat dibagi juga menjadi dua klasifikasi utama yaitu organik dan anorganik. Zat pembusa organik tersedia dalam berbagai macam bentuk kimia, bentuk fisik, dan modifikasi, seperti, misalnya, *azodicarbonamide*. Agen pembusa anorganik cenderung lebih terbatas, seperti, misalnya, natrium karbonat (Niaounakis, 2015).

Hidrogen peroksida juga merupakan salah *satu blowing/ foaming agent*. Hidrogen peroksida (H_2O_2) memiliki ketidakstabilan secara termodinamika sehingga mudah terurai menjadi H_2O dan O_2 . Kelebihan hidrogen peroksida sebagai *foaming agent* adalah tidak mencemari lingkungan karena hanya terurai menjadi air dan oksigen. Terbentuknya O_2 mampu menciptakan pori pada geopolimer sehingga menurunkan densitas geopolimer, sehingga geopolimer berbusa yang disintesis diharapkan memiliki sifat kuat, pori permukaan yang luas, dan mempunyai densitas yang rendah sehingga potensial untuk menggantikan beton ringan yang aman dan ramah lingkungan. Hasil analisis gugus fungsi dengan menggunakan FTIR menunjukkan bahwa penambahan H_2O_2 pada pasta geopolimer tidak menimbulkan terbentuknya gugus fungsi baru dalam geopolimer. Hal ini ditandai dengan pita ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al yang tidak mengalami perubahan. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa penambahan H_2O_2 pada material geopolimer yang pada umumnya berfasa amorf, menyebabkan adanya fasa kristal mineral sisa reaktan karena sebagian H_2O_2 bereaksi dengan basa. Hasil analisis dengan SEM membuktikan bahwa penambahan H_2O_2 memperbesar ukuran pori. Hidrogen peroksida dengan rumus kimia H_2O_2 merupakan bahan kimia anorganik yang memiliki sifat oksidator kuat. Senyawa H_2O_2 memiliki karakteristik yang khas yaitu tidak berwarna, memiliki bau agak keasaman, dan memiliki kelarutan sangat baik dalam air (Kusumastuti & Widiarti, 2015). Hidrogen peroksida terdekomposisi dan

terurai dengan mengikuti reaksi eksotermis berikut (Kusumastuti & Widiarti, 2015):



Selain H_2O_2 , *silica fume* dapat difungsikan sebagai agen pembusa. Volume ekspansi bahan mengalami peningkatan saat *silica fume* ditambahkan ke campuran. Peningkatan ini disebabkan oleh generasi gas yang dihasilkan oleh penggunaan *silica fume* (Galiano *et al.*, 2018). Penggunaan berbagai jenis anion (silikat atau hidroksida) juga memengaruhi komposisi kimia akhir gel (rasio Si/Al lebih tinggi dalam gel setelah aktivasi dengan silikat) (Fernandez-Jimenez *et al.*, 2005; Palomo *et al.*, 1999). Generasi pori disebabkan oleh $\text{H}_2(g)$ yang dilepaskan selama reduksi air dan silika (dari *silica fume*) (Masi *et al.*, 2014). Peningkatan kadar *silica fume* dalam campuran menyebabkan rasio air/padatan meningkat. Fenomena ini menunjukkan bahwa *silica fume* dapat menunjukkan perilaku material inert dalam reaksi geopolimerisasi. Porositas terbuka meningkat dan densitas menurun ketika proporsi *silica fume* dalam campuran dan suhu meningkat (Galiano *et al.*, 2018). Reaksi dekomposisi *silica fume* pada sintesis geopolimer yaitu (Bai & Colombo, 2018):



Pembentukan busa oleh serbuk aluminium di lingkungan alkali terjadi segera setelah penambahan serbuk aluminium ke campuran. Serbuk aluminium bereaksi dalam lingkungan alkali yang kuat dengan menimbulkan gas hidrogen (Škvára *et al.*, 2014). Reaksi dekomposisi serbuk aluminium pada sintesis geopolimer yaitu (Bai & Colombo, 2018):



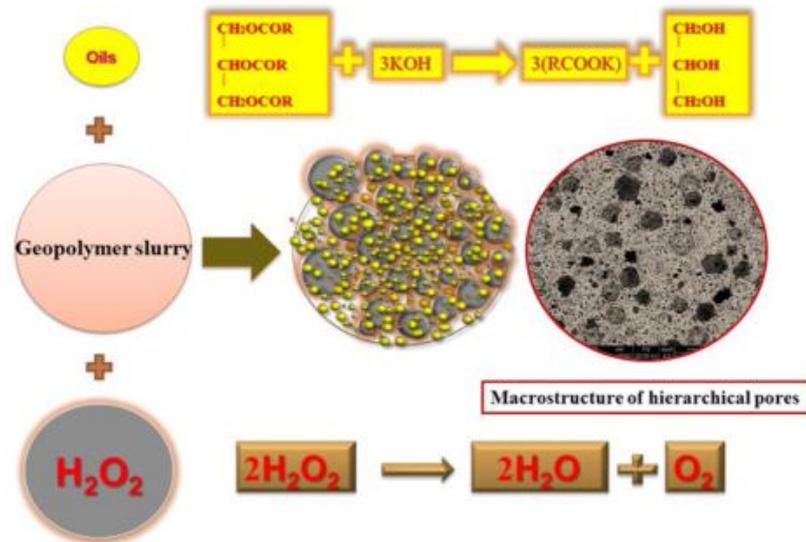
Sifat-sifat busa geopolimer dipengaruhi oleh ukuran butir serbuk aluminium serta koefisien air. Penampilan busa geopolimer yang distabilkan secara optimal memperlihatkan distribusi pori yang seragam (Škvára *et al.*, 2014).

2.6.2 Minyak Kedelai

Komposisi minyak kedelai utamanya terdiri dari trigliserida atau triasilgliserol, dengan berbagai asam lemak jenuh dan tak jenuh yang terdapat dalam gliserida minyak kedelai. Tiga asam lemak tak jenuh yang terdapat dalam minyak kedelai yaitu asam oleat (22,8 % berat), linoleat (50,8 % berat), dan asam linolenat (6,8 % berat)(Perkins, 1995). Rantai asam lemak pada suatu minyak menentukan karakteristik fisik dan kimia (*physicochemical*) seperti angka Iod (dinyatakan sebagai gram I₂ yang diserap/100 g sampel dalam kondisi standar) dan angka saponifikasi sebagai parameter yang berguna untuk menentukan kualitas suatu minyak nabati (Bart *et al.*, 2010). Angka Iodium tergantung pada persentase konsentrasi komponen asam lemak tak jenuh dari jumlah ikatan rangkap yang ada dalam struktur. Jumlah ikatan rangkap pada asam lemak mempengaruhi derajat ketidakjenuhan suatu asam lemak(Odoom & Edusei, 2015). Nilai atau angka saponifikasi berkaitan dengan semua asam lemak yang ada dalam sampel. Untuk menentukan angka saponifikasi, sampel benar-benar disabunkan dengan alkali berlebih. Jumlah saponifikasi tergantung pada berat molekul dan persentase konsentrasi komponen asam lemak yang ada dalam minyak. Angka saponifikasi dari minyak kedelai menunjukkan nilai yang cukup tinggi yaitu sebesar 189-195 (mg KOH/g).Minyak dengan angka saponifikasi tinggi memiliki kemampuan menghasilkan busa yang tinggi(Bart *et al.*, 2010).

Minyak nabati seperti minyak kedelai dapat dimanfaatkan salah satunya sebagai agen penstabil atau surfaktan dalam sintesis geopolimer berpori. Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat isolasi, mekanik, pori, dan mikrostruktur telah banyak diteliti dan diketahui bahwa komposisi yang mengandung agen penstabil atau *blowing agent* didalamnya memiliki pengaruh yang signifikan pada struktur pori dan kinerja busa yang terbentuk (Bai *et al.*, 2017). Surfaktan juga dikombinasikan dengan masing-masing agen pembusa kimia untuk menstabilkan busa dalam matriks geopolimer dan untuk mengurangi pori-pori kasar (Masi *et al.*, 2014). Gambar 4 menunjukkan pembentukan surfaktan dengan reaksi saponifikasi minyak dalam lingkungan alkali geopolimer (Bai &

Colombo, 2018) menyebabkan peningkatan total dan terbukanya pori (Cilla *et al.*, 2014).



Gambar 4. Mekanisme saponifikasi minyak pada geopolimer berpori(Bai & Colombo, 2018).

2.7 Adsorpsi

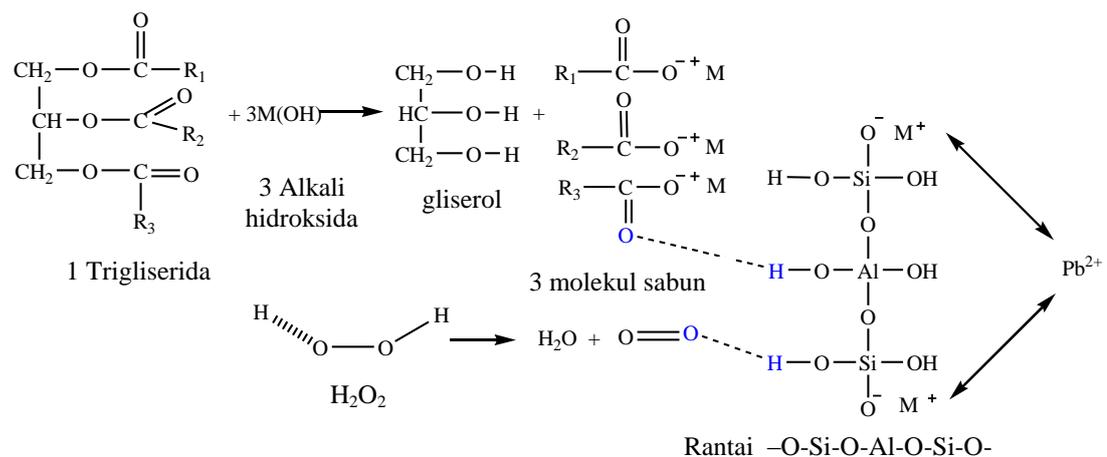
Adsorpsi merupakan proses perpindahan massa suatu zat pada pori-pori permukaan suatu adsorben. Perpindahan massa suatu zat dapat terjadi melalui batas antara dua fasa yaitu : gas-padat dan cair-padat. Adsorben adalah bahan padat dengan luas permukaan dalam yang besar. Permukaan yang luas ini terbentuk karena banyaknya pori halus pada padatan tersebut. Disamping luas permukaan dan diameter pori, distribusi ukuran partikel merupakan data karakteristik yang penting dari suatu adsorben. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi yaitu:

1. Proses pengadukan, karena selain dipengaruhi oleh *film diffusion* dan *pore diffusion*, kecepatan adsorpsi juga dipengaruhi oleh pengadukan. Proses adsorpsi dengan pengadukan yang tepat akan meningkatkan *film diffusion* sampai titik *pore diffusion* yang merupakan faktor pembatas dalam sistem *batch*, sehingga perlu dilakukan pengadukan yang tinggi. Jika proses pengadukan relatif kecil maka adsorben sukar menembus lapisan *film* antara permukaan adsorben dan *film diffusion* yang merupakan faktor pembatas yang memperkecil kecepatan penyerapan.
2. Karakteristik adsorben, hal ini karena adsorpsi dipengaruhi oleh dua karakteristik permukaan suatu bahan, yaitu energi permukaan dan gaya tarik permukaan. Energi

permukaan dan gaya tarik permukaan dipengaruhi oleh sifat fisik adsorben dengan ukuran partikel dan luas permukaan. Keduanya menjadi faktor terpenting dari bahan yang akan digunakan sebagai adsorben.

3. Kelarutan adsorben, dimana proses adsorpsi terjadi pada molekul-molekul yang ada dalam larutan yang mana molekul-molekul tersebut harus dapat berpisah dari cairannya dan dapat berikatan dengan permukaan adsorben. Sifat unsur yang terlarut mempunyai gaya tarik-menarik terhadap cairannya yang lebih kuat bila dibandingkan dengan unsur yang sukar larut. Sehingga unsur yang mudah terlarut akan lebih sulit terserap pada adsorben bila dibandingkan dengan unsur yang tidak larut (Asip *et al.*, 2008).

Mekanisme adsorpsi Pb^{2+} oleh geopolimer dengan penambahan H_2O_2 dan minyak kedelai diusulkan seperti pada Gambar 5.



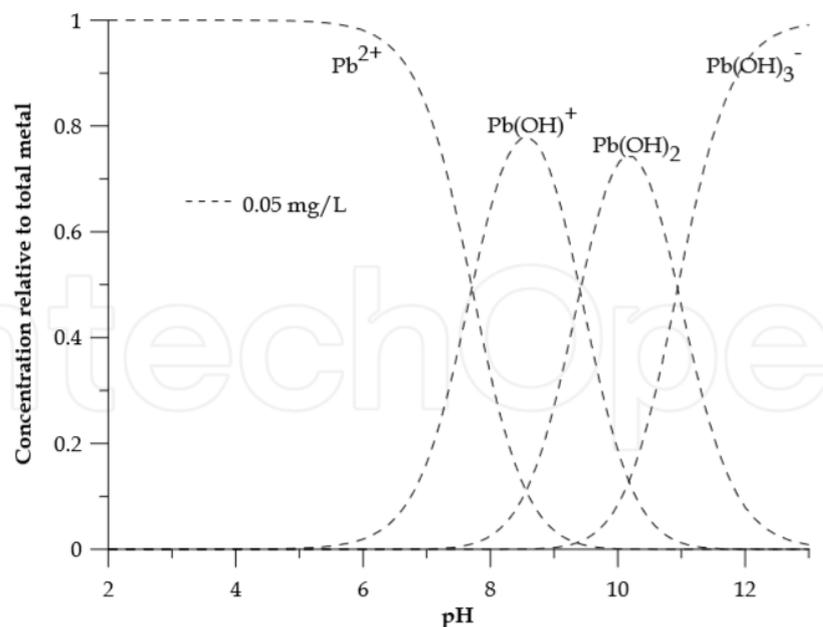
Gambar 5. Usulan mekanisme adsorpsi Pb^{2+} oleh geopolimer dengan penambahan H_2O_2 dan minyak kedelai (Modifikasi dari Bai & Colombo, 2018).

2.8 Adsorpsi Ion Logam Pb^{2+} dengan Geopolimer Berpori

Wang *et al.* (2007) membandingkan kapasitas penyerapan ion logam berat oleh *fly ash* dan geopolimer. Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas penyerapan pada abu layang dan geopolimer masing-masing adalah 39,87% dan 90,6%. Meskipun abu layang adalah unsur utama dari sistem geopolimer, hasil ini menunjukkan bahwa geopolimer yang disintesis memiliki keunggulan dalam meningkatkan persentase ion logam yang diserap dibandingkan dengan abu layang.

Abu layang mengandung beberapa zat yang dapat memblokir pori-pori matriks dan karenanya menghambat zat terlarut dari teradsorpsi secara efisien. Geopolimer yang disintesis memiliki distribusi ukuran pori yang terdefinisi dengan baik dan luas permukaannya lebih tinggi. Permukaan ini diperkaya dengan gugus fungsi selama aktivasi oleh basis yang kuat. Parameter yang dapat digunakan untuk mengetahui tercapainya kondisi optimum dalam adsorpsi ion logam Pb(II) dalam suatu larutan adalah adsorpsi pada kondisi pH, konsentrasi, suhu, dan waktu kontak tertentu.

Adsorpsi ion logam Pb(II) pada geopolimer meningkat dengan meningkatnya waktu kontak dan mencapai nilai maksimum setelah 120 menit, dan setelah itu tetap (konstan). Kapasitas adsorpsi geopolimer terhadap ion logam Pb(II) terjadi pada konsentrasi Pb awal (C_0) yaitu 100 ppm sebanyak 50 mL, dan pH optimal diperoleh pada pH 5 (Al-Zboon *et al.*, 2011). Spesiasi pH larutan untuk adsorpsi Pb^{2+} ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram distribusi spesiasi Pb^{2+} pada pH tertentu (Nurchi dan Villaescusa, 2011).

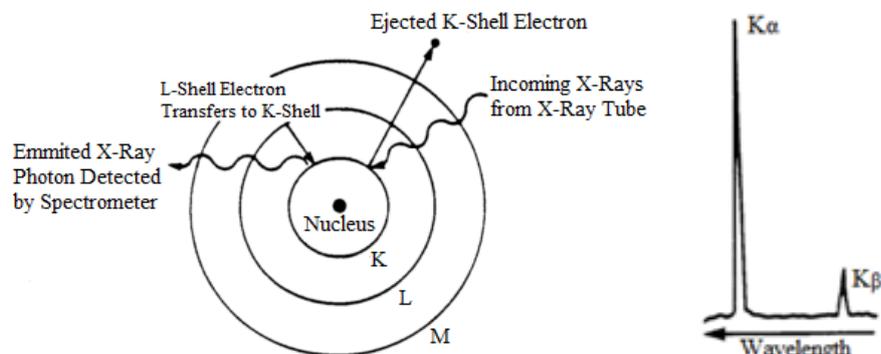
Pada nilai pH rendah, terdapat kelebihan ion H_3O^+ dalam larutan, yang membuat persaingan antara ion hidrogen bermuatan positif dan ion Pb^{2+} untuk situs adsorpsi yang tersedia pada permukaan geopolimer yang bermuatan negatif. Peningkatan pH menyebabkan persaingan antara proton dan Pb(II) pada situs

permukaan akan menurun dan ion Pb^{2+} adalah spesies yang mendominasi, yang akan tertarik ke permukaan geopolimer oleh kekuatan kolumbik. Jika nilai pH lebih besar dari 5.0, timbal hidroksida seperti $Pb(OH)_3^{1-}$ mulai terbentuk dan mengakibatkan penurunan adsorpsi Pb(II) pada geopolimer (Ayari *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2008).

Adsorpsi logam menurun ketika pH menurun dari 7 menjadi 2, karena persaingan dengan ion hidrogen. Peningkatan pH, dan penurunan konsentrasi ion hidrogen sebagai pesaing, dapat mempengaruhi peningkatan jumlah logam yang diserap. Secara umum, adsorpsi sebagian besar ion logam meningkat dengan meningkatnya pH hingga nilai tertentu, dan kemudian menurun dengan kenaikan lebih lanjut dalam pH (Ahmaruzzaman, 2010).

2.9 Analisis Komposisi Kimia Abu Layang dengan X-Ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) adalah metode analisis unsur yang tidak merusak. XRF didasarkan pada prinsip bahwa setiap elemen memancarkan spektrum garis sinar-X karakteristiknya sendiri. Ketika sinar-X menimpa elemen target, elektron orbital dikeluarkan. Kekosongan yang dihasilkan di kulit bagian dalam diisi oleh elektron kulit terluar. Selama proses ini, energi dilepaskan dalam bentuk sinar-X sekunder yang dikenal sebagai fluoresensi. Energi foton sinar-X yang dipancarkan tergantung pada distribusi elektron dalam atom tereksitasi. Karena setiap elemen memiliki distribusi elektron yang unik, setiap elemen menghasilkan spektrum sinar-X sekunder yang unik pula, yang intensitasnya sebanding dengan konsentrasi elemen dalam sampel. Proses eksitasi dan spektrum sinar-X yang dihasilkan diilustrasikan untuk kalsium pada Gambar 7.



Gambar 7. Proses eksitasi dan spektrum sinar-X (Cheremisinoff, 1996).

Tabel 3. Komposisi kimia abu layang PLTU Karangandri Cilacap

Komponen	%
SiO ₂	39,8469
Al ₂ O ₃	12,7389
FeO	18,3053
CaO	21,5784
MgO	5,6853
TiO ₂	1,1439
S	0,6714
Na ₂ O	0,5863
MnO	0,3424
ZnO	0,1162
P ₂ O ₅	0,1104
V ₂ O ₅	0,0401
Cr ₂ O ₇	0,0008

(Widyaningsih *et al.*, 2018).

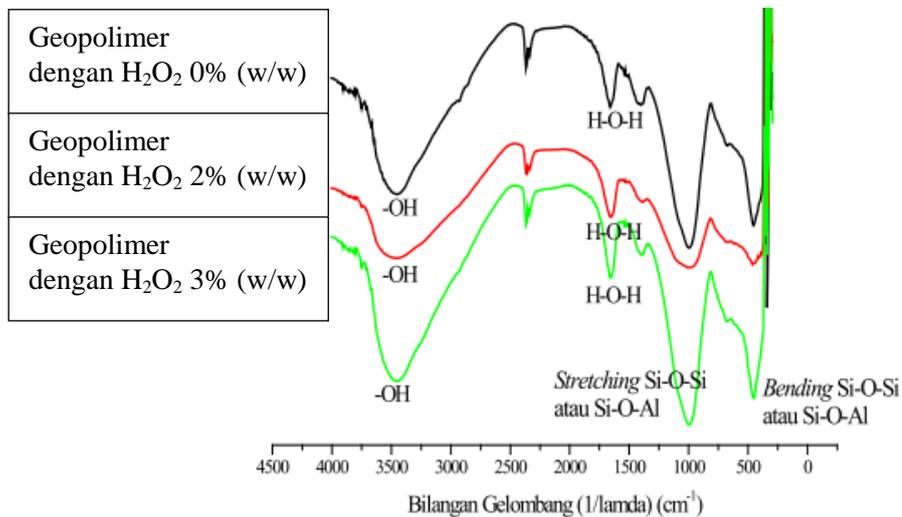
2.10 Analisis Gugus Fungsi dengan Spektrofotometer Inframerah (FTIR)

Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) adalah teknik yang banyak digunakan untuk mengidentifikasi kelompok-kelompok fungsional dalam bahan (gas, cairan, dan padatan) dengan menggunakan berkas radiasi inframerah. Spektroskopi inframerah mengukur penyerapan radiasi IR yang dibuat oleh masing-masing ikatan dalam molekul dan sebagai hasilnya memberikan spektrum yang umumnya ditetapkan sebagai% transmitansi versus bilangan gelombang (cm⁻¹). Berbagai bahan yang mengandung ikatan kovalen menyerap radiasi elektromagnetik di wilayah IR. Wilayah IR berada pada energi yang lebih rendah dan panjang gelombang lebih tinggi daripada sinar tampak-UV dan memiliki energi lebih tinggi atau panjang gelombang lebih pendek daripada gelombang radiasi gelombang mikro (Khan *et al.*, 2019).

