



SKRIPSI

**KINETIKA *LEACHING* ION LOGAM BERAT Pb^{2+} PADA
GEOPOLIMER BERBASIS ABU LAYANG PT. IPMOMI**

**PRIONO NUGROHO
NRP 0121144000051**

**Dosen Pembimbing 1
Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D.**

**Dosen Pembimbing 2
Dr. Djoko Hartanto, M.Si.**

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS ILMU ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**



SCRIPT

LEACHING KINETICS OF HEAVY METAL IONS Pb^{2+} FROM GEOPOLYMER BASED ON PT. IPMOMI FLY ASH

PRIONO NUGROHO
NRP 0121144000051

Advisor Lecture 1
Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D.

Advisor Lecture 2
Dr. Djoko Hartanto, M.Si.

DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCES
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

**KINETIKA *LEACHING* ION LOGAM BERAT Pb²⁺ PADA
GEOPOLIMER BERBASIS ABU LAYANG PT. IPMOMI**

SKRIPSI

Disusun sebagai syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains
Pada
Program Studi S-1 Kimia
Fakultas Ilmu Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Disusun oleh:

PRONO NUGROHO
NRP 0121144000051

**DEPARTEMEN KIMIA
FAKULTAS ILMU ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

KINETIKA *LEACHING* ION LOGAM BERAT Pb^{2+} PADA
GEOPOLIMER BERBASIS ABU LAYANG PT. IPMOMI

SKRIPSI

Disusun oleh:

PRIONO NUGROHO
NRP. 0121144000051

Surabaya, 2 Agustus 2018

Menyetujui,

Dosen Pembimbing 1

Dosen Pembimbing 2


Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D.
NIP 19691017 199412 1 001


Dr. Djoko Hartanto, M.Si.
NIP. 19621028 198803 1 003



Prof. Dr. Didik Prasetyoko, M.Sc.
NIP 19710616 199703 1 002

KINETIKA LEACHING ION LOGAM BERAT Pb^{2+} PADA GEOPOLIMER BERBASIS ABU LAYANG PT. IPMOMI

Nama : Priono Nugroho

NRP : 01211440000051

Departemen : Kimia ITS

Dosen Pembimbing I : Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D.

Dosen Pembimbing II : Dr. Djoko Hartanto, M.Si.

ABSTRAK

Geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI berhasil dibuat dengan variasi konsentrasi penambahan ion Pb^{2+} 1000, 4000, 8000, dan 16000 ppm relatif terhadap massa abu layang. Geopolimer yang telah berumur 7 hari dilakukan pengujian kuat tekan, *leaching* dan SEM untuk mengetahui pengaruh penambahan konsentrasi ion Pb^{2+} . Penambahan konsentrasi ion Pb^{2+} 4000 ppm merupakan variasi optimum karena menghasilkan kuat tekan tekan yang paling tinggi sebesar 35,56 MPa dibandingkan variasi yang lain. Hasil uji kuat tekan geopolimer relatif tidak berubah setelah uji *leaching*. Hasil uji *leaching* menunjukkan peningkatan konsentrasi ion Pb^{2+} yang ter-*leaching* seiring dengan peningkatan konsentrasi ion Pb^{2+} yang ditambahkan. Pembacaan SEM yang dilakukan pada geopolimer sebelum dan setelah proses *leaching* menunjukkan masih adanya partikel abu layang yang belum bereaksi serta peningkatan jumlah pori dan retakan setelah uji *leaching*. Profil *line scan* SEM menunjukkan adanya pergerakan ion Pb^{2+} dari bagian dalam menuju tepi geopolimer setelah *leaching*. Model kinetika yang sesuai adalah *Shrinking Core Model* dominasi kontrol difusi lapisan padatan dengan orde reaksi sebesar 2,46. Mekanisme *leaching* Pb^{2+} merupakan difusi larutan pelindih dan ion Pb^{2+} dalam padatan melalui pori dan retakan pada geopolimer.