Tabel 4. Pita-pita vibrasi karakteristik pada geopolimer (Timakul *et al.*, 2016).

Bilangan gelombang (cm ⁻¹)	Interpretasi ikatan
3463–3422	Vibrasi ulur/ <i>stretching</i> (–OH, H-O-H)
1644–1637	Vibrasi tekuk (H-O-H)
1435–1415	Vibrasi ulur/ <i>stretching</i> (O-C-O)
1200–950	Vibrasi ulur asimetris (T-O-Si; T = Si atau Al)
620	Vibrasi tekuk (O-Si-O)
510	Vibrasi tekuk (O-Si-O)
456–465	Vibrasi tekuk (Si-O-Si atau O-Si-O)

Fungsi utama dari spektrofotometer IR yaitu untuk mengenali struktur molekul terutama gugus fungsional. Aplikasi dari spektrofotometer IR makin luas, terutama dengan diperkenalkan teknik baru yaitu *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Perbedaan IR *disperse* dan FTIR terletak pada digunakannya interferometer yaitu cermin, cermin bergerak dan penjatah sinar (Hendayana, 1994). Metode spektroskopi FTIR dalam penelitian geopolimer digunakan untuk menentukan karakteristik dan gugus fungsi geopolimer sintesis yang terbentuk. Secara umum pita-pita vibrasi karakteristik dari geopolimer dapat ditunjukkan pada Tabel 4.



Gambar 8. Hasil uji analisis gugus fungsi dengan FTIR pada geopolimer berbusa pada variasi H₂O₂ 3,0% (Kusumastuti & Widiarti, 2015).

Gambar 8. menunjukkan hasil analisis perubahan ikatan kimia pada geopolimer dengan penambahan H₂O₂ sebanyak 0; 2,0 dan 3,0% setelah 28 hari. Pada bilangan gelombang 3400 cm⁻¹ dan 1600 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi ulur (*stretching*) –OH dan vibrasi tekuk (*bending*) H–O–H dari molekul-molekul air. Pita ini menunjukkan bahwa terdapat molekul-molekul air pada permukaan geopolimer maupun terjebak dalam rongga-rongga struktur kerangka geopolimer. Hal ini membuktikan bahwa penambahan H₂O₂ menyebabkan bertambahnya molekul air dari hasil reaksi peruraian H₂O₂ menjadi H₂O dan O₂ (Kusumastuti & Widiarti, 2015).

Tabel 5. Hasil interpretasi spektra FTIR pada geopolimer berbusa dengan penambahan H₂O₂(Kusumastuti & Widiarti, 2015).

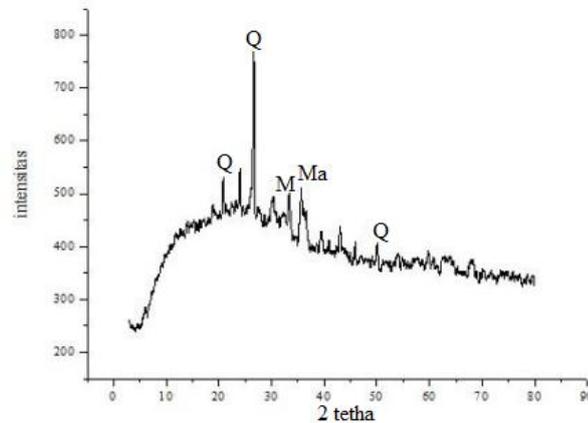
No	Pita Hasil Analisis FTIR pada Geopolimer Berbusa dengan Penambahan H ₂ O ₂			Interpretasi dan Referensi
	0,0 %	2,0 %	3,0 %	
1.	3448,72	3448,72	3448,72	Adanya vibrasi ulur (<i>stretching</i>) – OH (Panias et al., 2007).
2.	1658,78	1651,07	1658,78	Vibrasi tekuk (<i>bending</i>) H–O–H dari molekul-molekul air (Panias et al., 2007).
3.	1404,18	1381,03	1396,46	Vibrasi ulur O–C–O (Bakharev, 2005).
4.	995,27	995,27	995,27	Vibrasi ulur (<i>stretching asimetri</i>) Si–O–Si dan Si–O–Al (Bakharev, 2005).
5.	455,20	447,49	447,49	Vibrasi tekuk (<i>bending</i>) Si–O–Si dan O–Si–O (Bakharev, 2005).

2.11 Analisis Fasa atau mineral dengan *X-ray Diffraction* (XRD)

Difraksi sinar-X adalah hamburan elastis foton sinar-X oleh atom dalam kisi periodik. X-ray monokromatik yang tersebar yang berada dalam fase memberikan gangguan konstruktif. Seseorang memungkinkan untuk menurunkan jarak kisi karena difraksi sinar-x oleh bidang kristal dengan menggunakan hukum Bragg.

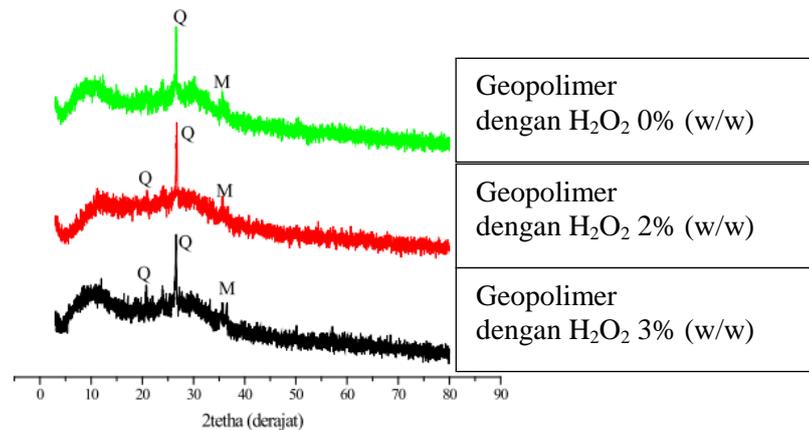
$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (13)$$

di mana n adalah bilangan bulat yang disebut order refleksi, λ adalah panjang gelombang sinar-x, d adalah jarak karakteristik antara bidang kristal dari spesimen yang diberikan dan θ adalah sudut antara balok datang dan normal ke bidang kisi pantulan. Dengan mengukur sudut, θ , di mana *x-ray* yang mengganggu secara konstruktif meninggalkan kristal, jarak antarplanar, d , dari setiap fase kristalografi tunggal dapat ditentukan. Untuk mengidentifikasi zat yang tidak diketahui, pola difraksi serbuk direkam dengan bantuan kamera atau difraktometer (Chatterjee, 2001).



Gambar 9. Difraktogram abu layang PLTU Cilacap(Hisan *et al.*, 2017).

Hasil analisis difraktogram abu layang PLTU Karangandri Cilacap pada difraktogram Gambar 9 menunjukkan bahwa abu layang tersebut merupakan material berfasa amorf dengan kandungan utama (SiO_2) *quartz* (Q) pada puncak 2θ 20,88; 26,66; dan 50,19°. Selain itu terdapat ($3\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2$) *mullite* (M) dan (FeFe_2O_4) *magnetite* (Ma).



Gambar 10. Difraktogram hasil uji analisis fasa mineral dengan XRD pada geopolimer berbusa pada variasi H_2O_2 30% sebesar 0, 2, dan 3% (b/b)(Kusumastuti & Widiarti, 2015).

2.12 Surface Area Analyzer (SAA) Metode BET

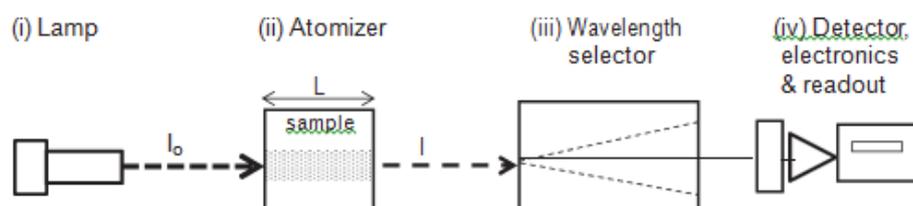
Surface Area Analyzer atau SAA merupakan salah satu alat karakterisasi yang berkaitan dengan luas permukaan suatu molekul. SAA didasarkan pada prinsip siklus adsorpsi dan desorpsi isothermis gas nitrogen pada sampel serbuk pada suhu nitrogen cair. Siklus diawali dengan memasukkan serbuk ke dalam tabung SAA, kemudian diberikan sejumlah gas, biasanya gas yang dipakai adalah nitrogen, argon

dan helium. Pemberian gas dilakukan sebelum dan sesudah diberikan serbuk. Sensor tekanan akan mendeteksi tekanan yang bervariasi. Kemudian didapatkan data hasil tekanan. Telah banyak teori dan model perhitungan yang dikembangkan para peneliti untuk mengubah data yang dihasilkan alat ini berupa jumlah gas yang diserap pada berbagai tekanan dan suhu tertentu (disebut juga isotherm) menjadi data luas permukaan, distribusi pori, volume pori dan lain sebagainya. Misalnya saja untuk menghitung luas permukaan padatan dapat digunakan metode BET, Metode Langmuir, metode t-plot, dan lainnya. Dari metode-metode ini, metode BET lebih sering digunakan dibandingkan dengan metode lain. BET merupakan singkatan nama dari ketiga ilmuwan yang menemukannya yaitu Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett, dan Edward Teller. Metode tersebut pertama kali diperkenalkan pada tahun 1938 (Brunauer *et al.*, 1938). BET memiliki prinsip perhitungan yaitu dengan mengetahui jumlah volume gas adsorbat total yang dimasukkan ke dalam tabung sebelum dimasukkan sampel dan mengetahui jumlah volume gas adsorbat total sisa atau yang tidak terserap oleh sampel, sehingga jumlah volume gas yang terserap oleh sampel dapat diketahui. Kemudian mengkonversi satuan volume ke dalam satuan luas (Rosyid *et al.*, 2012). Prinsip perhitungannya menjelaskan fenomena melekatnya molekul gas pada permukaan zat padat dengan lapisan ganda atau beberapa lapis permukaan (Brunauer *et al.*, 1938).

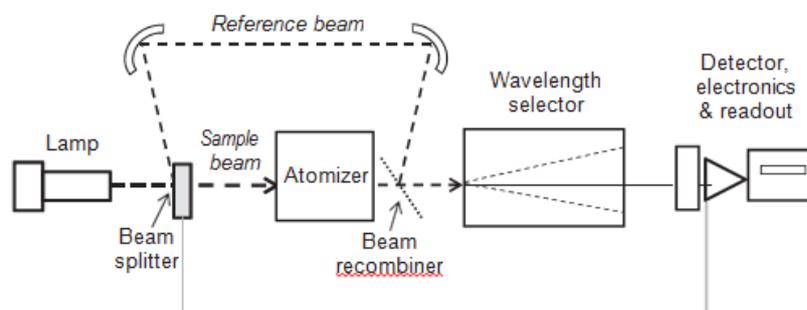
2.13 Atomic Absorption Spectrometry (AAS)

Spektrometri Serapan Atom (SSA) adalah teknik di mana atom gas bebas menyerap radiasi elektromagnetik pada panjang gelombang tertentu untuk menghasilkan sinyal yang dapat diukur. Sinyal serapan sebanding dengan konsentrasi atom-atom penyerap bebas di jalur optik. Oleh karena itu, untuk pengukuran AAS analit harus terlebih dahulu dikonversi menjadi atom gas, biasanya dengan aplikasi panas yang ada ke suatu alat penyemprot atau *atomizer* (Fernández *et al.*, 2018). Dalam spektrometri serapan atom, konsentrasi elemen ditentukan berdasarkan atenuasi atau penyerapan oleh atom analit, dari panjang gelombang karakteristik yang dipancarkan dari sumber cahaya. Sumber cahaya biasanya berupa lampu katoda berlubang yang mengandung elemen yang akan diukur. Diperlukan lampu terpisah untuk setiap elemen. Detektor biasanya berupa tabung

photomultiplier. Monokromator digunakan untuk memisahkan garis elemen dan sumber cahaya dimodulasi untuk mengurangi jumlah radiasi yang tidak diinginkan mencapai detektor. AAS digunakan untuk penentuan kadar ppm logam dalam sampel larutan. Biasanya tidak digunakan untuk analisis elemen ringan seperti H, C, N, O, P dan S, halogen, dan gas mulia. Lebih tinggi konsentrasi dapat ditentukan dengan pengenceran sampel sebelumnya. AAS tidak direkomendasikan jika sejumlah besar elemen diukur dalam sampel tunggal (Cheremisinoff, 1996). Spektrometer serapan atom terdiri dari empat bagian utama (lihat Gambar 11): (i) sebuah lampu (umumnya memancarkan garis spektral), (ii) sebuah alat penyemprot (baik nyala api atau perangkat elektrotermal) di mana atom gas dari sampel diproduksi, (iii) selektor panjang gelombang untuk mengisolasi cahaya spesifik yang diserap, dan (iv) detektor dengan elektronik dan sistem pembacaan yang sesuai untuk mendeteksi dan menghitung intensitas cahaya yang melewati celah keluar selektor panjang gelombang. Selain itu, modulator lampu dan korektor latar juga diperlukan.



Gambar 11. Tampilan skematik komponen utama instrumen untuk AAS termasuk komponen dasar: (i) lampu, (ii) alat penyemprot, (iii) pemilih panjang gelombang, dan (iv) detektor, elektronik, dan sistem pembacaan. Cahaya berdenyut (garis putus-putus) (Fernández *et al.*, 2018).



Gambar 12. Tampilan skematik spektrometer berkas ganda untuk pengukuran serapan atom (Fernández *et al.*, 2018).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Sintesis geopolimer berbahan dasar abu layang batubara dengan penambahan *porous directing agent* berupa hidrogen peroksida dan minyak kedelai dilakukan di Laboratorium Kimia Anorganik dan Laboratorium Riset, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (MIPA), Universitas Negeri Semarang. Analisis kandungan kimia abu layang menggunakan XRF di Laboratorium Terpadu MIPA Universitas Sebelas Maret. Analisis pori geopolimer berpori dengan adsorpsi N_2 metode BET dilakukan di Laboratorium Energi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Analisis fasa mineral geopolimer berpori dengan menggunakan instrumen *X-Ray Diffraction* (XRD) di Laboratorium Fisika Universitas Negeri Semarang. Selanjutnya analisis ikatan kimia pada geopolimer berpori menggunakan FTIR dilakukan di Laboratorium Kimia Universitas Negeri Semarang. Analisis Konsentrasi Larutan Pb^{2+} dengan menggunakan *Atomic Adsorption Spectrometry* (AAS) di Laboratorium Kimia Universitas Negeri Semarang.

3.2 Sampel

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu abu layang yang berasal dari pembakaran batubara PLTU Karangandri, Cilacap, Jawa Tengah.

3.3 Variasi Penelitian

3.3.1 Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi variasi komposisi hidrogen peroksida dan minyak kedelai yaitu 0:0, 0:1, 1:0, 1:1, 1:2, dan 2:1 pada proses sintesis geopolimer berpori.

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini yaitu karakteristik geopolimer yang meliputi densitas, ukuran pori, volume pori, dan daya serap air dari geopolimer berpori. Variabel terikat dalam aplikasi sebagai adsorben yaitu efektivitas

geopolimer berpori dalam penyerapan ion logam berat Pb^{2+} .

3.3.3 Variabel Terkendali

Variabel terkontrol dalam penelitian ini meliputi massa bahan (abu layang, H_2O , $NaOH$, dan Natrium Silikat) dalam komposisi semua pasta, waktu pengadukan, dan suhu *curing*. Sedangkan variabel terkontrol dalam aplikasi geopolimer berpori sebagai adsorben ion logam berat Pb^{2+} dalam larutan berair yaitu konsentrasi larutan logam Pb^{2+} 100 ppm 50 mL, massa atau dosis adsorben yaitu 0,08 gram, suhu $25^{\circ}C$, pH 5, waktu kontak adsorpsi selama 120 menit (Al-Zboon *et al.*, 2011).

3.4 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi alat untuk sintesis geopolimer berpori, alat untuk pembuatan larutan logam $Pb(NO_3)_2$, dan alat untuk karakterisasi geopolimer berpori. Alat yang digunakan untuk sintesis geopolimer berpori meliputi neraca analitik, ayakan 100 *mesh*, kaca arloji, gelas *beaker*, spatula, *mixer*, oven, pipet tetes, grinder, dan alat-alat plastik. Alat yang digunakan untuk penentuan densitas geopolimer berpori yaitu piknometer 10 mL dan 25 mL beserta tutupnya. Alat untuk pembuatan larutan logam $Pb(NO_3)_2$ meliputi *beaker glass*, labu takar 1000 mL dan 100 mL. Alat yang digunakan untuk karakterisasi geopolimer berpori meliputi *Surface Area Analyzer (SAA) Quantachrome Instruments version 3*, *X-Ray Fluorescence (XRF) Bruker*, *X-Ray Diffraction (XRD) Bruker 6000*, *Fourier Transform Infrared (FTIR) Analyse-400 Perkin Elmer*. Alat untuk aplikasi adsorpsi ion logam berat Pb^{2+} yaitu *shaking incubator Vision Scientific Model VS-8480*, dan analisis larutan adsorbatnya menggunakan *Atomic Absorption Analyzer (AAS) Perkin Elmer*.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu abu layang pembakaran batubara PLTU Karangandri Cilacap, Hidrogen Peroksida 30%, aquades, minyak kedelai 100% Mazola, $NaOH$ teknis 96,7%, Natrium Silikat teknis, dan $Pb(NO_3)_2$ Merck 99,5 %.

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Preparasi

3.5.1.1 Preparasi Abu Layang

Preparasi abu layang pembakaran batubara PLTU Karangandri Cilacap dipreparasi dengan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105° selama 24 jam. Abu layang hasil pengeringan selanjutnya diayak dengan menggunakan ayakan 100 *mesh*, kemudian dilakukan analisis komposisi kimia abu layang dengan menggunakan XRF (Syukur, 2015).

3.5.1.2 Pembuatan Larutan Alkali

Larutan alkali atau larutan pengaktif dibuat dengan melarutkan NaOH dengan aquades terlebih dahulu dan didiamkan selama minimal 24 jam. Larutan NaOH yang telah didiamkan selanjutnya dicampurkan dengan natrium silikat (Jaarsveld *et al.*, 2003; Duxson *et al.*, 2007).

3.5.2 Sintesis Geopolimer Berpori

Sintesis geopolimer berpori dilakukan dengan membuat pasta dari campuran abu layang yang telah di preparasi dengan larutan alkali *activator* (H₂O, NaOH, dan Natrium Silikat). Pasta geopolimer selanjutnya ditambahkan H₂O₂ terlebih dahulu dan diikuti dengan penambahan minyak kedelai. Campuran diaduk dengan menggunakan tangan ± selama 2 menit selanjutnya menggunakan *mixer* selama 5 menit hingga homogen. H₂O₂ dan minyak kedelai ditambahkan sesuai variasi komposisi yang ditunjukkan pada Tabel 6. Pasta geopolimer dicetak dalam cetakan silinder hingga memadat. Geopolimer yang telah mengalami pengerasan selanjutnya dilepaskan dari cetakan silinder dan dioven pada suhu 60°C dalam oven selama 24 jam untuk membantu reaksi geopolimerisasi dan pembentukan pori dalam matriks geopolimer (Cerna *et al.*, 2019 dan Cerna *et al.*, 2018). Setelah proses geopolimerisasi (7 hari), geopolimer berbentuk tabung selanjutnya dihancurkan untuk mendapatkan bentuk serbuk dengan cara memecahkan menjadi bongkahan dan menghaluskannya dengan grinder dengan ukuran serbuk akhir sebesar 100 *mesh* dengan pengayakan. Tabel 6 adalah variasi komposisi bahan

yang diadopsi dari penelitian Syukur dan Kusumastuti (2015) untuk jumlah H_2O_2 yang ditambahkan dengan modifikasi penambahan minyak kedelai.