Kata Kunci : geopolimer, amobilisasi logam berat, *leaching*, kinetika *leaching*

LEACHING KINETICS OF HEAVY METAL IONS Pb^{2+} FROM GEOPOLYMER BASED ON PT. IPMOMI FLY ASH

Name : Priono Nugroho
NRP : 0121144000051
Department : Kimia ITS
Advisor Lecture I : Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D.
Advisor Lecture II : Dr. Djoko Hartanto, M.Si.

ABSTRACT

Geopolymer based on fly ash PT. IPMOMI was successfully synthesized with variations of Pb^{2+} additions 1000, 4000, 8000, and 16000 ppm relative to mass of fly ash. Geopolymer was characterized by compressive strength, leaching test and SEM to determine the effect of additions Pb^{2+} ions. The addition of Pb^{2+} 4000 ppm is the optimum variation because it produces the biggest compressive strength of 35,56 compared to other variations. The compressive strength of geopolymer is relative unchanged after the leaching test. The leaching test showed an increase in the concentration of Pb^{2+} leached out along with the increase of additions Pb^{2+} . SEM that performed on geopolymers before and after leaching process show the presence of unreacted fly ash and the number of pore and cracks increase after leaching process. The line scan profile of SEM shows the movement of Pb^{2+} from inside to edge of geopolymer after leaching process. Appropriate kinetic model in this research is Shrinking Core Model Kinetics with dominance control of diffusion on solid layer with reaction order equal to 2,46. The leaching mechanism of Pb^{2+} is the diffusion leachate solution and Pb^{2+} ion in solid layer through pores and cracks that present in the geopolymer network.

Keywords : *geopolymer, immobilization of heavy metals, leaching, leaching kinetics*

*Karya ini kupersembahkan untuk
Bapak, Ibuk, dan kedua saudaraku yang tersayang
Dosen pembimbing, Bapak Hamzah Fansuri
Keluargaku yang dikampus, Galaxy, HIMKA dan KSE
Kawan-kawan Kamp Ceria
Serta sebagai wujud syukurku kepada Allah SWT*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan dengan baik naskah Tugas Akhir yang berjudul **“KINETIKA *LEACHING* ION LOGAM BERAT Pb^{2+} PADA GEOPOLIMER BERBASIS ABU LAYANG PT. IPMOMI”**.

Tulisan ini tidak akan terwujud tanpa bantuan, dukungan, doa serta dorongan semangat dari semua pihak. Untuk itu penulis sangat berterima kasih kepada:

1. Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan pengarahan, nasehat, bimbingan, dan pengalaman baru selama proses penyusunan naskah Skripsi ini.
2. Dr. Djoko Hartanto, M.Si. selaku Dosen pembimbing 2 dan Ketua Laboratorium KME yang telah memberikan motivasi, fasilitas dan nasehat kepada saya selama proses penyusunan naskah Skripsi ini.
3. Prof. Dr. Didik Prasetyoko, S.Si, M.Sc selaku Kepala Departemen Kimia FMIPA-ITS atas fasilitas yang telah diberikan hingga naskah Skripsi ini dapat terselesaikan.
4. Prof. Dr. Perry Burhan M.Sc selaku Dosen Wali atas nasehat dan arahan selama saya berkuliah di Departemen Kimia ITS.
5. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberi dukungan, doa, serta semangat yang tiada henti.
6. Teman-teman Galaxy, HIMKA ITS, Kabinet KSE ITS BAHAGIA dan Kamp Ceria yang selalu memberi semangat dan doa.
7. Anggota Tim Penelitian M4E2 yang telah membantu, memotivasi serta menjadi parter hingga naska Skripsi ini bisa terselesaikan.

8. Semua pihak yang telah membantu saya yang tidak mungkin saya sebutkan satu persatu.

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

Surabaya, 31 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Batasan Penelitian	4
1.4. Tujuan Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PSUTAKA	7
2.1 Geopolimer	7
2.1.1 Sumber Aluminisilikat	9
2.1.2 Larutan Basa Pengaktif	9
2.1.3 Reaksi Geopolimerisasi	10
2.1.4 Sifat Geopolimer	14
2.2 Abu Layang	15
2.3 Timbal (Pb)	17
2.4 Amobilisasi Logam Berat	18
2.5 Faktor Efisiensi Amobilisasi Logam Berat dalam Geopolimer	21
2.6 <i>Leaching</i>	23

2.7 Kinetika <i>Leaching</i>	25
2.8 Kinetika Reaksi Heterogen Fluida-Padatan	25
2.9 Permodelan Kinetika Reaksi <i>Shrinking Particle Size</i>	28
2.10 Permodelan Kinetika Reaksi <i>Constant Particle Size</i>	29
2.10.1 <i>Progressive-Conversion Model Kinetics</i>	30
2.10.2 <i>Shrinking-Core Model Kinetics</i>	31
2.11 Persamaan Kinetika <i>Shrinking-Core Model</i>	31
2.11.1 Kontrol Difusi Antarmuka Larutan-Padatan.....	34
2.11.2 Kontrol Difusi Lapisan Padatan	34
2.11.3 Kontrol Reaksi Kimia Pada Permukaan	35
2.12 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	36
2.13 Kuat Tekan	38
2.14 <i>Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)</i>	38
BAB III METODOLOGI	41
3.1 Alat dan Bahan	41
3.1.1 Alat	41
3.1.2 Bahan	41
3.2 Preparasi Abu Layang PT. IPMOMI	42
3.3 Pembuatan Larutan Basa Pengaktif (<i>Alkaline activator</i>)	43
3.4 Sintesis Geopolimer	43
3.5 Pembuatan Larutan Buffer	44
3.6 Leaching Ion Logam Pb^{2+} dalam Geopolimer	45
3.7 Kalibrasi AAS dalam pengukuran konsentrai Pb^{2+}	46
3.8 Karakterisasi.....	46
3.8.1 Sifat Mekanik Kuat Tekan Geopolimer.....	46

3.8.2 Kandungan Ion Logam yang Ter- <i>leaching</i> dengan AAS...	47
3.8.3 Morfologi Geopolimer dengan SEM-EDX.....	47
3.8.4 <i>Line Scan</i> dengan SEM-EDX.....	48
3.9 Penentuan Kinetika <i>Leaching</i> Pb ²⁺ dalam Geopolimer.....	48
3.10 Penentuan Orde Reaksi <i>Leaching</i> Pb ²⁺	50
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1 Preparasi Larutan Basa Aktivator	51
4.2 Amobilisasi logam berat Pb ²⁺ menggunakan geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI.....	52
4.3 Hasil Kuat Tekan Geopolimer dengan Penambahan Ion Logam Berat Pb ²⁺	54
4.3.1 Sebelum Proses <i>Leaching</i>	54
4.3.2 Setelah Proses <i>Leaching</i>	57
4.4 Hasil Uji <i>Leaching</i> Pb ²⁺ pada Geopolimer.....	58
4.5 Analisa Morfologi dan Persebaran Pb ²⁺	61
4.6 Pergerakan Pb ²⁺ dalam Geopolimer setelah <i>Leaching</i>	66
4.7 Penentuan Model Kinetika <i>Leaching</i> Pb ²⁺	70
4.8 Penentuan Orde Reaksi <i>Leaching</i> Pb ²⁺	73
4.9 Mekanisme <i>Leaching</i> Pb ²⁺	74
BAB V KESIMPULAN	77
DAFTAR PUSTAKA.....	79
LAMPIRAN.....	89
Lampiran A: Skema Kerja.....	89
Lampiran B: Perhitungan Sintesis Geopolimer	94
Lampiran C: Perhitungan Pembuatan Larutan Buffer Asetat	97
Lampiran D: Perhitungan kuat tekan geopolimer	99

Lampiran E: Perhitungan Hasil <i>Leaching</i> Pb ²⁺	100
Lampiran F: Morfologi dan Persebaran Pb ²⁺	107
Lampiran G: Penentuan Model Kinetika <i>Leaching</i>	115
BIODATA PENULIS	123