Tabel 6. Variasi komposisi bahan

No.	Abu layang (gram)	NaOH (gram)	H_2O (gram)	Na Silikat (gram)	H_2O_2 (gram)	Minyak Kedelai (gram)
1.	33	4	8	10	0	0
2.	33	4	8	10	1,19	0
3.	33	4	8	10	1,19	1,19
4.	33	4	8	10	1,19	2,38
5.	33	4	8	10	0	1,19
6.	33	4	8	10	2,38	1,19

3.5.3 Analisis dan Karakterisasi Hasil Sintesis

3.5.3.1 Analisis Densitas Geopolimer Berpori

Analisis densitas dilakukan dengan menimbang massa piknometer kosong dan tutupnya (W_0), menimbang massa piknometer dan tutupnya dengan penambahan massa tertentu serbuk geopolimer (W_1), menimbang piknometer dan tutupnya dengan penambahan serbuk geopolimer dan aquades hingga penuh (W_2), serta menimbang piknometer berisi air beserta tutupnya kembali (W_3). Densitas geopolimer ditentukan dengan menghitung persamaan berikut (Syukur dan Kusumastuti, 2015):

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{W_3 - W_0}{1} \quad (14)$$

m_{H_2O} adalah massa air yang ditambahkan pada piknometer kosong.

$$m'_{H_2O} = W_2 - W_1 \quad (15)$$

m'_{H_2O} adalah massa air yang ditambahkan pada piknometer berisi serbuk geopolimer.

$$V'_{H_2O} = \frac{m'_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \quad (16)$$

V'_{H_2O} adalah volume air yang ditambahkan pada piknometer berisi serbuk geopolimer.

$$V_s = V_{H_2O} - V'_{H_2O} \quad (17)$$

V_{H_2O} adalah volume air yang ditambahkan pada piknometer kosong.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (18)$$

V_s adalah volume benda padat (serbuk geopolimer berpori)

3.5.3.2 Analisis Pori dengan SAA

Prinsip kerja dari SAA yaitu menggunakan mekanisme adsorpsi gas, umumnya yaitu Nitrogen, Helium, dan Argon. Prinsip kerja SAA didasarkan pada siklus adsorpsi dan desorpsi isotermis gas Nitrogen oleh sampel serbuk padatan pada suhu dimana gas nitrogen akan menjadi cair. Hal ini dilakukan dengan memasukkan sejumlah volume gas nitrogen yang diketahui ke dalam tabung sampel, maka sensor tekanan akan menghasilkan data tekanan proses yang bervariasi. Data volume gas yang dimasukkan dengan jumlah yang telah diketahui dan data hasil kenaikan tekanan dibuat ke dalam persamaan dalam teori BET (Rosyidet *al.*, 2012).

3.5.3.3 Analisis Fasa Mineral dengan XRD

Analisis fasa mineral dilakukan secara kualitatif terhadap geopolimer berpori yang dihasilkan untuk mengetahui perkembangan fasa karena pengaruh variasi komposisi hidrogen peroksida dan minyak kedelai. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan alat XRD. Data yang dihasilkan berupa intensitas dan sudut difraksi (2θ) dianalisis jenis mineralnya dengan cara mencocokkan sudut difraksi dengan pola difraktogram standar pada data base *Software Expert Graphic and Identify* dengan teknik *Search and Match*. Uji ini dilakukan pada geopolimer berpori berumur minimal 7 hari dengan variasi komposisi hidrogen peroksida dan minyak kedelai.

3.5.3.4 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR

Analisis dengan FTIR bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi pada geopolimer berpori yang dihasilkan. Analisis FTIR ini dapat diketahui gugus-gugus kimia dan ikatan kimia karena pengaruh variasi komposisi hidrogen peroksida dan minyak kedelai. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan alat

Precise FTIR (Fourier Transform Infrared). Teknik yang akan digunakan untuk preparasi sampel geopolimer adalah teknik KBr Pelet dengan perbandingan 2-3 mg sampel dalam 200-300 mg KBr. Data yang dihasilkan berupa intensitas serapan (%T) dan bilangan gelombang (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 geopolimerberpori berumur minimal 7 hari dengan variasi komposisi hidrogen peroksida dan minyak kedelai sebagai *porous directing agent*.

3.5.4 Aplikasi

3.5.4.1 Pembuatan Larutan Pb^{2+} 1000 ppm

Ditimbang padatan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ sebanyak 0,16065 gram dengan teliti lalu dimasukkan ke dalam *beaker glass* dan dilarutkan dengan aquades. Larutan selanjutnya dimasukkan dalam labu ukur 100 mL dan ditanda bataskan. Larutan dikocok hingga homogen.

3.5.4.2 Pembuatan Larutan Pb^{2+} 100 ppm

Larutan kerja Pb^{2+} 1000 ppm dipipet sebanyak 5 mL. Larutan selanjutnya dimasukkan dalam labu ukur 50 mL dan ditanda bataskan. Larutan dikocok hingga homogen.

3.5.4.3 Pembuatan Larutan Deret Kalibrasi Pb^{2+}

Larutan kerja Pb^{2+} 100 ppm dipipet sebanyak 0,5, 10, 15, 20, dan 25 mL ke dalam labu ukur 100 mL dan diencerkan dengan aquades sampai tanda batas. Selanjutnya masing-masing larutan dikocok hingga homogen dan diperoleh larutan standar dengan konsentrasi 5, 10, 15, 20, dan 25 ppm.

3.5.4.4 Uji Adsorpsi Ion Logam Pb^{2+} dengan Geopolimer Berpori

Geopolimer berpori sebanyak 0,08 gram dimasukkan dalam 50 mL larutan adsorbat Pb^{2+} 100 ppm dengan suhu 25 °C dan pH 5 untuk diuji kemampuan adsorpsinya. Proses pencampuran pada uji adsorpsi dibantu dengan pengadukan menggunakan *shaker* selama 120 menit dengan laju 150 rpm (Al-Zboon *et al.*,

2011). Geopolimer berpori selanjutnya dipisahkan dari larutan dengan disaring menggunakan kertas saring. Larutan hasil pemisahan selanjutnya diuji menggunakan alat AAS.

3.5.5 Analisis Serapan Ion Logam Pb^{2+} dalam Larutan dengan AAS

Pada penelitian yang dilakukan, efektivitas adsorpsi logam Pb^{2+} ditentukan berdasarkan waktu kontak adsorben dengan larutan adsorbat yaitu selama 120 menit dengan konsentrasi larutan adsorbat Pb^{2+} yang digunakan yaitu sebesar 100 ppm sebanyak 50 mL (Al-Zboon *et al.*, 2011). Selanjutnya larutan adsorbat dianalisis menggunakan AAS untuk diketahui konsentrasi ion logam berat Pb(II) sisa setelah diadsorpsi menggunakan adsorben. Analisis konsentrasi larutan adsorbat menggunakan aquades sebagai larutan blanko, konsentrasi larutan adsorbat awal, dan larutan adsorbat yang telah diadsorpsi oleh masing-masing variasi adsorben.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dan pembahasan disajikan berdasarkan tahapan penelitian yang meliputi: (i) Tahap preparasi dan karakterisasi abu layang yang terdiri dari analisis komposisi kimia abu layang dan Natrium Silikat teknis (% berat) menggunakan *X-Ray Fluorescence*, (ii) Tahap sintesis geopolimer berpori, (iii) Tahap karakterisasi yang terdiri dari analisis porositas geopolimer berpori dengan metode BET, analisis densitas geopolimer berpori, karakterisasi geopolimer berpori dengan menggunakan *X-Ray Diffraction*, *Fourier Transform Infra Red*, dan (iv) Tahap aplikasi yang terdiri dari analisis kadar logam berat Pb^{2+} dalam larutan adsorbat.

4.1 Tahap Preparasi dan Karakterisasi Bahan Awal

4.1.1 Preparasi Abu Layang dan Na Silikat

Abu layang pembakaran batubara PLTU Karangandri Cilacap dipreparasi dan dikarakterisasi kandungan kimianya dengan XRF. Abu layang sebelum dipreparasi memiliki tampilan yang kasar, sebagian menggumpal, dan berwarna abu-abu kehitaman. Abu layang yang telah dipreparasi dengan pengeringan menggunakan oven dan diayak memiliki warna abu muda dan lebih halus. Tujuan preparasi ini adalah untuk memisahkan abu layang dari zat-zat pengotor dan juga kandungan air dalam abu layang. Analisis kandungan kimia dengan XRF dilakukan untuk mengetahui kandungan utama *fly ash* (dalam % berat) yaitu terdiri dari silika, alumina dengan kandungan zat besi, kalsium dan magnesium oksida. Hasil analisis komposisi kimia abu layang (dalam % berat) dengan menggunakan XRF disajikan pada Tabel 7.

Bahan campuran lain yang digunakan yaitu natrium silikat (Na_2SiO_3) teknis. Tabel 8 merupakan hasil analisis natrium silikat teknis dengan menggunakan XRF (*X-Ray Fluorescence*). Diketahui kandungan Si dalam natrium silikat teknis sebesar 17,4%. Natrium silikat (*water glass*) dengan rasio berat SiO_2/Na_2O digunakan sebagai aktivator *fly ash* dalam proses geopolimerisasi dan untuk dekomposisi H_2O_2 (Feng *et al.*, 2015). Penambahan natrium silikat (*water glass*) meningkatkan kandungan spesies Si, kadar air dan

rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam campuran. Peningkatan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam bahan awal akan menghasilkan lebih banyak ikatan Si-O-Si (Bakri *et al.*, 2012). Rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ secara signifikan mempengaruhi adsorpsi ion logam pada permukaan geopolimer (López *et al.*, 2014).

Tabel 7. Analisis komposisi kimia abu layang (% berat)

Komponen	% berat
SiO_2	37,12
Fe_2O_3	18,54
Al_2O_3	14,84
Na_2O	8,55
CaO	8,21
K_2O	3,08
MgO	2,89
TiO_2	1,82
P_2O_5	1,39
Cl	0,63
SrO	0,26
MnO	0,14
ZrO_2	0,08
BaO	0,07
Nd_2O_3	0,06
V_2O_5	0,05
ZnO	0,05
Rb_2O	0,04
NiO	0,03
CuO	0,03
SnO_2	0,02
As_2O_3	0,01
Ga_2O_3	0,01
Y_2O_3	0,01

Tabel 8. Analisis komposisi kimia natrium silikat teknis (% berat)

Komponen	% berat
Na	12,1
Si	17,4
Cl	0,0354
K	0,0632
Ca	0,0236
Zr	0,0065
H_2O	70,3

4.1.2 Preparasi Larutan Alkali

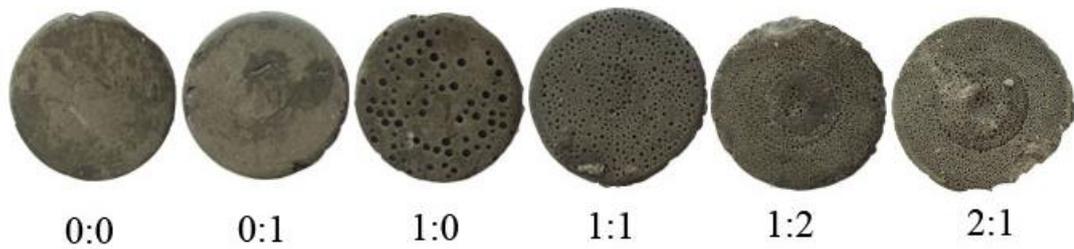
Larutan alkali atau larutan pengaktif dibuat dengan melarutkan NaOH dengan aquades terlebih dahulu dan didiamkan selama minimal 24 jam di suhu kamar yang bertujuan untuk menurunkan suhu larutan akibat adanya reaksi eksotermis yang terbentuk akibat pelarutan NaOH dalam akuades. NaOH teknis yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kemurnian 96,7% (Lampiran 4). Larutan natrium hidroksida membantu proses pelarutan mineral Si–Al dari abu layang dan natrium silikat untuk membentuk monomer silikat dan aluminat, sebagaimana tertera pada Lampiran 3.

4.2 Tahap Sintesis Geopolimer Berpori



Gambar 13. Pasta hasil pencampuran bahan

Gambar 13 menunjukkan pasta geopolimer hasil pencampuran bahan yang terdiri dari abu layang sebagai sumber utama silika dan larutan pengaktif (NaOH, akuades, dan natrium silikat) dengan komposisi bahan (gram) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6. Pasta dengan penambahan hidrogen peroksida memebentuk gelembung-gelembung udara dan meruah (mengembang). Gelembung udara ini terbentuk akibat terdekomposisinya hidrogen peroksida dalam larutan pengaktif.



Hidrogen Peroksida : Minyak Kedelai

Gambar 14. Hasil sintesis geopolimer berpori dengan berbagai komposisi penambahan H₂O₂ dan minyak kedelai

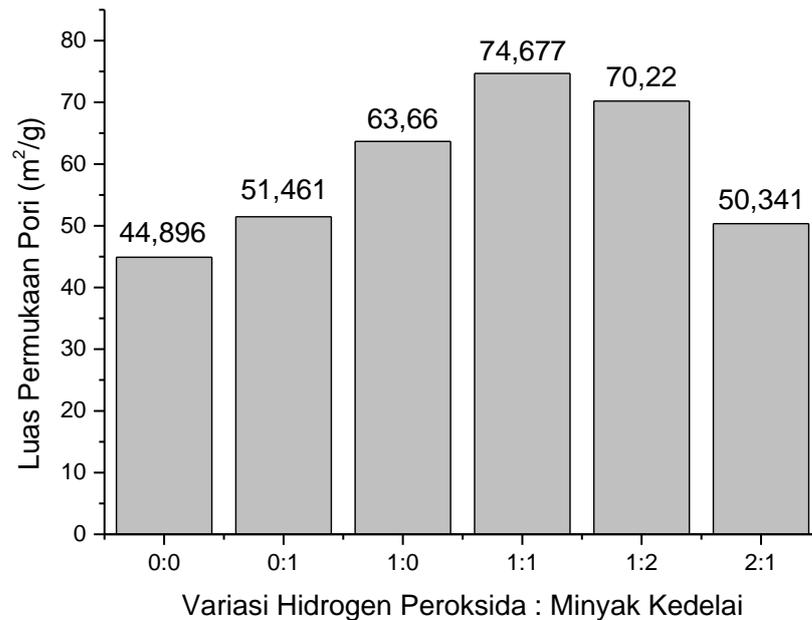
Geopolimer hasil sintesis dengan berbagai komposisi penambahan H₂O₂: minyak kedelai memiliki perbedaan secara fisik pada permukaan geopolimer yang dapat diamati tanpa bantuan alat yaitu terbentuknya pori kasar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14. Geopolimer berpori pada variasi H₂O₂: minyak kedelai 0:0 dan 0:1 memiliki permukaan yang halus dan tidak terlihat terbentuknya pori dengan ukuran besar. Variasi H₂O₂: minyak kedelai 1:0 terbentuk pori kasar pada permukaan yang cukup besar dengan ukuran tidak seragam yang disebabkan karena adanya penambahan hidrogen peroksida dan tanpa penambahan minyak kedelai, karena minyak kedelai yang berperan sebagai surfaktan mendorong pembentukan sejumlah besar pori (total dan terbuka) dengan mikrostruktur yang lebih homogen yaitu distribusi ukuran sel yang dihasilkan lebih rendah (Cilla *et al.*, 2014).

Hidrogen peroksida bereaksi pada suhu kamar dan memiliki kinetika reaksi yang cepat dalam kondisi basa tinggi. Kinetika reaksi yang cepat ini menyebabkan kesulitan dalam mengontrol ukuran pori, karena reaksi pembentukan busa (*foam*) dimulai sebelum dimasukkan ke dalam cetakan (Masi *et al.*, 2014). Variasi H₂O₂: minyak kedelai 1:1, 1:2, dan 2:1 juga terbentuk pori pada permukaan geopolimer dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan pada variasi tanpa penambahan minyak kedelai. Penambahan hidrogen peroksida dan minyak kedelai sebagai surfaktan menghasilkan mikrostruktur homogen dengan pori-pori kecil (Masi *et al.*, 2014). Geopolimer hasil sintesis pada variasi dengan penambahan minyak kedelai (0:1, 1:1; 1:2; 2:1) masih terlihat adanya minyak pada permukaan geopolimer yang merupakan sisaberlebih dari penambahan minyak kedelai yang tidak habis bereaksi seperti pada perhitungan stoikiometri pada Lampiran 5.

4.3 Tahap Karakterisasi Hasil Sintesis Geopolimer Berpori

4.3.1 Analisis Pori Geopolimer dengan Metode BET

4.3.1.1 Analisis Luas Permukaan Pori



Gambar 15. Grafik luas permukaan pori variasi geopolimer berpori dengan metode BET

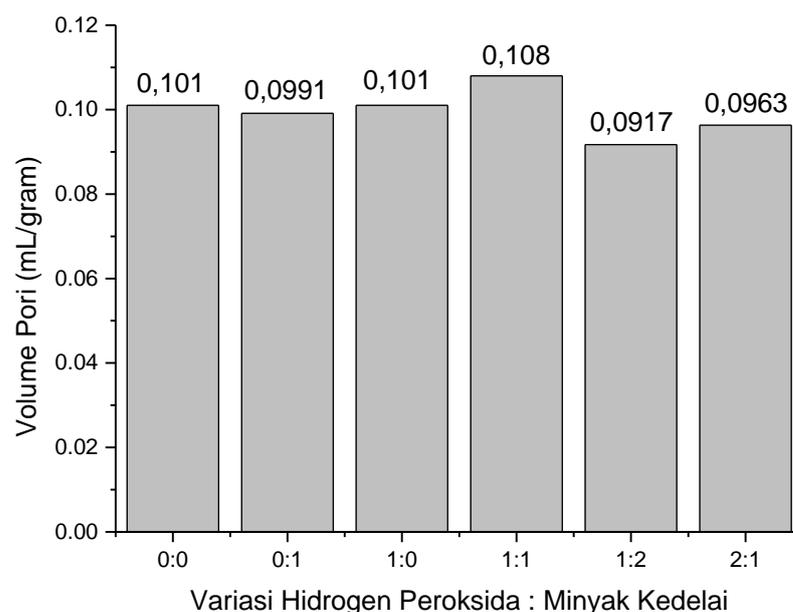
Gambar 15 menunjukkan nilai luas permukaan pori dari berbagai variasi sampel geopolimer berpori. Sampel pada variasi tanpa penambahan hidrogen peroksida dan tanpa penambahan minyak kedelai (variasi 0:0) menunjukkan nilai luas permukaan paling rendah yaitu sebesar 44,896 m²/g. Sampel pada variasi 0:1 menunjukkan kenaikan nilai luas permukaan pori yaitu sebesar 51,461 m²/g. Nilai luas permukaan selanjutnya mengalami peningkatan untuk sampel pada variasi dengan penambahan hidrogen peroksida yaitu 1:0 sebesar 63,66 m²/g.

Sampel dengan penambahan hidrogen peroksida dan minyak kedelai pada variasi 1:1 menyajikan luas permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel lain, yaitu sebesar 74,677 m²/g. Perilaku seperti ini disebabkan oleh perpaduan pori-pori yang terbentuk karena adanya penambahan hidrogen peroksida dan minyak kedelai. Busa yang terbentuk akibat peruraian hidrogen

peroksida bersifat tidak stabil sehingga membentuk mikrostruktur yang tidak homogen, sedangkan busa yang dihasilkan dari proses saponifikasi oleh minyak kedelai (yang berperan sebagai *stabilizer*) dapat menstabilkan busa yang dibentuk oleh peruraian hidrogen peroksida. Hal ini menyebabkan sampel dengan penambahan minyak kedelai dan hidrogen peroksida menunjukkan lebih banyak homogenitas dalam distribusi ukuran pori makro (Masi *et al.*, 2014).

Sampel pada variasi dengan penambahan hidrogen peroksida dan minyak kedelai pada variasi 1:2 dan 2:1 terus mengalami penurunan bila dibandingkan dengan variasi 1:1. Pada variasi 1:2 nilai luas permukaannya sebesar $70,22 \text{ m}^2/\text{g}$ dan pada variasi 2:1 sebesar $50,341 \text{ m}^2/\text{g}$. Variasi 1:2 dan 2:1 memiliki jumlah kandungan hidrogen peroksida dan minyak kedelai yang lebih tinggi (daripada variasi 1:1). Jumlah yang lebih tinggi ini memungkinkan pori yang terbentuk lebih besar tetapi sebagian besar tertutup karena adanya hidrogen peroksida yang tinggi (variasi 2:1), dan minyak kedelai yang lebih tinggi (variasi 1:2) membentuk pori yang lebih kecil dengan pori yang terbuka dan saling berhubungan (Lertcumfu *et al.*, 2019)

4.3.1.2 Analisis Volume Pori



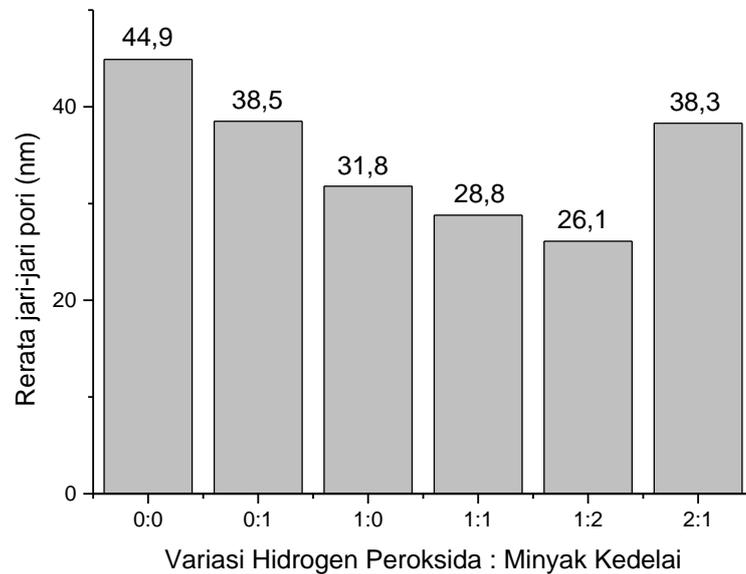
Gambar 16. Volume pori variasi geopolimer berpori dengan metode BET

Gambar 16 menunjukkan nilai volume pori pada setiap variasi geopolimer berpori. Variasi dengan penambahan hidrogen peroksida dan minyak kedelai dengan perbandingan 1:1 menunjukkan volume pori terbesar seperti pada analisis luas permukaan pori yaitu sebesar 0,108 mL/gram. Volume pori selanjutnya rata-rata menurun menjadi 0,101 mL/gram untuk sampel tanpa penambahan minyak pada variasi 1:0 dan pada variasi 0:0. Nilai volume pori pada sampel tanpa penambahan minyak kedelai ini lebih besar dibandingkan volume pori pada sampel dengan penambahan minyak kedelai.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Lertcumfu *et al.*, (2019), yang melakukan penelitian tentang pengaruh dari penambahan minyak zaitun pada geopolimer berpori, menyatakan bahwa ukuran pori rata-rata menurun dari 188 μm untuk sampel tanpa penambahan minyak zaitun menjadi 93 μm untuk sampel dengan penambahan minyak zaitun 2,5 wt%, hal ini terjadi karena minyak zaitun dapat berperan sebagai surfaktan yang dapat mengurangi aglomerasi gelembung udara yang terjadi pada sampel tanpa penambahan minyak zaitun.

Penurunan volume porijuga menurun menjadi 0,0991 mL/gram untuk sampel tanpa penambahan hidrogen peroksida pada variasi 0:1. Penurunan nilai volume pori juga terjadi pada variasi 2:1(sebesar 0,0963 mL/gram) dan untuk sampel variasi 1:2 (sebesar 0,0917 mL/gram) pada Gambar 16.Penurunan pada variasi ini (2:1 dan 1:2) disebabkan karena adanya penambahan H_2O_2 dan minyak kedelai (dengan jumlah yang lebih banyak), hal ini sejalan dengan penelitian dari Lertcumfu *et al* (2019) yang meneliti penambahan minyak zaitun, bahwa minyak zaitun mampumengurangi tegangan permukaan dari pasta berbusa(dari peruraian H_2O_2) sehinggamenekan gumpalan gelembung gas yang tidak stabil yang diproduksi oleh H_2O_2 (seperti yang diamati dalam sampel tanpa penambahan minyak zaitun)dan menghasilkan pembentukan pori-pori kecil dengan beberapa pori yang saling berhubungan. Penambahan jumlah minyak zaitun juga meningkatkan jumlah pori yang saling berhubungan dan selanjutnyamenghasilkan banyak pori yang lebih besar.

4.3.1.3 Analisis Rerata Jari-jari Pori



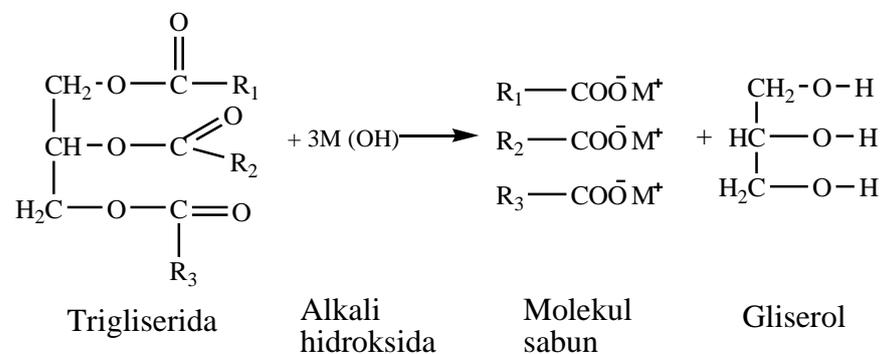
Gambar 17. Rerata jari-jari pori variasi geopolimer berpori dengan metode BET

Gambar 17 merupakan grafik rerata jari-jari pori. Sampel tanpa penambahan hidrogen peroksida dan minyak kedelai yaitu variasi 0:0 menunjukkan ukuran rerata jari-jari pori terbesar yaitu 44,9 nm, dibandingkan dengan sampel lainnya. Sampel dengan penambahan hidrogen peroksida dan tanpa minyak kedelai pada variasi 1:0 menunjukkan distribusi pori hingga 31,8 nm (Gambar 17). Penambahan lebih lanjut dari hidrogen peroksida dan minyak kedelai pada variasi 2:1 menyebabkan terbentuknya pori-pori hingga 38,3 nm (Gambar 17), dimana penambahan hidrogen peroksida sebagai *foaming agent* yang lebih banyak menyebabkan reaksi *foaming agent* dalam geopolimer semakin tidak stabil sehingga membentuk pori yang besar (Bai & Colombo, 2018; Petlitckaia & Poulesquen, 2018).

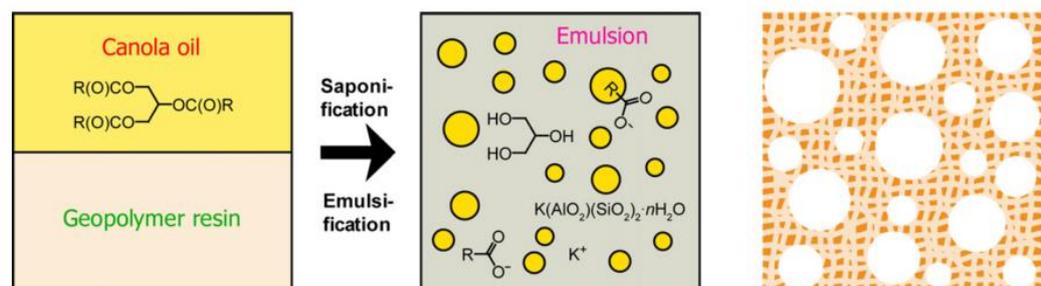
Variasi 1:1 dan 1:2 menghasilkan rerata jari-jari pori terendah diantara variasi lain, yaitu sebesar 28,8 nm dan 26,1 nm. Rerata jari-jari pori terkecil ini mungkin disebabkan karena penambahan jumlah minyak yang dapat menghasilkan pembentukan pori-pori yang saling berhubungan (Lertcumfu *et al.*, 2019) dan membentuk struktur mikro yang lebih homogen sehingga

membantu mengurangi ukuran pori dengan mempersempit distribusi ukuran pori (Cilla *et al.*, 2014).

Secara garis besar, reaksi yang terjadi antara minyak dan larutan alkali yang kuat mempengaruhi porositas dari geopolimer berpori karena reaksinya menghasilkan surfaktan karboksilat (molekul sabun) melalui reaksi saponifikasi, yang terdiri dari hidrolisis trigliserida (ditemukan dalam minyak atau lemak), ditambah gliserida, dan gliserol (molekul yang larut dalam air) (Medpelli & Seo, 2014). Mekanisme pembusa saat menggunakan minyak nabati (terutama trigliserida hidrofobik) (Medpelli & Seo, 2014) dapat digambarkan seperti pada Gambar 18 dan 19 sebagai berikut: pasta geopolimer yang bersifat basa bereaksi dengan minyak menghasilkan surfaktan karboksilat (sabun) dan gliserol secara *in situ*. Molekul $(\text{CH}_2(\text{OH})-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_2(\text{OH}))$, melalui reaksi saponifikasi. Molekul sabun yang dibentuk secara *in situ* menstabilkan gelembung gas yang dihasilkan oleh reaksi pencampuran dan dekomposisi peroksida, mendukung pembentukan sel (pori) yang terbuka dan saling berhubungan (*interconnected*) (Medpelli dan Seo, 2014; Cilla *et al.*, 2014).

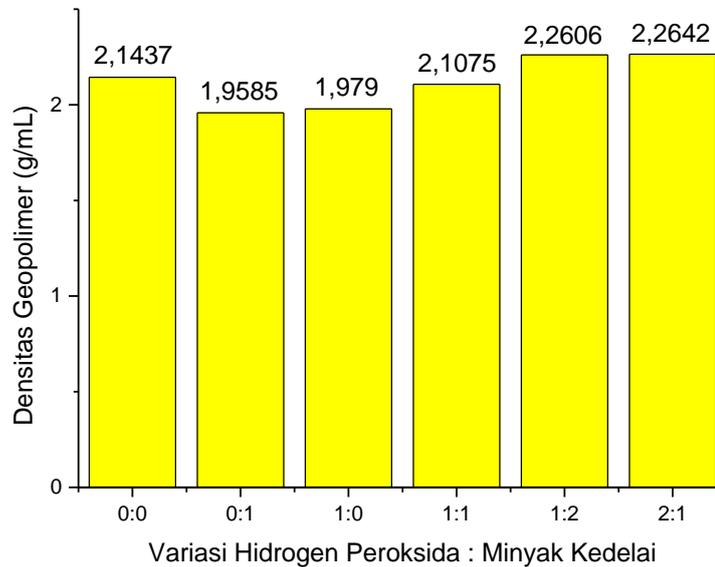


Gambar 18. Mekanisme saponifikasi minyak nabati



Gambar 19. Skema reaksi saponifikasi minyak dalam pasta geopolimer menghasilkan pori (Medpelli & Seo, 2014).

4.3.2 Analisis Densitas Serbuk Geopolimer Berpori



Gambar 20. Grafik densitas geopolimer berpori (g/mL)

Analisis densitas geopolimer berpori dilakukan dengan menggunakan piknometer air pada setiap variasi geopolimer yaitu variasi 0:0, 0:1, 1:0, 1:1, 1:2, dan 2:1. Hasil analisis densitas selanjutnya ditentukan dengan melakukan perhitungan berdasarkan persamaan (14) sampai (18) pada Lampiran 7. Gambar 20 menyajikan nilai densitas dari geopolimer berpori yang berbeda pada setiap variasi hidrogen peroksida dan variasi penambahan jumlah minyak kedelai.

Variasi 2:1 menghasilkan densitas paling besar yaitu 2,2642 g/mL dibandingkan variasi yang lain. Densitas geopolimer sedikit menurun dari 2,2642 g/mL untuk sampel variasi 2:1, menjadi 2,2606 g/mL untuk sampel variasi 1:2, 2,1437 g/mL untuk variasi 0:0, dan menjadi 2,1075 g/mL untuk sampel variasi 1:1. Sampel tanpa penambahan minyak kedelai (variasi 1:0) juga mengalami penurunan nilai densitas yaitu sebesar 1,979 g/mL, dibandingkan dengan sampel tanpa penambahan hidrogen peroksida pada variasi 0:1 yang menghasilkan densitas sebesar 1,9585 g/mL. Penurunan densitas pada geopolimer berpori dimungkinkan karena pembentukan sejumlah besar pori-pori kecil (yang menyebar luas pada keseluruhan atau sebagian besar sampel) (Lertcumfu *et al.*, 2019). Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa minyak kedelai

yang ditambahkan dapat mengurangi tegangan permukaan dan menghambat agregasi gelembung yang dihasilkan dari H_2O_2 selama proses tersebut (Tcholakova *et al.*, 2017).

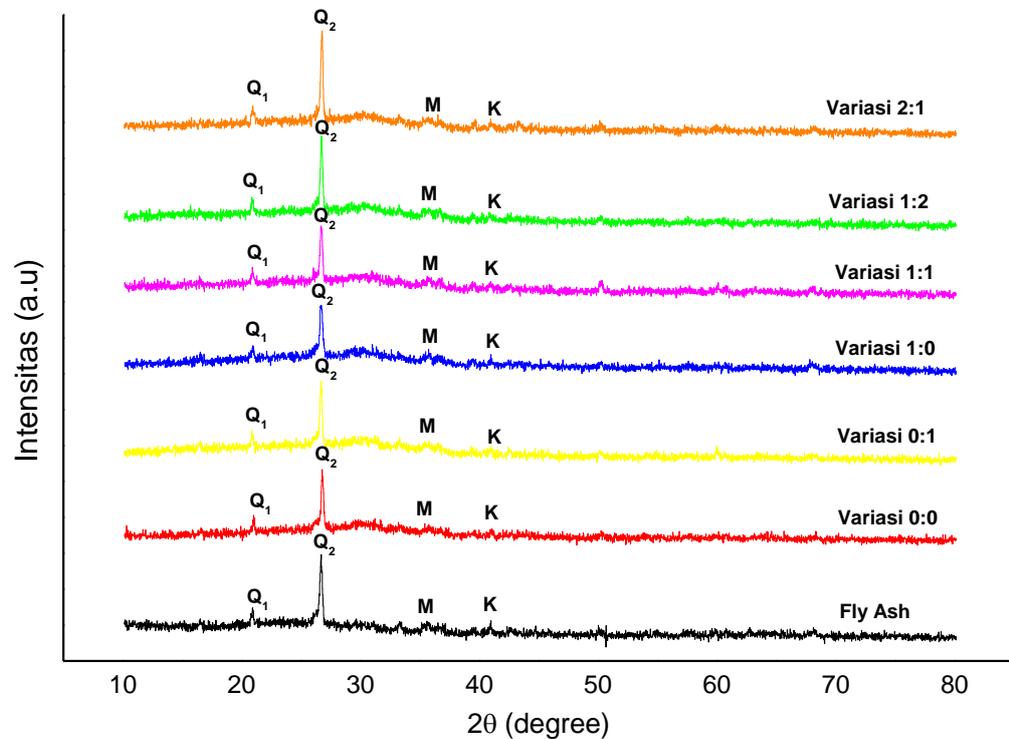
Nilai porositas suatu variasi pada geopolimer berpori yang semakin besar, seharusnya menunjukkan nilai densitas yang semakin rendah. Hal ini dikarenakan, semakin besar nilai porositas atau ukuran pori suatu variasi geopolimer berpori, maka massanya semakin ringan sehingga densitas (ρ)nya juga semakin rendah seperti pada persamaan (14). Minyak kedelai dapat menghasilkan pori-pori terbuka dengan jumlah pori-pori yang saling terhubung yang lebih tinggi, di mana porositas tinggi (atau densitas rendah) sering terjadi dalam sampel yang memiliki pori-pori yang saling berhubungan (Kearsley dan Wainwright, 2001).

4.3.3 Analisis Fasa Mineral menggunakan XRD

Karakterisasi menggunakan XRD dilakukan untuk mengetahui struktur kristal dan menganalisis fasa mineral dari abu layang sebelum dan sesudah mengalami proses geopolimerisasi. Difraktogram sinar-X abu layang diperoleh dari material hasil preparasi abu layang. Sampel di analisis dengan radiasi Cu pada 300 mA 40 kV. Puncak difraksi hasil analisis yang dihasilkan selanjutnya dicocokkan dengan metode *search and match* menggunakan *database* JCPDS sehingga didapatkan kecocokan dengan kartu PDF 05-0490, 06-0258, 29-1486 (Lampiran 9) sehingga dapat diketahui struktur kristal yang terkandung dalam abu layang dan geopolimer dari berbagai variasi. Puncak difraksi hasil analisis abu layang menunjukkan adanya kandungan utama *fly ash* (berupa mineral SiO_2) yang sebagian besar berfasa amorf dari fase vitreous utama (*hump* antara $2\theta = 20^\circ$ dan $2\theta = 30^\circ$) dan dari beberapa fase kristal kecil (kuarsa, mullit, hematit, magnetit dan beberapa CaO) (Jimenez & Palomo, 2005).

Mineral yang mendominasi pada abu layang yaitu mineral *quartz* (SiO_2) ditunjukkan oleh puncak difraksi tajam pada $2\theta = 20,847^\circ$ dan $26,857^\circ$ (PDF 05-0490), mineral lain berupa *mullite* ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ditunjukkan oleh puncak pada $2\theta = 35,507^\circ$ (PDF 06-0258), dan mineral *kaolinite* ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$)

ditunjukkan oleh puncak pada $2\theta = 40,847^\circ$ (PDF 29-1486). Analisis fase mineral pada abu layang dan geopolimer ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 21. Difraktogram abu layang dan geopolimer berpori dalam berbagai variasi

Geopolimer dengan berbagai variasi komposisi hidrogen peroksida : minyak kedelai memiliki intensitas yang berbeda-beda pada setiap puncak difraksi mineral *quartz* (SiO_2), *mullite* ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), dan mineral *kaolinite* ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) seperti yang ditunjukkan dalam tabel pada Lampiran 10. Intensitas yang rendah dan lebar membentuk gundukan (*hump*) yang terbentuk antara $2\theta = 20^\circ$ dan $2\theta = 40^\circ$ menunjukkan karakteristik gel amorf, termasuk gel geopolimer dan *silicate hydrate* (gel C-S-H) (Guo *et al.*, 2010). Fase C-S-H adalah produk hidrasi utama yang terbentuk selama produksi geopolimer (Pimraksa *et al.*, 2009), oleh karena itu pembentukan fase C-S-H dan kerangka kerja alumino-silikat dalam percobaan ini menunjukkan bahwa reaksi hidrasi dan geopolimerisasi terjadi secara bersamaan (Guo *et al.*, 2010).

Mineral *quartz*₁ (Gambar 21) pada abu layang memiliki intensitas puncak difraksi paling tinggi dibandingkan mineral *quartz*₁ pada geopolimer seperti yang

ditunjukkan dalam tabel intensitas pada Lampiran 10. Intensitas tinggi (yang dimiliki abu layang sebagai bahan awal pembuatan geopolimer) secara umum akan mengalami penurunan setelah terjadi proses geopolimerisasi. Proses ini menandakan reaksi geopolimer telah terbentuk, yang berarti fasa amorf yang terkandung lebih tinggi, atau fasa kristalin lebih rendah bila dibandingkan dengan bahan awal abu layang.

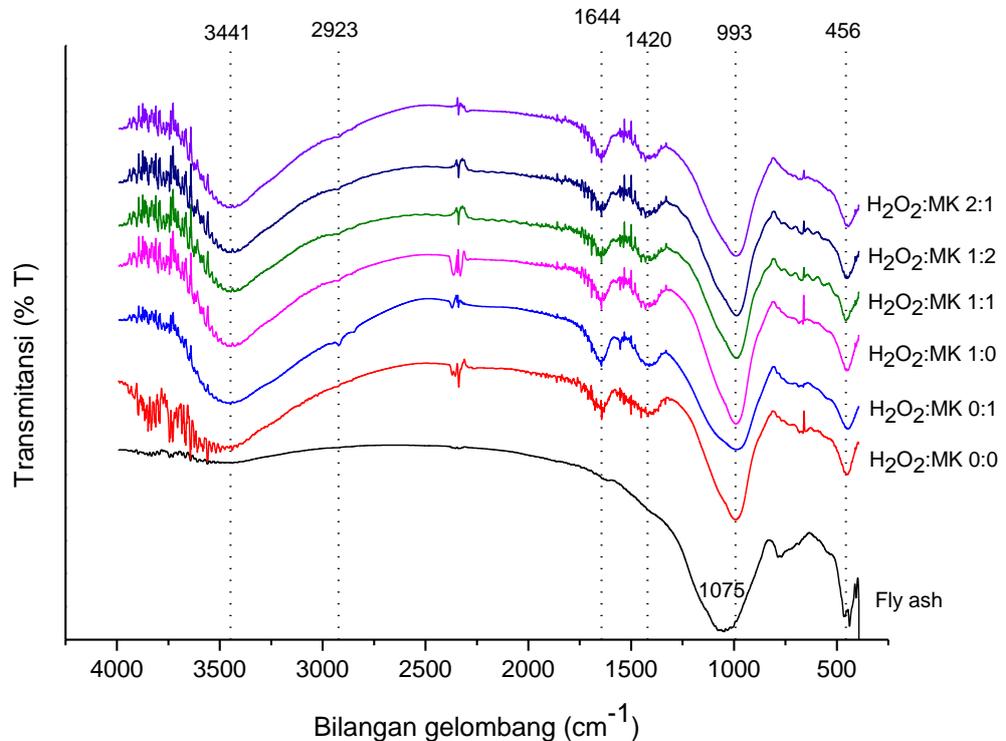
Mineral *quartz*₂ (SiO₂) pada difraktogram geopolimer dengan variasi hidrogen peroksida : minyak kedelai (1:2 dan 2:1) memiliki intensitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan puncak mineral *quartz*₂(SiO₂) variasi geopolimer yang lain seperti yang ditunjukkan pada Lampiran 10. Intensitas yang lebih tinggi ini disebabkan karena sedikitnya silikat yang dapat membentuk rantai geopolimer dikarenakan adanya material sisa reaksi yaitu silika (SiO₂) dalam komposisi yang lebih banyak sehingga mengganggu terbentuknya rantai geopolimer.