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema diagram pembentukan geopolimer	7
Gambar 2. 2 Macam struktur dasar jaringan geopolimer	8
Gambar 2. 3 Skema reaksi geopolimerisasi	11
Gambar 2. 4 (A) Model struktur geopolimer dengan formasi gel N-A-S-H, dengan oksigen sebagai jembatan penghubung dan Na ⁺ sebagai penyeimbang muatan. (B) Representasi 3D dari bagian gel N-A-S-H yang terpolimerisasi.	12
Gambar 2. 5 Mekanisme penyusunan jaringan geopolimer	13
Gambar 2. 6 Partikel abu layang yang menyerupai bola.....	15
Gambar 2. 7 Skema pengikatan Pb ²⁺ dalam jaringan geopolimer	20
Gambar 2. 8 Penyerangan asam pada jaringan geopolimer	24
Gambar 2. 9 Ilustrasi perilaku partikel padatan dengan larutan dalam reaksi heterogen.....	27
Gambar 2. 10 Permodelan Kinetika Shrinking Particle Size	29
Gambar 2. 11 Ilustrasi laju kinetika <i>Progressive-Conversion Model</i>	30
Gambar 2. 12 Ilustrasi laju kinetika Shrinking-Core Model	31
Gambar 2. 13 Tahapan reaksi dengan menggunakan kinetika Shrinking-Core Mode.....	33
Gambar 2. 14 Sinyal refleksi dan transmisi dari pancaran elektron menuju sampel untuk pembacaan model SEM dan TEM	37
Gambar 3. 1 Pembacaan Line Scan pada sampel geopolimer.....	48
Gambar 4. 1 Kuat tekan geopolimer dengan variasi penambahan konsentrasi Pb ²⁺	55
Gambar 4. 2 Perbedaan kuat tekan geopolimer sebelum dan sesudah leaching	58
Gambar 4. 3 Konsentrasi ion Pb ²⁺ yang ter-leaching dengan lama waktu uji	59
Gambar 4. 4 Permukaan luar sampel geopolimer setelah pengujian leaching	61

Gambar 4. 5 Mikrograf SEM geopolimer penambahan Pb^{2+} (a) 1000, (b) 4000, (c) 8000, dan (d) 16000 ppm sebelum leaching dengan detektor SE dan BSE.	62
Gambar 4. 6 Mikrograf SEM geopolimer penambahan Pb^{2+} (a) 1000, (b) 4000, (c) 8000, dan (d) 16000 ppm sebelum leaching dengan detektor SE dan BSE.	64
Gambar 4. 7 Persebaran Pb^{2+} dalam geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} (a) 1000, (b) 4000, (c) 8000 dan (d) 16000 ppm sebelum dan setelah proses leaching	65
Gambar 4. 8 Profil Line Scan Pb^{2+} pada geopolimer dengan konsentrasi 1000 ppm sebelum leaching	66
Gambar 4. 9 Profil line scan Pb^{2+} pada geopolimer konsentrasi (a) 1000 dan (b) 4000 ppm setelah leaching (Tren A)	67
Gambar 4. 10 Profil line scan Pb^{2+} pada geopolimer konsentrasi (a) 8000 dan (b) 16000 ppm setelah leaching (Tren B)	69
Gambar 4. 11 Kinetika SCM dengan kontrol difusi lapisan antarmuka	71
Gambar 4. 12 Kinetika SCM dengan kontrol difusi lapisan padatan.....	71
Gambar 4. 13 Kinetika SCM dengan kontrol reaksi kimia pada permukaan inti	72
Gambar 4. 14 Grafik orde reaksi pada proses leaching Pb^{2+}	73
Gambar 4. 15 Ilustrasi mekanisme leaching Pb^{2+} pada geopolimer	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kriteria pembagian kelas abu layang sesuai ASTM (ASTM C618, 2015).....	16
Tabel 2. 2 Komposisi Kimia Abu Layang PT. IPMOMI (Supriadi, 2017).	17
Tabel 3. 1 massa $Pb(NO_3)_2$ yang digunakan.....	42
Tabel 3. 2 Komposisi pembuatan geopolimer	43
Tabel 4. 1 Rasio perbandingan mol dalam geopolimer	52
Tabel 4. 2 Kuat tekan geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} setelah proses leaching	55
Tabel 4. 4 Konsentrasi total ion Pb^{2+} yang ter-leaching pada akhir uji leaching	60
Tabel 4. 4 Nilai R^2 pada ketiga grafik persamaan kinetika kontrol	72