Penambahan komposisi H₂O₂ pada geopolimer menyebabkan bertambahnya fasa kristal mineral karena adanya sisa reaktan yang tidak bereaksi. Sisa reaktan (H₂O₂) ini terjadi karena sebagian H₂O₂ bereaksi dengan basa. Puncak intensitas yang lebih tinggi menunjukkan kristalinitas yang tinggi dan fasa amorf yang rendah. Puncak-puncak tajam ini menunjukkan fasa kristalin yang tidak reaktif, sedangkan fasa amorf ditunjukkan dengan adanya *hump* atau gundukan yang lebar (Kusumastuti & Widiarti, 2015). Variasi geopolimer lain dengan komposisi hidrogen peroksida dan minyak kedelai yang lebih rendah (0:0, 0:1, 1:0, dan 1:1) memiliki intensitas mineral *quartz* yang lebih rendah (Lampiran 10) disebabkan karena banyaknya silikat yang telah membentuk rantai geopolimer.

4.3.4 Hasil Analisis Gugus Fungsi menggunakan FTIR

Analisis menggunakan spektroskopi FTIR bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi dan ikatan pada abu layang dan geopolimer. Fitur utama spektra FTIR geopolimer ditandai dengan adanya pita serapan yang terletak pada bilangan gelombang 1200-950 cm⁻¹ yang menunjukkan vibrasi ulur asimetri Si –

O – Si atau Si – O – Al. Vibrasi ini juga terbentuk pada fitur FTIR abu layang pada bilangan gelombang 1075 cm^{-1} (Alehyen *et al.*, 2017).



Gambar 22. Spektra FTIR geopolimer berpori

Pita yang tidak ada dalam *fly ash*, yaitu pita pada 1644 cm^{-1} menandai getaran molekul air yang terikat pada kerangka anorganik. Pita-pita ini menunjukkan adanya kelompok H – O – H yang terikat dalam semen geopolimer (Timakul *et al.*, 2016). Bilangan gelombang lain sekitar 1420 cm^{-1} muncul dalam sampel geopolimer, tetapi tidak ada dalam *fly ash*. Bilangan gelombang ini merupakan karakteristik dari mode peregangan ikatan O – C – O asimetris, yang menunjukkan adanya karbonat yang berasal dari natrium karbonat sebagai hasil reaksi antara natrium yang berlebih dengan karbon dioksida pada atmosfer (Azimi *et al.*, 2020).

Dalam bahan geopolimer, pita lebar pada 3441 cm^{-1} (pada Gambar 20) menunjukkan adanya tahap disolusi setelah larutan alkali bereaksi dengan *fly ash*. Pada tahap ini, konsentrasi OH^- tinggi pada media alkali mendukung pemecahan ikatan Si – O – Si, Si – O – Al, dan Al – O – Al yang hadir dalam fase vitreous abu, melepaskan ion silikon dan aluminium ke dalam larutan,

dimana ion silikon dan alumunium ini selanjutnya membentuk spesies dengan jumlah gugus Si – OH dan Al –OH yang tinggi(Fernandez-Jimenez *et al.*, 2006). Pita ini dikaitkan dengan adanya frekuensi peregangan O –H yang terikat pada struktur anorganik, dan juga Si – O – H yang merupakan ikatan hidrogen antara air yang diserap dan gugus silanol (Alehyen *et al.*, 2017). Hasil interpretasi spektra FTIR dari abu layang dan geopolimer berpori ditunjukkan pada Tabel 9 dan 10.

Tabel 9. Hasil interpretasi spektra FTIR pada abu layang

No.	$1/\lambda$	$1/\lambda$ Referensi	Interpretasi dan Referensi
1.	1075	1075	Vibrasi ulur asimetris T–O–Si; T = Si atau Al (Alehyen <i>et al.</i> , 2017)
2.	456	420–500	Vibrasi tekuk Si–O– dan Al–O–(Alehyen <i>et al.</i> , 2017)

Tabel 10. Hasil interpretasi spektra FTIR pada geopolimer berpori

No.	$1/\lambda$	$1/\lambda$ Referensi	Interpretasi dan Referensi
1.	3441	3463–3422	Vibrasi ulur/ <i>stretching</i> O–H dan Si–O–H pada geopolimer (Alehyen <i>et al.</i> , 2017)
2.	2923	2868–2969	Vibrasi ulur C–H (<i>organic contaminants</i>) (Saikia <i>et al.</i> ,2008)
3.	1644	1644–1637	Vibrasi tekuk H–O–H(Timakul <i>et al.</i> , 2016)
4.	1420	1435–1415	Vibrasi ulur/ <i>stretching</i> O–C–O (Timakul <i>et al.</i> , 2016)
5.	993	1200–950	Vibrasi ulur asimetris T–O–Si; T = Si atau Al (Timakul <i>et al.</i> , 2016)
6.	456	420–500	Vibrasi tekuk Si–O– atau Al–O–(Alehyen <i>et al.</i> , 2017)

Spektra FTIR menunjukkan bahwa setelah langkah ketiga dari proses umum aktivasi (kondensasi-kristalisasi), reorganisasi struktur terjadi dan menghasilkan pita peregangan C–H pada bilangan gelombang 2923 cm^{-1} karena adanya penambahan minyak kedelai. Pada variasi 0:1 terbentuk pita dengan intensitas yang lebih tinggi dibandingkan pita 2923 cm^{-1} pada variasi lain yaitu 1:1, 1:2, dan 2:1. Bilangan gelombang ini menginterpretasikan adanya senyawa organik yang ditambahkan (minyak kedelai) dalam geopolimer. Variasi lain

tanpa penambahan minyak kedelai yaitu (0:0, 1:1) dan abu layang tidak terbentuk pita vibrasi pada 2923 cm^{-1} .

Puncak-puncak pada daerah sekitar 3400 cm^{-1} dan 1600 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi ulur (*stretching*) –O–H dan vibrasi tekuk (*bending*) H–O–H yang berasal dari molekul-molekul air. Pita vibrasi ini menunjukkan bahwa molekul-molekul air terdapat pada permukaan maupun terjebak dalam rongga-rongga kerangka geopolimer. Hal ini membuktikan bahwa peruraian H_2O_2 menjadi H_2O dan O_2 dari penambahan H_2O_2 menyebabkan bertambahnya molekul air seperti pada reaksi dekomposisi (Kusumastuti & Widiarti, 2015):



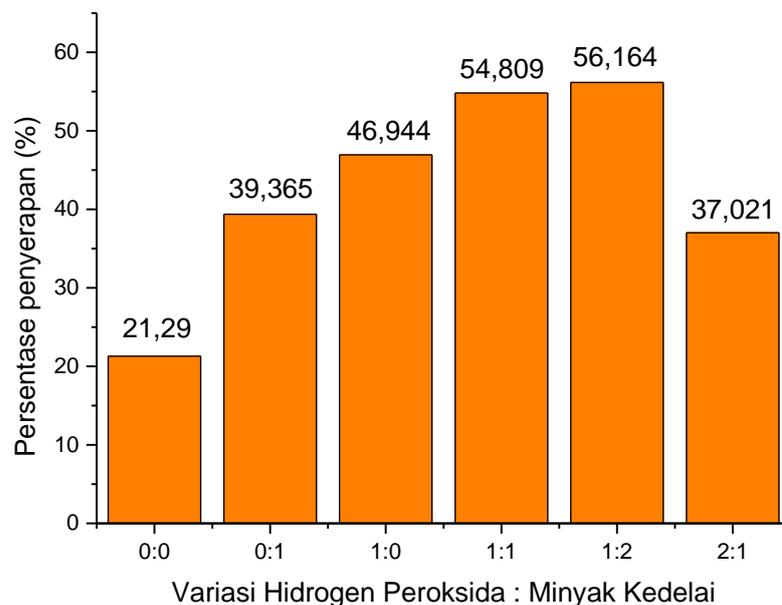
4.4 Tahap Aplikasi Geopolimer sebagai Adsorben Ion Logam Berat Pb^{2+}

Tabel 11. Hasil analisis kadar ion logam berat Pb^{2+} dalam larutan adsorbat

No.	Sampel Larutan	Konsentrasi (C) Terhitung (mg/L)	Rata-rata C (mg/L)
1.	0:0	87,35 mg/L	79,56 mg/L
		79,21 mg/L	
		72,12 mg/L	
2.	0:1	60,00 mg/L	61,29 mg/L
		62,94 mg/L	
		60,92 mg/L	
3.	1:0	68,45 mg/L	53,63 mg/L
		19,03 mg/L	
		73,41 mg/L	
4.	1:1	29,09 mg/L	45,68 mg/L
		58,09 mg/L	
		49,85 mg/L	
5.	1:2	37,82 mg/L	44,31 mg/L
		69,94 mg/L	
		25,17 mg/L	
6.	2:1	54,32 mg/L	63,66 mg/L
		65,77 mg/L	
		70,90 mg/L	

Ion logam berat Pb^{2+} diadsorpsi dengan menggunakan adsorben berupa serbuk geopolimer berpori. Parameter kontrol (tidak divariasi) yang digunakan dalam proses adsorpsi ion logam berat Pb^{2+} yaitu jumlah atau massa dosis adsorben

(serbuk geopolimer berpori variasi 0:0, 0:1, 1:0, 1:1, 1:2, dan 2:1) sebesar 0,08 gram, konsentrasi awal larutan adsorbat sebesar 100 ppm sebanyak 50 mL, pH larutan diatur ke pH 5, dengan suhu ruang yaitu 25 °C, dan proses adsorpsi yang dibantu pengadukan 150 rpm menggunakan *shaking incubator* selama 120 menit (Al-Zboon *et al.*, 2011). Fungsi pengadukan menggunakan *shaking incubator* pada proses adsorpsi adalah untuk membantu efektifitas penyerapan ion logam Pb(II) pada permukaan adsorben. Larutan adsorbat selanjutnya dianalisis dengan menggunakan *Atomic Adsorption Spectrometry* (AAS). Larutan adsorbat dengan konsentrasi 101,081 mg/L dibuat sebanyak tiga kali untuk masing-masing variasi geopolimer berpori, hal ini bertujuan untuk meningkatkan validitas persentase penyerapan ion logam Pb(II) dalam larutan adsorbat. Hasil analisis kadar logam berat Pb²⁺ dalam larutan adsorbat ditunjukkan pada Tabel 11.



Gambar 23. Grafik persentase penyerapan (%) ion logam berat Pb²⁺ oleh geopolimer dengan variasi komposisi

Data hasil analisis kadar logam berat Pb²⁺ dalam larutan adsorbat pada Tabel 12. menunjukkan konsentrasi (C) terhitung ion logam Pb²⁺ dalam mg/L. Konsentrasi (C) terhitung yang diperoleh selanjutnya dihitung rata-ratanya dan diperoleh konsentrasi akhir ion logam Pb²⁺. Nilai konsentrasi akhir ion logam Pb²⁺ yang

diperoleh selanjutnya dapat digunakan untuk menghitung persentase penyerapan masing-masing variasi adsorben (Lampiran 8). Semakin rendah konsentrasi sisa adsorpsi terhitung ion logam Pb^{2+} dalam larutan, semakin besar persentasenya. Geopolimer berpori variasi 0:0 memiliki efisiensi penyerapan paling rendah, yaitu sebesar 21,29 % dengan konsentrasi terukur ion logam Pb^{2+} sebesar 79,56 mg/L. Konsentrasi ini menunjukkan bahwa hanya sedikit ion logam Pb^{2+} dalam larutan adsorbat yang terserap pada permukaan adsorben, sehingga persentase penyerapan dari adsorben serbuk geopolimer variasi 0:0 memiliki persentase penyerapan paling rendah.

Persentase penyerapan selanjutnya mengalami peningkatan pada geopolimer berpori variasi 0:1 dengan persentase penyerapan sebesar 39,36 % dengan konsentrasi terukur ion logam Pb^{2+} sebesar 61,29 mg/L, variasi 1:0 dengan persentase penyerapan sebesar 46,94 % dengan konsentrasi terukur ion logam Pb^{2+} sebesar 53,63 mg/L, variasi 1:1 dengan persentase penyerapan sebesar 54,81 % dengan konsentrasi terukur ion logam Pb^{2+} sebesar 45,68 mg/L, dan geopolimer berpori variasi 1:2 dengan persentase penyerapan sebesar 56,16 % dengan konsentrasi terukur ion logam Pb^{2+} sebesar 44,31 mg/L. Persentase penyerapan selanjutnya menunjukkan penurunan nilai pada geopolimer berpori variasi 2:1. Penurunan nilai persentase penyerapan ini karena pada serbuk geopolimer variasi 2:1 memiliki persentase penyerapan sebesar 37,02 % dengan konsentrasi terukur ion logam Pb^{2+} sebesar 63,66 mg/L.

Berdasarkan data hasil analisis kadar logam berat Pb^{2+} dalam larutan adsorbat pada Tabel 11, persentase penyerapan paling tinggi yaitu sebesar 56,164 % pada variasi adsorben 1:2 dengan konsentrasi akhir ion logam Pb^{2+} sebesar 44,31 mg/L. Variasi adsorben 1:1 juga memiliki persentase penyerapan yang tinggi, yaitu sebesar 54,81 % dengan konsentrasi akhir ion logam Pb^{2+} sebesar 45,68 mg/L. Berdasarkan nilai luas permukaan pori dan volume pori, variasi 1:1 memperoleh nilai paling optimum diantara variasi lain dengan luas permukaan pori sebesar 74,66 m^2/g dan volume pori sebesar 0,108 mL/gram. Variasi ini dipengaruhi oleh penambahan H_2O_2 dan minyak kedelai dengan perbandingan yang sama, meskipun H_2O_2 berguna dalam pembentukan gelembung/busa tetapi reaksi yang terbentuk tidak stabil. Minyak kedelai sebagai surfaktan dapat mengontrol ukuran dan distribusi pori yang

ditimbulkan dari terbentuknya busa yang tidak stabil dan tidak homogen oleh H_2O_2 (Bai & Colombo, 2018; Cilla & Colombo, 2014; Petlitckaia & Poulesquen, 2018).

Variasi 1:2 memiliki nilai rerata jari-jari pori paling kecil dibandingkan dengan variasi lain yaitu sebesar 26,1 Å. Pori-pori kecil ini dapat menggumpal bersama lagi untuk menjadi pori-pori yang lebih besar, seiring dengan jumlah minyak yang lebih tinggi dapat menghasilkan pori-pori terbuka dengan jumlah pori-pori yang saling terhubung (*interconnecting*) yang lebih tinggi, hal ini mungkin karena transformasi sejumlah besar pori-pori kecil yang menyebar luas keseluruhan (atau sebagian besar) sampel. (Lertcumfu *et al.*, 2019). Transformasi pori-pori ini yang mungkin melatarbelakangi geopolimer berpori variasi 1:2 dapat menghasilkan persentase adsorpsi paling tinggi yaitu sebesar 56,164 % dengan konsentrasi terukur ion logam berat Pb^{2+} paling rendah yaitu sebesar 44,31 mg/L dibandingkan variasi 1:1. Menurut Lertcumfu *et al.* (2019) yang meneliti tentang penambahan surfaktan minyak zaitun, menjelaskan bahwa peningkatan jumlah minyak zaitun yang ditambahkan mampu meningkatkan porositas total geopolimer berpori.

BAB V

PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Penambahan H₂O₂ dan minyak kedelai sebagai *porous directing agent* dalam sintesis geopolimer berpori berpengaruh terhadap karakteristik pori yang dihasilkan. Karakteristik tersebut meliputi volume pori, ukuran pori, dan densitas, yang menghasilkan nilai yang berbeda-beda pada setiap variasi komposisi H₂O₂ dan minyak kedelai yang ditambahkan. Geopolimer dengan penambahan H₂O₂ dan minyak kedelai (pada variasi 1:1) dapat membentuk luas permukaan pori dan volume pori terbesar dibandingkan geopolimer dengan perbandingan variasi lain. Geopolimer dengan penambahan jumlah minyak kedelai yang lebih tinggi (pada variasi 1:2) menghasilkan volume pori dan rerata jari-jari pori paling kecil. Semakin banyak jumlah minyak kedelai yang ditambahkan, maka volume pori dan rerata jari-jari pori yang terbentuk semakin kecil.
2. Penambahan H₂O₂ dan minyak kedelai sebagai *porous directing agent* dengan berbagai variasi komposisi dalam sintesis geopolimer berpori berpengaruh terhadap persentase penyerapan ion logam Pb²⁺ dalam larutan. Masing-masing variasi geopolimer berpori menghasilkan persentase penyerapan yang berbeda-beda. Geopolimer dengan penambahan minyak kedelai yang lebih tinggi (pada variasi 1:2) menghasilkan persentase penyerapan ion logam Pb²⁺ tertinggi dibandingkan variasi lain. Persentase ini berbanding terbalik dengan hasil adsorpsi geopolimer dengan penambahan H₂O₂ yang semakin tinggi (pada variasi 2:1) justru menghasilkan persentase penyerapan yang semakin rendah.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dan pembahasan dari data karakterisasi yang ada, sebaiknya:

1. Lebih memperhatikan metode penelitian yang perlu dilakukan seperti melakukan pembilasan geopolimer dengan air panas untuk menghilangkan sisa minyak yang

ditambahkan pada pasta geopolimer. Sisa minyak yang masih tersisa pada geopolimer ditakutkan dapat mengganggu proses adsorpsi.

2. Penelitian selanjutnya agar dapat meneliti variasi komposisi H_2O_2 dan minyak kedelai 1:1 sampai 1:2 dengan rentang yang lebih kecil lagi karena perbedaan karakteristik pori dan persentase penyerapan yang dihasilkan antara variasi tersebut sangat kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363.
- Al-Harashsheh, M. S., Al Zboon, K., Al-Makhadmeh, L., & Hararah, M., Mahasneh, M. (2015). Fly ash based geopolymer for heavy metal removal: A case study on copper removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1–9.
- Al-Zboon, K., Al-Harashsheh, M. S., Hani, F. B. (2011). Fly ash-based geopolymer for Pb removal from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 188(1–3), 414–421.
- Al-zeer, M. I .M., Mackenzie, K. J. D. (2019). Fly Ash-Based Geopolymers as Sustainable Bifunctional Heterogeneous Catalysts and Their Reactivity in Friedel-Crafts Acylation Reactions. *Catalysts*, 9(371), 1–14.
- Alehyen, S., Achouri, M. E. L., & Taibi, M. (2017). Characterization , microstructure and properties of fly ash-based geopolymer. *Materials and Environmental Science*, 8(5), 1783–1796.
- Asbridge, D. D. (1995). *Soybeans vs . Other Vegetable Oils as a Source of Edible Oil Products. Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization.*
- Asip, F., Mardhiah, R., Husna. (2008). Uji Efektifitas Cangkang Telur dalam Mengadsorpsi Ion Fe dengan Proses Batch. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(2), 22–26.
- Ayari, F., Srasra, E., & Trabelsi-ayadi, M. (2007). Retention of lead from an aqueous solution by use of bentonite as adsorbent for reducing leaching from industrial effluents. *Desalination*, 206, 270–278.
- Azimi, E. A., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P., Salleh, M. A. A. M., Sandu, A. V., Chairapa, J., Aziz, I. H. (2020). Strength Development and Elemental Distribution of. *Materials*, 13, 1–16.
- Bai, C., & Colombo, P. (2018). Processing, Properties and Applications of Highly Porous Geopolymers: A Review. *Ceramics International*, 1–16.
- Bai, C., Ni, T., & Wang, Q. (2017). Porosity, Mechanical and Insulating Properties of Geopolymer Foams using Vegetable Oil as the Stabilizing Agent. *Journal of the European Ceramic Society*.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of Geopolymer Materials to Acid Attack. *Cement and Concrete Research*, 35, 658–670.
- Bakri, A. M. M. Al, Kamarudin, H., Nizar, I. K., Bnhussain, M., Zarina, Y., & Rafiza, A. R. (2012). Correlation between Na 2 SiO 3 / NaOH Ratio and Fly Ash / Alkaline Activator Ratio to the Strength of Geopolymer, 342, 189–193.
- Barbosa, T. R., Foletto, E. L., Dotto, G. L., & Jahn, S. L. (2018). Preparation of

mesoporous geopolymer using metakaolin and rice husk ash as synthesis precursors and its use as potential adsorbent to remove organic dye from aqueous solutions. *Ceramics International*, 44(1), 416–423.

- Bart, J. C. J., Palmeri, N., & Cavallaro, S. (2010). Emerging new energy crops for biodiesel production 6. *Biodiesel Science and Technology*, 226–284.
- Bravo, P. I., Malena, R. A., Shimizu, E., Yu, D. E., & Promentilla, M. A. (2019). Synthesis of Geopolymer Spheres with Photocatalytic Activity. *MATEC Web of Conferences*, 268, 1–5.
- Brunauer, S., Emmet, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of Gases in Multimolecular Layers, 309–320.
- Cantarel, V., Nouaille, F., Rooses, A., Lambertin, D., Poulesquen, A., & Frizon, F. (2015). Solidification/Stabilisation of liquid oil waste in metakaolin-based geopolymer. *Journal Of Nuclear Materials*, 1–19.
- Cerna, K. Dela, Janairo, J. I., & Promentilla, M. A. (2019). Development of Nanosilver-Coated Geopolymer Beads (AgGP) from Fly Ash and Baluko Shells for Antimicrobial Applications. *MATEC Web of Conferences*, 268, 1–5.
- Cerna, K. S. Dela, Janairo, J. I. B., & Promentilla, M. A. B. (2018). Utilization of Waste Coal Fly Ash and Baluko Shells as Precursors for Geopolymer Beads. *Green Technologies*, 1–4.
- Chatterjee, A. K. (2001). X-Ray Diffraction. *Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*, (8), 275–332.
- Cheremisinoff. (1996). Atomic Absorption Spectroscopy. *Elemental and Structural Characterization Test*, 4, 43–81.
- Cilla, M. S., Morelli, M. R., Colombo, P. (2014). Open Cell Geopolymer Foams by A Novel Saponification/ Peroxide/ Gelcasting Combined Route. *Journal of the European Ceramic Society*, 34, 3133–3137.
- Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *Alkaline Cements and Concretes*, 1–19.
- Ducman, V., & Korat, L. (2016). Characterization of Geopolymer Fly-Ash based Foams Obtained with the Addition of Al Powder or H₂O₂ as Foaming Agents. *Materials Characterization*, 1–29.
- Duxson, A. FernándeZ-Jimeénez, J. L. Provis, G. C. Lukey A. Palomo, J. S. J. van D. (2007). Geopolymer Technology: the Current State of the Art. *Journal Material of Science*, (4), 2917–2933.
- Endrinaldi. (2009). Logam-logam Berat Pencemar Lingkungan dan Efek Terhadap Manusia. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4, 42–46.
- Feng, J., Zhang, R., Gong, L., Li, Y., Cao, W., & Cheng, X. (2015). Development of

- Porous Fly Ash-based Geopolymer with Low Thermal Conductivity. *Materials and Design*, 65, 529–533.
- Fernandez-Jimenez. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder : Effect of the activator. *Cement and Concrete Research* 35, 35, 1984–1992.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91, 111–119.
- Fernández, B., Lobo, L., & Pereiro, R. (2018). *Atomic Absorption Spectrometry : Fundamentals, Instrumentation and Capabilities. Encyclopedia of Analytical Science 3rd edition* (3rd ed.). Elsevier Inc.
- Galiano, Y., Leiva C., Arenas C., Fernández-Pereira, C. (2018). Fly Ash based Geopolymeric Foams using Silica Fume as Pore Generation Agent. Physical, Mechanical and Acoustic Properties. *Journal of Non-Crystalline Solids*, (July), 1–9.
- Gupta, & Bhattacharyya. (2011). Kinetics of adsorption of metal ions on inorganic materials : A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 162(1–2), 39–58.
- Hajimohammadi, A., Provis, J. L., & Deventer, J. S. J. Van. (2010). Effect of Alumina Release Rate on the Mechanism of Geopolymer Gel Formation. *Chemistry of Material*, (3), 5199–5208.
- Hisan, A. K., Kusumastuti, E., & Mahatmanti, F. W. (2017). Pemanfaatan Serat Daun Nanas dalam Sintesis Geopolimer Berbasis Abu Layang Batubara. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 6(2), 97–103.
- Hlaváček, V. ˇSmilauer, F. ˇ Skvára, L. Kopecký, R. ˇ S. (2014). Inorganic Foams Made from Alkali-Activated Fly Ash: Mechanical, Chemical and Physical Properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 1–7.
- Irani, K., Fansuri, H., dan Atmaja, L. 2009. Modifikasi Permukaan Abu Layang Menggunakan NaOH dan Aplikasinya untuk Geopolimer: Sifat Fisik dan Mekanik. Tesis Magister, Jurusan Kimia, FMIPA ITS, Surabaya.
- Jaarsveld, J. G. S. Van, Deventer, J. S. J. Van, & Lukey, G. C. (2003). The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-based Geopolymers. *Materials Letters*, 57, 1272–1280.
- Khan, S. A., Khan, S. B., Khan, L. U., & Farooq, A. (2019). Fourier Transform Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Application in Functional Groups and Nanomaterials Characterization Fourier Transform Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Application in Functional Groups and Nanomaterials Characterization, (February).

- Kusumastuti, E., & Widiarti, N. (2015). Sintesis Geopolimer Berbusa Berbahan Dasar Abu Layang Batubara Dengan Hidrogen Peroksida Sebagai Foaming Agent. *Sains Dan Teknologi*, 13, 17–28.
- Lertcumfu, N., Kaewapai, K., Jaita, P., Tunkasiri, T., Sirisoonthorn, S., & Rujijanagul, G. (2019). Effects of olive oil on physical and mechanical properties of ceramic waste-based geopolymer foam. *Reinforced Plastics and Composites*, 1–8.
- Lloyd, N. A., & Rangan, B. V. (2010). Geopolymer Concrete with Fly Ash. *Main Proceeding*, 7, 1–12.
- López, F. J., Sugita, S., Tagaya, M., & Kobayashi, T. (2014). Metakaolin-Based Geopolymers for Targeted Adsorbents to Heavy Metal Ion Separation, (July), 16–27.
- Luukkonen, T., Heponiemi, A., Runtti, H., Pesonen, J., Yliniemi, J., Lassi, U. (2019). Application of Alkali-Activated Materials for Water and Wastewater Treatment : a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 0, 1–27.
- Masi, G., Rickard, W. D. A., Vickers, L., Chiara, M., & Riessen, A. Van. (2014). A comparison between different foaming methods for the synthesis of light weight geopolymers. *Ceramics International*, 40, 13891–13902.
- Medpelli, D., Jung-Min Seo, D.-K. S. (2014). Geopolymer with Hierarchically Meso-/Macroporous Structures from Reactive Emulsion Templating. *American Ceramic Society*, 73, 70–73.
- Muchjidin. 2006. Pengendalian Mutu dalam Industri Batu bara. Bandung: ITB Press.
- Niaounakis, M. (2015). *Foaming and Foamed Products*.
- Novais, R. M., Buruberri, L. H., Seabra, M. P., Bajare, D., & Labrincha, J. A. (2016). Novel Porous Fly Ash-Containing Geopolymers for pH Buffering Applications. *Journal of Cleaner Production*, 1–36.
- Nurchi, V. M. dan Villaescusa, I. (2011). The Chemistry Behind the Use of Agricultural Biomass as Sorbent for Toxic Metal Ions: pH Influence, Binding Groups, and Complexation Equilibria. *Biomass*, 410–425.
- Odoom, W., & Edusei, V. O. (2015). Evaluation of Saponification value , Iodine value and Insoluble impurities in Coconut Oils from Jomoro District in the Western Region of Ghana, 3(5), 494–499.
- Palomo, A., National, S., & Grutzeck, M. W. (1999). Alkali-Activated Fly Ashes - A Cement for the Future Alkali-activated fly ashes A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29, 1321–1329.
- Perkins, E. G. (1995). *Composition of Soybeans and Soybean Products. Practical*

Handbook of Soybean Processing and Utilization (Vol. I). AOCS Press.

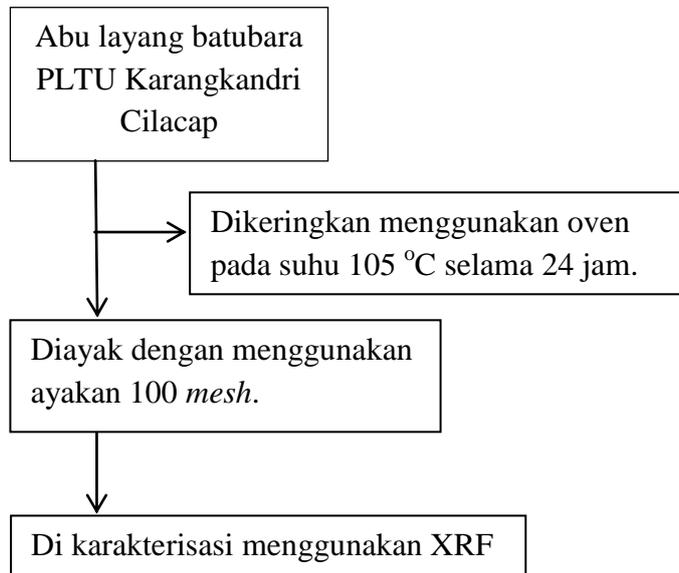
- Petlitchkaia, S., & Poulesquen, A. (2018). Design of lightweight metakaolin based geopolymer foamed with hydrogen peroxide. *Ceramics International*, 1–30.
- Pimraksa, K., Hanjitsuwan, S., & Chindaprasirt, P. (2009). Synthesis of belite cement from lignite fly ash. *Ceramics International*, 35, 2415–2425.
- Provis, J. L. (2017). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 1–9.
- Provis, J. L., & Deventer, J. S. J. Van. (2007). Geopolymerisation kinetics . 2 . Reaction kinetic modelling. *Chemical Engineering Science*, 62, 2318–2329.
- Rajamane, N. P., & Nataraja, M. C. (2018). Geopolymers and Their Uses : Review Geopolymers and Their Uses : Review, 1–10.
- Rosyid, M., Nawangsih, E., Dewita. (2012). Perbaikan Surface Area Analyzer Nova-1000 (Alat Penganalisis Luas Permukaan Serbuk). *Prosiding Seminar*, II, 467–471.
- Saikia, B. J., Parthasarathy, G., Sarmah, N. C., & Baruah, G. D. (2008). Fourier – transform infrared spectroscopic characterization of naturally occurring glassy fulgurites, 31(2), 155–158.
- Sarbak, Z., & Wachowiak. (2002). Porous structure of waste fly ashes and their chemical modifications, 123, 53–58.
- Sharma, S., Medpelli, D., & Seo, D. (2015). Calcium-modified hierarchically porous aluminosilicate geopolymer as a highly efficient regenerable catalyst for biodiesel production. *The Royal Society of Chemistry*, 5, 65454–65461.
- Škvára, F., šulc, R., Tišler, Z., Skříčik, P., šmilauer, V., Cílová, Z. Z. (2014). Preparation and Properties of Fly Ash-based Geopolymer Foams Preparation and Properties of Fly Ash-based Geopolymer Foams. *Ceramics Silikaty*, 58(3), 188–197.
- Soemartini. 2007. *Pencilan (Outlier)*. Jatinangor: Universitas Padjadjaran.
- Suhas V. Patil, Suryakant C. Nawle, S. J. K. (2013). Industrial Applications of Fly ash : A Review. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 2(9), 1659–1663.
- Sukandarrumidi. 2009. *Batubara dan Pemanfaatannya*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Syukur, M., dan Kusumastuti, E. 2015. Sintesis dan Karakterisasi *Foamy Geopolymer* Berbahan Dasar Abu Layang Batubara. *Indonesian Journal of Chemistry Science*, 4(3): 12-26.
- Swanepoel, J. C., & Strydom, C. A. (2002). Utilisation of Fly Ash in a Geopolymeric Material. *Applied Geochemistry*, 17, 1143–1148.

- Tcholakova, S., Mustan, F., Pagureva, N., Golemanov, K., Denkov, N. D., Pelan, E. G., & Stoyanov, S. D. (2017). Role of surface properties for the kinetics of bubble Ostwald ripening in saponin-stabilized foams. *Colloids and Surfaces A*, (March), 0–1.
- Timakul, P., Rattanaprasit, W., & Aungkavattana, P. (2016). Enhancement of Compressive Strength and Thermal Shock Resistance of Fly Ash-based Geopolymer Composites. *Construction and Building Materials*, *121*, 653–658.
- Vaou, V., & Panias, D. (2010). Thermal Insulating Foamy Geopolymers from Perlite. *Minerals Engineering*, *23*, 1146–1151.
- Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2006). Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties, 1–91.
- Wang, S., Li, L., & Zhu, Z. H. (2007). Solid-State Conversion of Fly Ash to Effective Adsorbents for Cu Removal from Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, *139*, 254–259.
- Widyaningsih, S., Setiawan, E., Setyaningtyas, T. (2011). Karakterisasi Abu Terbang PLTU Cilacap untuk Menurunkan Kesadahan Air di Desa Darmakradenan Kecamatan Ajibarang Kabupaten Banyumas. *Molekul*, *6*, 35–39.
- Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*, *59*, 247–266.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkali – metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, *493*, 49–54.
- Živica, V., Palou, M. T., & Križma, M. (2016). Geopolymer Cements and Their Properties : A Review.

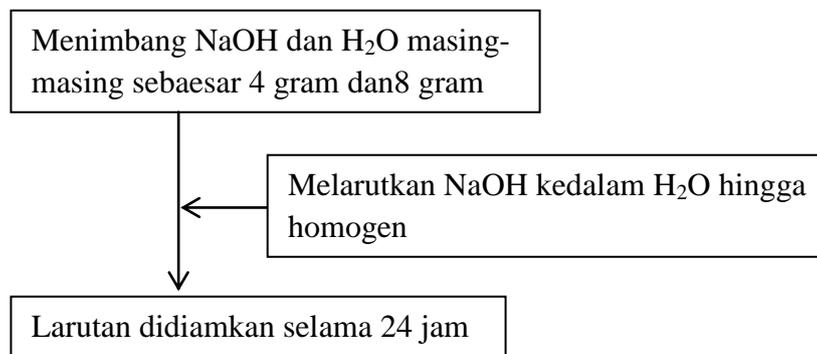
Lampiran 1. Skema prosedur kerja penelitian

Preparasi

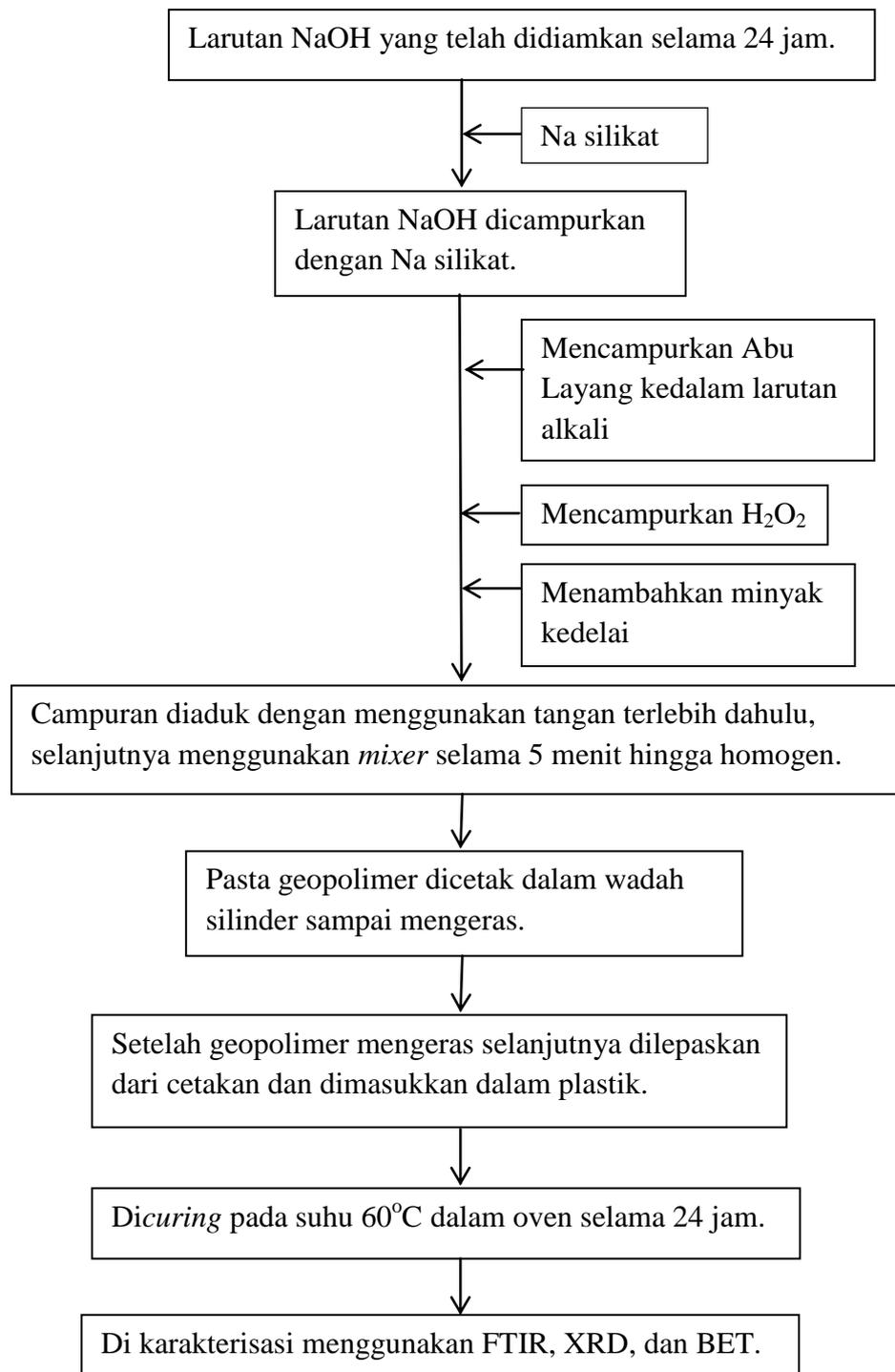
1. Preparasi Abu Layang



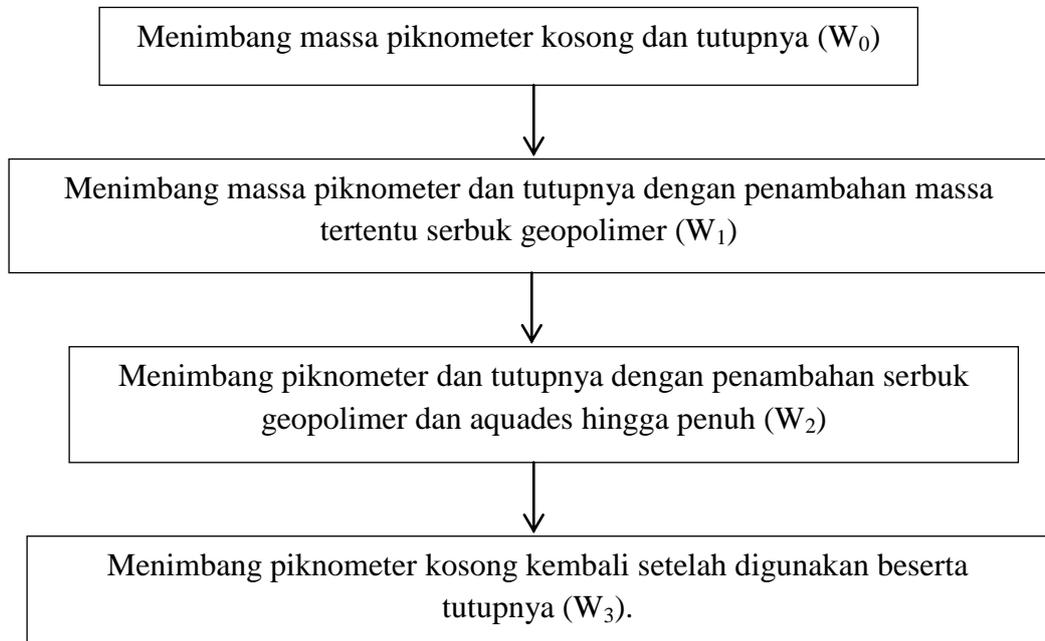
2. Pembuatan Larutan Alkali



3. Sintesis Geopolimer Berpori

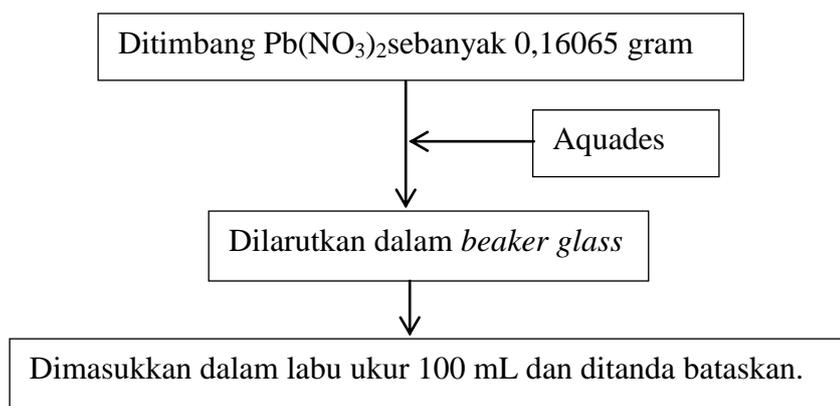


4. Analisis Densitas Geopolimer Berpori

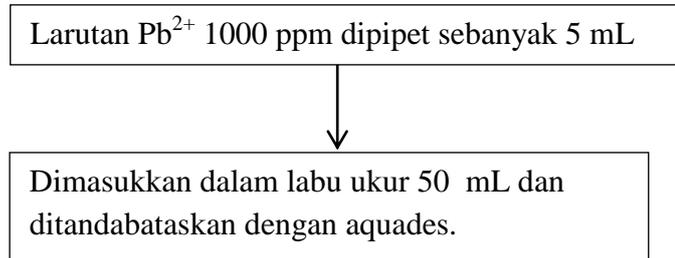


Aplikasi Geopolimer sebagai Adsorben

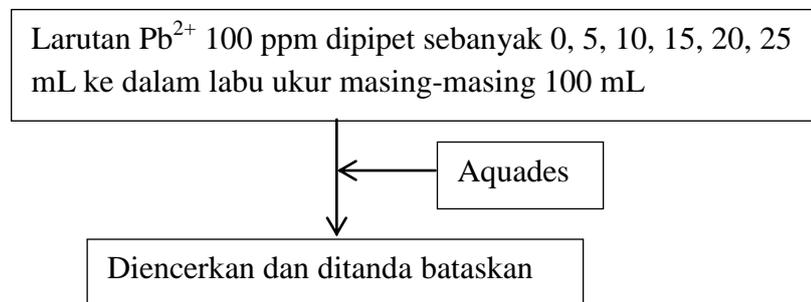
1. Pembuatan Larutan Pb^{2+} 1000 ppm



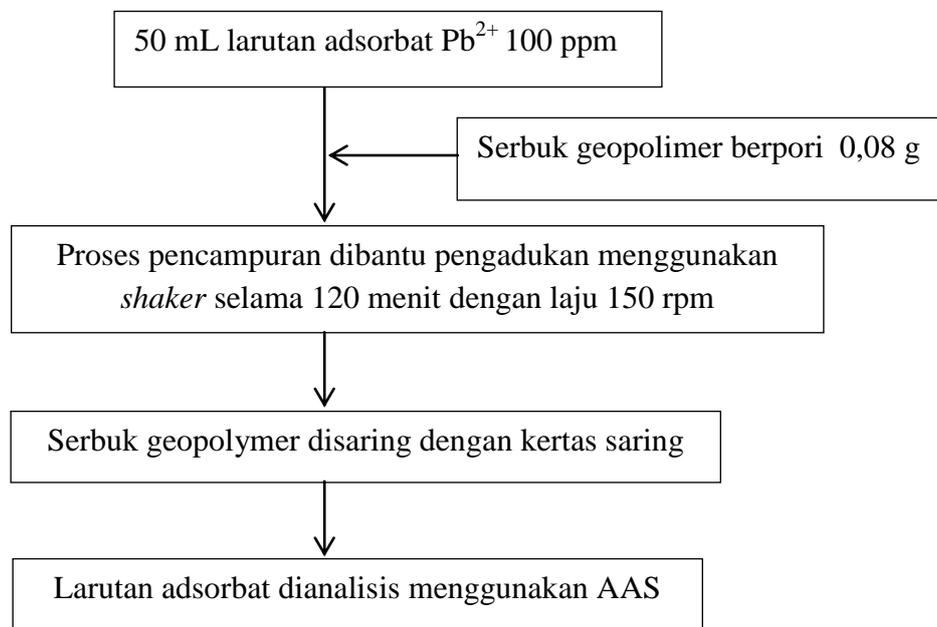
2. Pembuatan Larutan Pb^{2+} 100 ppm



3. Pembuatan Larutan Deret Kalibrasi Pb^{2+}



4. Uji Adsorpsi Ion Logam Pb^{2+} dengan Geopolimer Berpori



Lampiran 2. Perhitungan rasio mol SiO₂/Al₂O₃ dari abu layang dan Natrium Silikat

Mol SiO₂ dari abu layang

$$\begin{aligned} \text{Mol SiO}_2 \text{ dari abu layang} &= \frac{37,12 \times 33 \text{ gram}}{100} \\ &= \frac{12,2496 \text{ gram}}{60} \\ &= 0,204 \text{ mol} \end{aligned}$$

Mol SiO₂ dari Natrium Silikat

$$\begin{aligned} \text{Mol SiO}_2 \text{ dari Natrium Silikat} &= \frac{37,2 \times 10 \text{ gram}}{100} \\ &= \frac{3,72 \text{ gram}}{60} \\ &= 0,062 \text{ mol} \end{aligned}$$

Mol Al₂O₃ dari abu layang

$$\begin{aligned} \text{Mol Al}_2\text{O}_3 \text{ dari abu layang} &= \frac{14,84 \times 33 \text{ gram}}{100} \\ &= \frac{4,8972 \text{ gram}}{102} \\ &= 0,049 \text{ mol} \end{aligned}$$

Rasio mol SiO₂/Al₂O₃ = mol SiO₂ total/mol Al₂O₃

$$\begin{aligned} &= \frac{0,204 \text{ mol} + 0,062 \text{ mol}}{0,049 \text{ mol}} \\ &= 5,429 \text{ mol} \end{aligned}$$

Lampiran 3. Perhitungan rasio mol Na⁺ dari NaOH dan Na₂O pada Natrium Silikat

Mol Na⁺ pada NaOH

$$\begin{aligned} \text{Molar Na}^+ \text{ pada NaOH} &= \frac{96,7 \times 4 \text{ gram}}{100} \\ &= \frac{3,868 \text{ gram} \times 1000}{40 \times 8} \\ &= 12,0875 \text{ M} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol Na}^+ \text{ pada NaOH} &= \frac{\text{Ar Na}}{\text{Mr NaOH}} \times 12,0875 \text{ M} \\ &= \frac{23}{40} \times 12,0875 \text{ M} \\ &= 6,95 \text{ mol} \end{aligned}$$

Mol Na⁺ pada Na₂O

$$\begin{aligned} \text{Molar Na}^+ \text{ pada Na}_2\text{O} &= \frac{9}{100} \times 10 \text{ gram} \\ &= \frac{3,868 \text{ gram} \times 1000}{40 \times 8} \\ &= 1,625 \text{ M} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol Na}^+ \text{ pada Na}_2\text{O} &= \frac{\text{Ar Na}}{\text{Mr Na}_2\text{O}} \times 1,625 \text{ M} \\ &= \frac{23}{62} \times 1,625 \text{ M} \\ &= 0,43125 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rasio mol Na}^+ \text{ total} &= 6,95 \text{ mol} + 0,43125 \text{ mol} \\ &= 7,38 \text{ mol} \end{aligned}$$

Perhitungan stoikiometri SiO₂ / Al₂O₃ dengan NaOH

	$4\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$				
m	0,266	0,049	0,1	0,44	-
r	0,196	0,049	0,098	0,049	0,049
s	0,07	-	0,002	0,0351	0,049

Maka NaOH bersisa sebanyak 0,002 mol.

Lampiran 4. Perhitungan Standarisasi NaOH Teknis dengan Asam Oksalat

Membuat larutan asam oksalat dengan cara 0,3150 gram asam oksalat dilarutkan 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 1,0031 gram NaOH dilarutkan dalam akuades sampai 250 mL.

Konsentrasi larutan NaOH perkiraan

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

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

mmol asam oksalat = mmol NaOH

M Asam Oksalat x V Asam

Oksalat x n Asam Oksalat = M NaOH x V NaOH x n NaOH

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

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

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

Massa NaOH = mol x Mr

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

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

Lampiran 5. Perhitungan stoikiometri minyak kedelai dengan NaOH

Komposisi asam lemak pada minyak kedelai

Asam Lemak	wt% terhadap asam lemak total	
	Kisaran	Rata-rata
Asam Laurat (C12:0)	-	0,1
Asam Miristat (C14:0)	<0,5	0,2
Asam Palmitat (C16:0)	7-12	10,7
Asam Palmitoleat (C16:1)	<0,5	0,3
Asam Stearat (C18:0)	2-5.5	3,9
Asam Oleat (C18:1)	20-50	22,8
Asam Linoleat (C18:2)	35-60	50,8
Asam Linolenat (C18:3)	2-13	6,8
Asam Arachidat (C20:0)	1,0	0,2

(Perkins, 1995).

Berat molekul rata-rata minyak kedelai:

Asam Lemak	Rata-rata	Mr (g/mol)	Rata-rata x Mr
Asam Laurat (C12:0)	0,001	200	0,2
Asam Miristat (C14:0)	0,002	228	0,456
Asam Palmitat (C16:0)	0,107	256	27,392
Asam Palmitoleat (C16:1)	0,003	254	0,762
Asam Stearat (C18:0)	0,039	284	11,076
Asam Oleat (C18:1)	0,228	282	64,296
Asam Linoleat (C18:2)	0,508	280	142,24
Asam Linolenat (C18:3)	0,068	278	18,904
Asam Arachidat (C20:0)	0,002	312	0,624
Total			265,95

$$\text{BM} = (0,001 \times \text{Mr Asam Laurat}) + (0,002 \times \text{Mr Asam Miristat}) + (0,107 \times \text{Mr Asam Palmitat}) + (0,003 \times \text{Mr Asam Palmitoleat}) + (0,039 \times \text{Mr Asam Stearat}) + (0,228 \times \text{Mr Asam Oleat}) + (0,508 \times \text{Mr Asam Linoleat}) + (0,068 \times \text{Mr Asam Linolenat}) + (0,002 \times \text{Asam Arachidat})$$

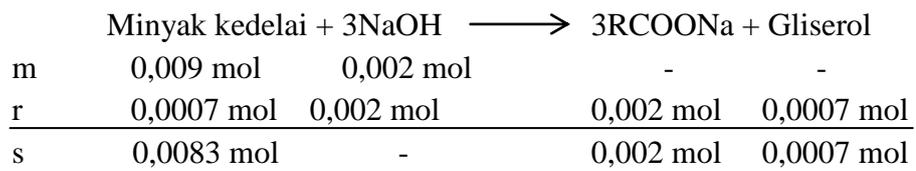
$$\text{BM} = (0,001 \times 200 \text{ g/mol}) + (0,002 \times 228 \text{ g/mol}) + (0,107 \times 256 \text{ g/mol}) + (0,003 \times 254 \text{ g/mol}) + (0,039 \times 284 \text{ g/mol}) + (0,228 \times 282 \text{ g/mol}) + (0,508 \times 280 \text{ g/mol}) + (0,068 \times 278 \text{ g/mol}) + (0,002 \times 312 \text{ g/mol})$$

$$\text{BM} = 0,2 + 0,456 + 27,392 + 0,762 + 11,076 + 64,296 + 142,24 + 18,904 + 0,624$$

$$\text{BM} = 265,95 \text{ g/mol}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Mol minyak kedelai} &= \frac{\text{massa minyak kedelai}}{\text{Mr}} \\
 &= \frac{2,38 \text{ gram}}{265,95 \text{ g/mol}} \\
 &= 0,009 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

Perhitungan Stoikiometri:



Lampiran 6. Perhitungan pembuatan larutan adsorbat Pb(II) 100 ppm

$$\begin{aligned}\text{Konsentrasi logam Pb}^{2+} &= \frac{\text{Mr Pb(NO}_3)_2 \times 1000 \text{ ppm}}{\text{Ar Pb}} \\ &= \frac{331,19 \text{ g/mol} \times 1000 \text{ ppm}}{207,19 \text{ g/mol}} \\ &= 1598,48 \text{ ppm} \\ &= 1598,48 \text{ mg/L} \\ &= 0,159848 \text{ g/100 mL}\end{aligned}$$

Kemurnian $\text{Pb(NO}_3)_2$ yaitu 99,5 % maka:

$$\begin{aligned}\text{Massa Pb(NO}_3)_2 &= 0,159848 \times \frac{100}{99,5} \\ &= 0,16065 \text{ gram}\end{aligned}$$

Lampiran 7. Perhitungan densitas geopolimer berpori

1. Perhitungan densitas geopolimer berpori pada variasi 0:0

$$\begin{aligned}
 V_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= \frac{W_3 - W_0}{1} \\
 &= \frac{43,5025 - 18,5888}{1} \\
 &= 24,9137 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m'_{\text{H}_2\text{O}} &= W_2 - W_1 \\
 &= 43,8599 - 19,2587 \\
 &= 24,6012 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V'_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m'_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= 24,6012 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_{\text{H}_2\text{O}} - V'_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &= 24,9137 \text{ mL} - 24,6012 \text{ mL} \\
 &= 0,3125 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_s &= \frac{m_s}{V_s} \\
 &= \frac{W_1 - W_0}{V_s} \\
 &= \frac{19,2587 - 18,5888}{0,3125 \text{ mL}} \\
 &= 2,14368 \text{ g/mL}
 \end{aligned}$$

2. Perhitungan densitas geopolimer berpori pada variasi 0:1

$$\begin{aligned}
 V_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= \frac{W_3 - W_0}{1} \\
 &= \frac{20,9160 - 11,0624}{1} \\
 &= 9,8536 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m'_{\text{H}_2\text{O}} &= W_2 - W_1 \\
 &= 21,4730 - 12,2005 \\
 &= 9,2725 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V'_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m'_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= 9,2725 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_{\text{H}_2\text{O}} - V'_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &= 9,8536 \text{ mL} - 9,2725 \text{ mL} \\
 &= 0,5811 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_s &= \frac{m_s}{V_s} \\
 &= \frac{W_1 - W_0}{V_s} \\
 &= \frac{12,2005 - 11,0624}{0,5811 \text{ mL}} \\
 &= 1,9585 \text{ g/mL}
 \end{aligned}$$

3. Perhitungan densitas geopolimer berpori pada variasi 1:0

$$\begin{aligned}
 V_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= \frac{W_3 - W_0}{1} \\
 &= \frac{20,9204 - 11,0560}{1} \\
 &= 9,8644 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m'_{\text{H}_2\text{O}} &= W_2 - W_1 \\
 &= 21,3865 - 11,9982 \\
 &= 9,3883 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V'_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m'_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= 9,3883 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_{\text{H}_2\text{O}} - V'_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &= 9,8644 \text{ mL} - 9,3883 \text{ mL} \\
 &= 0,4761 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_s &= \frac{m_s}{V_s} \\
 &= \frac{W_1 - W_0}{V_s} \\
 &= \frac{11,9982 - 11,0560}{0,4761 \text{ mL}} \\
 &= 1,9790 \text{ g/mL}
 \end{aligned}$$

4. Perhitungan densitas geopolimer berpori pada variasi 1:1

$$\begin{aligned}
 V_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= \frac{W_3 - W_0}{1} \\
 &= \frac{20,9162 - 11,0624}{1} \\
 &= 9,8538 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m'_{\text{H}_2\text{O}} &= W_2 - W_1 \\
 &= 21,5712 - 12,3092 \\
 &= 9,262 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V'_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m'_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= 9,262 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_{\text{H}_2\text{O}} - V'_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &= 9,8538 \text{ mL} - 9,262 \text{ mL} \\
 &= 0,5916 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_s &= \frac{m_s}{V_s} \\
 &= \frac{W_1 - W_0}{V_s} \\
 &= \frac{12,3092 - 11,0624}{0,5916 \text{ mL}} \\
 &= 2,1075 \text{ g/mL}
 \end{aligned}$$

5. Perhitungan densitas geopolimer berpori pada variasi 1:2

$$\begin{aligned}
 V_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= \frac{W_3 - W_0}{1} \\
 &= \frac{43,4461 - 18,6067}{1} \\
 &= 24,8394 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m'_{\text{H}_2\text{O}} &= W_2 - W_1 \\
 &= 44,0411 - 19,6737 \\
 &= 24,3674 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V'_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m'_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= 24,3674 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_{\text{H}_2\text{O}} - V'_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &= 24,8394 \text{ mL} - 24,3674 \text{ mL} \\
 &= 0,472 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_s &= \frac{m_s}{V_s} \\
 &= \frac{W_1 - W_0}{V_s} \\
 &= \frac{19,6737 - 18,6067}{0,472 \text{ mL}} \\
 &= 2,2606 \text{ g/mL}
 \end{aligned}$$

6. Perhitungan densitas geopolimer berpori pada variasi 2:1

$$\begin{aligned}
 V_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= \frac{W_3 - W_0}{1} \\
 &= \frac{43,5077 - 18,6111}{1} \\
 &= 24,966 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m'_{\text{H}_2\text{O}} &= W_2 - W_1 \\
 &= 43,8326 - 19,1930 \\
 &= 24,6396 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V'_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{m'_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 &= 24,6396 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_{\text{H}_2\text{O}} - V'_{\text{H}_2\text{O}} \\
 &= 24,966 \text{ mL} - 24,6396 \text{ mL} \\
 &= 0,257 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_s &= \frac{m_s}{V_s} \\
 &= \frac{W_1 - W_0}{V_s} \\
 &= \frac{19,1930 - 18,6111}{0,257 \text{ mL}} \\
 &= 2,2642 \text{ g/mL}
 \end{aligned}$$

Lampiran 8. Perhitungan persentase penyerapan geopolimer berpori terhadap ion logam berat Pb^{2+}

1. Perhitungan persentase penyerapan geopolimer berpori variasi 0:0

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase penyerapan} &= \frac{C_{\text{induk}} - \text{rerata } C_{\text{akhir}}}{C_{\text{induk}}} \\
 &= \frac{101,081 - 79,56 \text{ mg/L}}{101,081} \times 100\% \\
 &= 21,29\%
 \end{aligned}$$

2. Perhitungan persentase penyerapan geopolimer berpori variasi 0:1

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase penyerapan} &= \frac{C_{\text{induk}} - \text{rerata } C_{\text{akhir}}}{C_{\text{induk}}} \\
 &= \frac{101,081 - 61,29 \text{ mg/L}}{101,081} \times 100\% \\
 &= 39,36\%
 \end{aligned}$$

3. Perhitungan persentase penyerapan geopolimer berpori variasi 1:0

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase penyerapan} &= \frac{C_{\text{induk}} - \text{rerata } C_{\text{akhir}}}{C_{\text{induk}}} \\
 &= \frac{101,081 - 53,63 \text{ mg/L}}{101,081} \times 100\% \\
 &= 46,94\%
 \end{aligned}$$

4. Perhitungan persentase penyerapan geopolimer berpori variasi 1:1

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase penyerapan} &= \frac{C_{\text{induk}} - \text{rerata } C_{\text{akhir}}}{C_{\text{induk}}} \\
 &= \frac{101,081 - 45,68 \text{ mg/L}}{101,081} \times 100\% \\
 &= 54,81\%
 \end{aligned}$$

5. Perhitungan persentase penyerapan geopolimer berpori variasi 1:2

$$\begin{aligned}\text{Persentase penyerapan} &= \frac{C_{\text{induk}} - \text{rerata } C_{\text{akhir}}}{C_{\text{induk}}} \\ &= \frac{101,081 - 44,31 \text{ mg/L}}{101,081} \times 100\% \\ &= 56,16\%\end{aligned}$$

6. Perhitungan persentase penyerapan geopolimer berpori variasi 2:1

$$\begin{aligned}\text{Persentase penyerapan} &= \frac{C_{\text{induk}} - \text{rerata } C_{\text{akhir}}}{C_{\text{induk}}} \\ &= \frac{101,081 - 63,66 \text{ mg/L}}{101,081} \times 100\% \\ &= 37,02\%\end{aligned}$$

Lampiran 9. Kartu PDF (*Powder Diffraction File*) untuk penentuan jenis mineral dengan XRD (*X-Ray Diffraction*)

1. Quartz

05-0490		* Wavelength= 1.54056 *									
α-SiO ₂		2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
Silicon Oxide		20.835	35	1	0	0	81.186	4	1	1	4
		28.643	100	1	0	1	81.486	4	3	1	0
		38.526	12	1	1	0	83.836	2	3	1	1
Quartz, low		39.455	12	1	0	2	84.941	<1	2	0	4
Rad.: Cu λ: 1.54056 Filter: d-sp:		40.283	6	1	1	1	87.451	<1	3	0	3
Cut off: Int.: I/lor.: 3.60		42.443	9	2	0	0	90.823	4	3	1	2
Ref:		45.788	6	2	0	1	92.808	1	4	0	0
		50.166	17	1	1	2	94.650	2	1	0	5
		50.643	<1	0	0	3	95.127	2	4	0	1
		54.864	7	2	0	2	96.236	2	2	1	4
		55.330	3	1	0	3	98.747	2	2	2	3
Sys.: Hexagonal S.G.: P3 ₁ 21 (152)		57.244	<1	2	1	0	102.224	2	1	1	5
a: 4.913 b: c: 5.405 A: C: 1.1001		59.981	15	2	1	1	102.570	2	3	1	3
α: β: γ: Z: 3 mp:		64.029	3	1	1	3	103.910	<1	3	0	4
Ref: Ibid.		65.806	<1	3	0	0	104.195	1	3	2	0
		67.748	7	2	1	2	106.603	2	3	2	1
		68.140	11	2	0	3	112.206	<1	4	1	0
		68.309	9	3	0	1					
Dx: 2.649 Dm: SS/FOM: F ₃₀ = 78(.0125 . 31)		73.460	3	1	0	4					
		75.654	4	3	0	2					
		77.697	2	2	2	0					
PSC: hP9. To replace 1-649. Deleted by 33-1161. Mwt: 60.08.		79.891	5	2	1	3					
Volume[CD]: 112.98.		80.084	2	2	2	1					

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

2. Mullite

09-0258		* Wavelength= 1.5418 *									
3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂		2θ	Int	h	k	l	2θ	Int	h	k	l
Aluminum Silicate		16.538	40	1	0	1	74.336	23	5	2	4
		26.132	71	2	3	1	74.747	11	7	8	2
Mullite		26.368	100	2	4	0	75.303	20	4	11	1
Rad.: CuKα λ: 1.5418 Filter: Ni Beta d-sp:		31.052	25	0	0	2	75.655	12	3	5	4
Cut off: Int.: I/lor.:		33.307	51	0	2	2	76.880	4	12	0	0
Ref: Gillery, F., The Penn State Univ., Univ. Park, PA, USA.		35.336	60	0	6	0	77.027	9	6	1	4
Private Communication		37.151	17	4	4	1	77.397	5	2	6	4
		39.344	24	0	4	2	78.455	5	2	12	1
		41.025	75	2	4	2	80.672	5	7	0	4
		42.647	29	5	5	0	81.166	5	4	6	4
Sys.: Orthorhombic S.G.:		43.073	7	3	6	1	84.641	3	10	3	3
a: 14.88 b: 15.18 c: 5.75 A: 0.9802 C: 0.3788		48.280	9	1	6	2	88.883	5	0	4	5
α: β: γ: Z: mp:		49.625	12	2	8	0	89.294	7	1	4	5
Ref: Ibid.		53.592	7	7	0	2	96.710	5	0	7	5
		54.002	9	7	1	2	99.239	5	0	15	0
		54.209	13	4	6	2	100.046	12	6	4	5
		57.726	23	6	5	2	100.731	4	9	9	4
Dx: Dm: 3.160 SS/FOM: F ₃₀ = (0.056 . 404)		58.529	9	5	2	3	101.710	6	3	14	2
		59.146	3	8	0	2	102.569	6	2	15	1
		60.863	59	1	6	3	103.299	4	8	12	2
ω: 1.638 η: 1.642 σ: 1.653 Sign: + 2V: 45-5θ		63.792	12	3	6	3	105.262	3			
Ref: Data on Chem. for Cer. Use, Natl. Res. Council Bull. 107		64.735	30	2	10	1	107.325	3			
		65.657	6	5	9	1	108.901	4			
		66.661	11	2	1	4	109.173	6			
		69.942	8	9	6	1	109.601	5			
Color: White		70.604	16	6	8	2	110.086	3			
Pure synthetic material supplied by Rookaby; Rookaby, Fartridge.		71.094	10	2	8	3	112.900	4			
Trans. Soc. Glass Tech., 23 338 (1939). Unit cell dimensions are		71.218	10	2	4	4	113.408	5			
uncertain; Bragg, At. Str. Minerals 170. Delete: Berry parcel		71.718	4	5	10	1	114.153	4			
February 25, 1964, for 15-776. Mwt: 426.05. Volume[CD]:		72.034	4	11	1	1	115.584	3			
1296.80.											

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

3. Kaolinite

29-1486		Wavelength= 1.5418				
Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄						
	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	
	36.055	30	2	0	0	
Rad.: CuKα λ: 1.5418 Filter: Ni Beta d-sp:	38.993	5				
Cut off: Int.: Diffract. I/Cor.:	37.881	20	0	0	3	
Ref: Brindley, G., Penn State Univ., University Park, PA, USA.	38.694	40	1	1	3	
ICDD Grant-in-Aid. (1977)	41.025	5	2	0	1	
	45.827	10	2	2	1	
	48.198	6	0	4	2	
Sys.: Monoclinic S.G.: C ₂ /m (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	
Dx: 2.601 Dm: SS/FOM: F ₂₀ = 2(0.112 . 87)	68.033	3	0	6	2	
	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.=C₂/m, PSC: mC34. See original PDF card for
 Graphical diffractometer trace. To replace 6-221. Mwt:
 258.16. Volume[CD]: 329.68.

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

Lampiran 10. Tabel intensitas puncak difraksi mineral pada geopolimer berpori

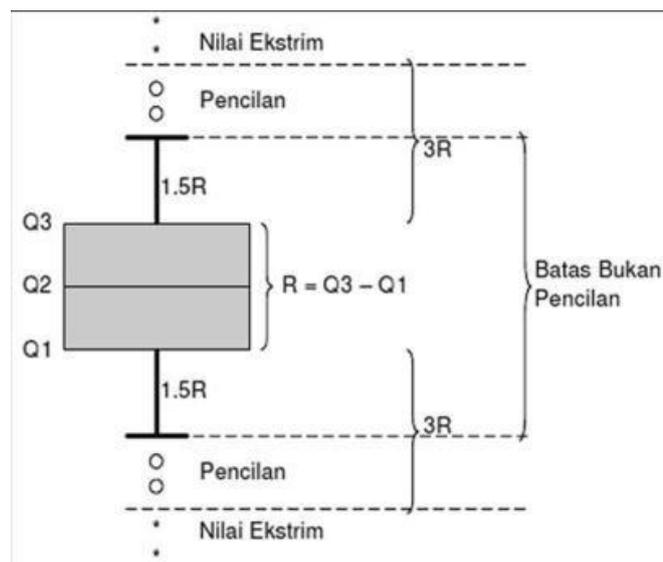
Variasi geopolimer	Intensitas			
	<i>Quartz₁</i>	<i>Quartz₂</i>	<i>Mullite</i>	<i>Kaolinite</i>
Abu Layang	372	283	300	313
0:0	221	509	240	236
0:1	349	738	285	263
1:0	346	595	297	261
1:1	349	665	271	268
1:2	345	805	281	253
2:1	336	497	289	240

Lampiran 11. Analisis Pencilan (*Outlier*) Data Tabel 11 menggunakan Metode *BoxPlot*

Data Tabel 11 pada Skripsi

No.	Variasi	Konsentrasi Terhitung (mg/L)
1.	0:0	87.35
2.		79.21
3.		72.12
1.	0:1	60
2.		62.94
3.		60.92
1.	1:0	68.45
2.		19.03
3.		73.41
1.	1:1	29.09
2.		58.09
3.		49.85
1.	1:2	37.82
2.		69.94
3.		25.17
1.	2:1	54.32
2.		65.77
3.		70.9

Gambar Skema identifikasi pencilan menggunakan metode *boxplot*



(Soemartini, 2007).

1. Data Variasi 0:0

```

EXAMINE VARIABLES=P1
/PLOT BOXPLOT STEMLEAF
/COMPARE GROUPS
/STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME
/CINTERVAL 95
/MISSING LISTWISE
/NOTOTAL.

```

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
0:0	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
0:0	Mean	79.5600	4.40000
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound 60.6283 Upper Bound 98.4917	
	5% Trimmed Mean	.	
	Median	79.2100	
	Variance	58.080	
	Std. Deviation	7.62103	
	Minimum	72.12	
	Maximum	87.35	
	Range	15.23	
	Interquartile Range	.	
	Skewness	.206	1.225
	Kurtosis	.	.

Extreme Values^a

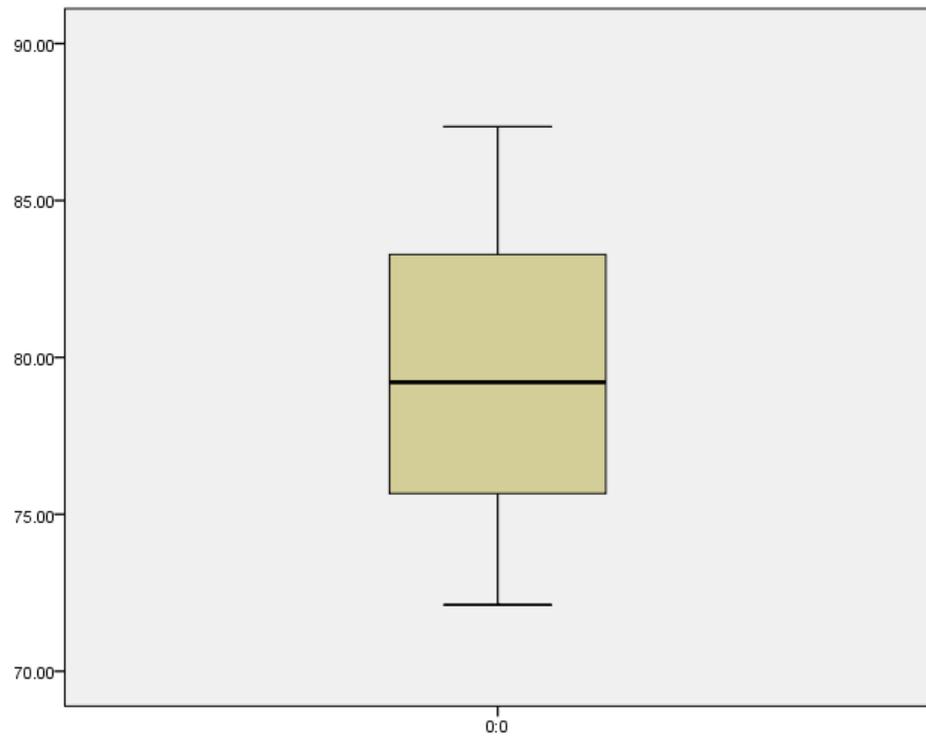
			Case Number	Value
0:0	Highest	1	1	87.35
	Lowest	1	3	72.12

- a. The requested number of extreme values exceeds the number of data points. A smaller number of extremes is displayed.

0:0 Stem-and-Leaf Plot

Frequency	Stem & Leaf
2.00	7 . 29
1.00	8 . 7

Stem width: 10.00
Each leaf: 1 case(s)



2. Data Variasi 0:1

```

EXAMINE VARIABLES=P2
/PLOT BOXPLOT STEMLEAF
/COMPARE GROUPS
/STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME
/CINTERVAL 95
/MISSING LISTWISE
/NOTOTAL.

```

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
0:1	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
0:1	Mean	61.2867	.86828
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound 57.5508	
		Upper Bound 65.0226	
	5% Trimmed Mean	.	
	Median	60.9200	
	Variance	2.262	
	Std. Deviation	1.50391	
	Minimum	60.00	
	Maximum	62.94	
	Range	2.94	
	Interquartile Range	.	
	Skewness	1.032	1.225
	Kurtosis	.	.

Extreme Values^a

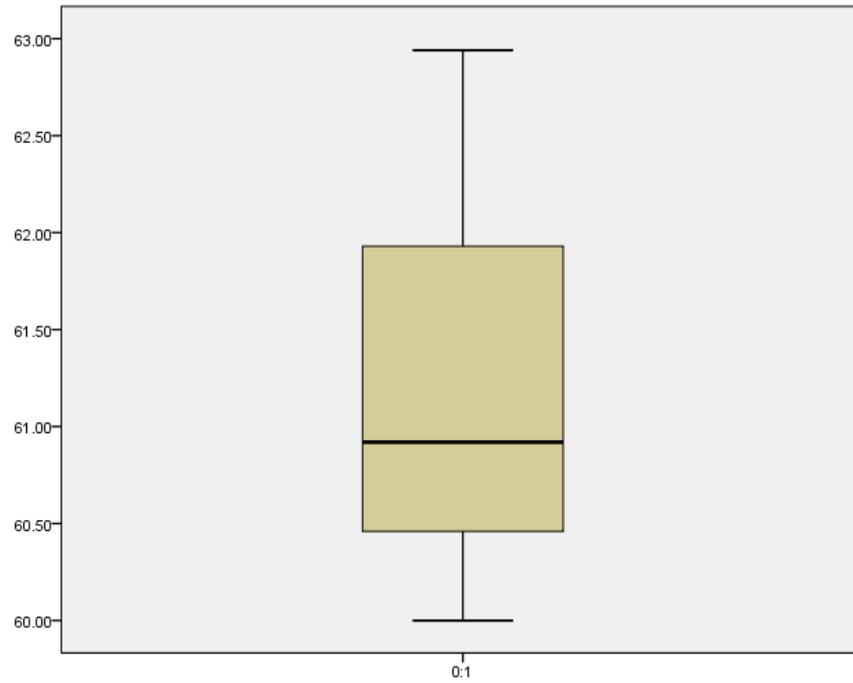
			Case Number	Value
0:1	Highest	1	2	62.94
	Lowest	1	1	60.00

a. The requested number of extreme values exceeds the number of data points. A smaller number of extremes is displayed.

0:1 Stem-and-Leaf Plot

Frequency	Stem & Leaf
3.00	6 . 002

Stem width: 10.00
Each leaf: 1 case(s)



3. Data Variasi 1:0

```

EXAMINE VARIABLES=P3
/PLOT BOXPLOT STEMLEAF
/COMPARE GROUPS
/STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME
/CINTERVAL 95
/MISSING LISTWISE
/NOTOTAL.

```

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
1:0	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
1:0	Mean	53.6300	17.35915
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound -21.0604 Upper Bound 128.3204	
	5% Trimmed Mean	.	
	Median	68.4500	
	Variance	904.020	
	Std. Deviation	30.06693	
	Minimum	19.03	
	Maximum	73.41	
	Range	54.38	
	Interquartile Range	.	
	Skewness	-1.679	1.225
	Kurtosis	.	.

Extreme Values^a

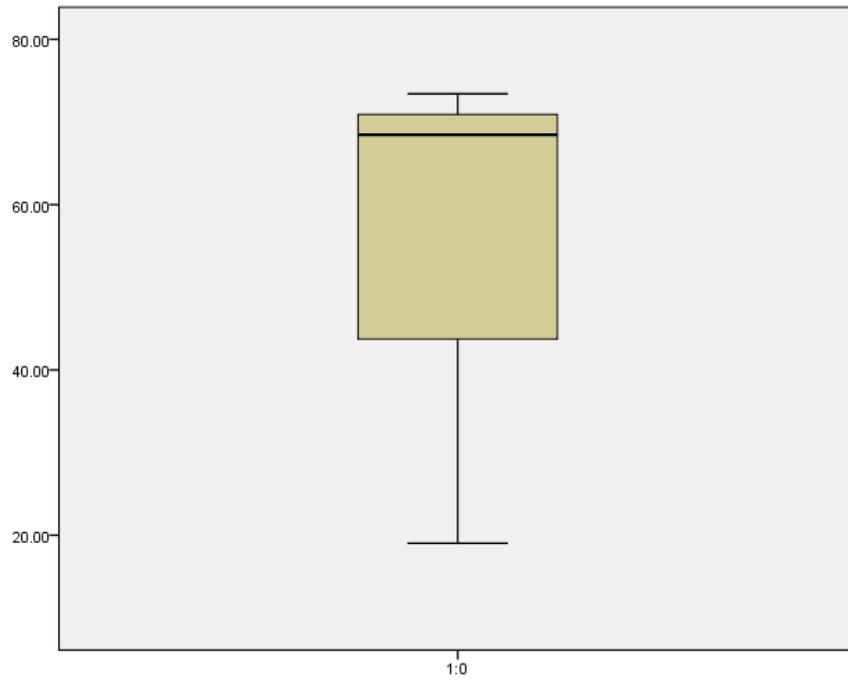
			Case Number	Value
1:0	Highest	1	3	73.41
	Lowest	1	2	19.03

a. The requested number of extreme values exceeds the number of data points. A smaller number of extremes is displayed.

1:0 Stem-and-Leaf Plot

Frequency	Stem & Leaf
1.00	0 . 1
2.00	0 . 67

Stem width: 100.00
Each leaf: 1 case(s)



4. Data Variasi 1:1

```

EXAMINE VARIABLES=P4
/PLOT BOXPLOT STEMLEAF
/COMPARE GROUPS
/STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME
/CINTERVAL 95
/MISSING LISTWISE
/NOTOTAL.

```

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
1:1	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
1:1	Mean	45.6767	8.62772
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound 8.5546	
		Upper Bound 82.7987	
	5% Trimmed Mean	.	
	Median	49.8500	
	Variance	223.313	
	Std. Deviation	14.94365	
	Minimum	29.09	
	Maximum	58.09	
	Range	29.00	
	Interquartile Range	.	
	Skewness	-1.159	1.225
	Kurtosis	.	.

Extreme Values^a

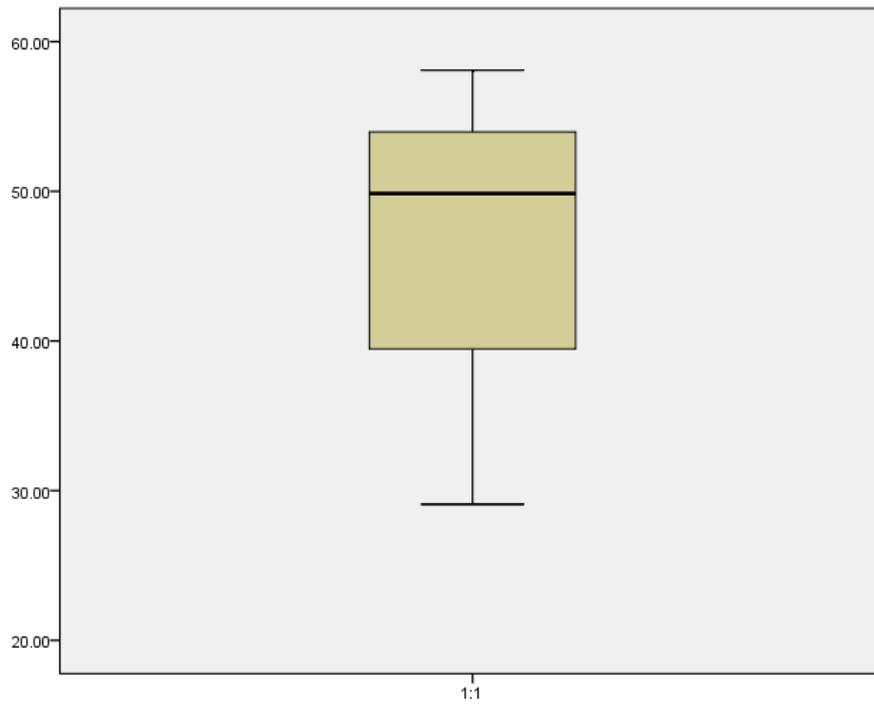
			Case Number	Value
1:1	Highest	1	2	58.09
	Lowest	1	1	29.09

a. The requested number of extreme values exceeds the number of data points. A smaller number of extremes is displayed.

1:1 Stem-and-Leaf Plot

Frequency	Stem & Leaf
2.00	0 . 24
1.00	0 . 5

Stem width: 100.00
Each leaf: 1 case(s)



5. Data Variasi 1:2

```

EXAMINE VARIABLES=P5
/PLOT BOXPLOT STEMLEAF
/COMPARE GROUPS
/STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME
/CINTERVAL 95
/MISSING LISTWISE
/NOTOTAL.

```

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
1:2	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
1:2	Mean	44.3100	13.32514
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound -13.0235 Upper Bound 101.6435	
	5% Trimmed Mean	.	
	Median	37.8200	
	Variance	532.678	
	Std. Deviation	23.07982	
	Minimum	25.17	
	Maximum	69.94	
	Range	44.77	
	Interquartile Range	.	
	Skewness	1.165	1.225
	Kurtosis	.	

Extreme Values^a

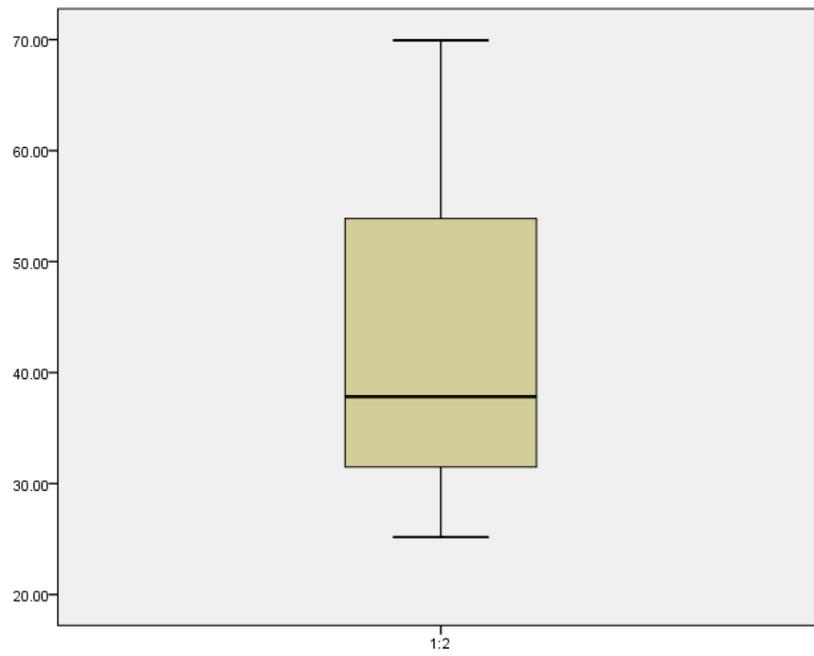
			Case Number	Value
1:2	Highest	1	2	69.94
	Lowest	1	3	25.17

a. The requested number of extreme values exceeds the number of data points. A smaller number of extremes is displayed.

1:2 Stem-and-Leaf Plot

Frequency	Stem &	Leaf
2.00	0 .	23
1.00	0 .	6

Stem width: 100.00
Each leaf: 1 case(s)



6. Data Variasi 2:1

```

EXAMINE VARIABLES=P6
/PLOT BOXPLOT STEMLEAF
/COMPARE GROUPS
/STATISTICS DESCRIPTIVES EXTREME
/CINTERVAL 95
/MISSING LISTWISE
/NOTOTAL.

```

Case Processing Summary

	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
2:1	3	100.0%	0	0.0%	3	100.0%

Descriptives

		Statistic	Std. Error
2:1	Mean	63.6633	4.90077
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound 42.5770 Upper Bound 84.7496	
	5% Trimmed Mean	.	
	Median	65.7700	
	Variance	72.053	
	Std. Deviation	8.48838	
	Minimum	54.32	
	Maximum	70.90	
	Range	16.58	
	Interquartile Range	.	
	Skewness	-1.048	1.225
	Kurtosis	.	.

Extreme Values^a

		Case Number	Value
2:1	Highest	1	70.90
	Lowest	1	54.32

a. The requested number of extreme values exceeds the number of data points. A smaller number of extremes is displayed.

2:1 Stem-and-Leaf Plot

Frequency	Stem &	Leaf
1.00	5 .	4
1.00	6 .	5
1.00	7 .	0

Stem width: 10.00
Each leaf: 1 case(s)