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dewasa ini, perkembangan pada sektor industri di Indonesia semakin meningkat. Hal tersebut juga diiringi dengan meningkatnya kebutuhan energi untuk menjalankan proses perindustrian tersebut. Kebutuhan energi yang sangat besar mendorong para pengusaha pada sektor industri beralih dari minyak bumi ke batubara sebagai bahan bakar untuk proses produksinya. Akibatnya, permintaan dan penggunaan batubara sebagai sumber bahan bakar meningkat drastis karena harganya yang murah dan melimpah (Munir, 2008). Pada tahun 2015, total produksi batubara nasional mencapai 461 juta ton dengan porsi ekspor batubara mencapai 365 juta ton dan porsi penggunaan dalam negeri mencapai 96 juta ton. Tercatat bahwa dari seluruh konsumsi batubara dalam negeri, sekitar 76,8 juta ton batubara digunakan oleh PLTU (Nugraha, 2017). Jika batubara tersebut dikonsumsi dan menghasilkan residu berupa abu rata-rata sekitar 8% (jumlah abu yang dihasilkan bisa mencapai 5-20%), maka total residu dari pembakaran batubara yang sebesar 6,14 juta ton yang dapat dihasilkan oleh PLTU dalam negeri. Dari abu pembakaran batubara, sekitar 80% merupakan abu layang dan sisanya sekitar 20% berupa abu dasar (Jala dan Goyal, 2006; Kumar dkk., 2018). Produksi abu layang akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan batubara sebagai sumber bahan bakar.

Abu layang sendiri merupakan hasil pembakaran batubara yang memiliki bentuk butiran halus berwarna abu-abu hingga coklat dengan ukuran partikel sekitar 45 μm . Pada akhir proses pembakaran batubara, abu layang memadat dengan cepat sehingga menghasilkan sekitar 90% kandungan abu layang berfasa amorf dan sisanya berfasa kristal (Rohilla dkk., 2018). Abu layang juga termasuk salah satu sumber aluminosilikat karena mempunyai

kandungan silika dan alumina yang cukup tinggi sekitar 50% SiO_2 dan 30% Al_2O_3 . Kandungan lain dari abu layang meliputi Fe_2O_3 , CaO , MgO dan K_2O . Selain logam oksida, abu layang juga memiliki kandungan logam berat antara lain Cr, Co, Sr, Pb, Ni, Ba, Sr, V dan Zn dalam jumlah yang signifikan (Yao dkk., 2015). Karena ukurannya yang sangat halus dan adanya kandungan logam berat tersebut maka abu layang masuk dalam golongan limbah Bahan Beracun dan Berbahaya (B3) sehingga tidak diperkenankan dibuang ke lingkungan tanpa adanya pengolahan terlebih dahulu. Salah satu cara pengolahan limbah abu layang adalah dengan menjadikan limbah tersebut menjadi material yang disebut geopolimer. Pengolahan abu layang menjadi geopolimer mampu mengurangi sifat B3 dari abu layang dengan merubah sifat fisika dan kimianya (Zhang dkk., 2008).

Geopolimer sendiri adalah polimer anorganik yang terdiri dari pencampuran sumber aluminosilikat sebagai material pengikat dengan alkali hidroksida pekat sebagai larutan basa aktivator yang diiringi dengan pengeringan pada suhu ruang atau sedikit tinggi berkisar 20-100°C (Duxson dkk., 2007). Pengolahan abu layang menjadi geopolimer selanjutnya dapat diaplikasikan untuk banyak hal, antara lain sebagai material bahan bangunan seperti pengganti OPC (*Ordinary Portland Cement*) dalam pembuatan beton, paving dan batako. Selain itu, abu layang dapat pula diaplikasikan sebagai pelapis dikarenakan memiliki sifat yang tahan panas (Bai dan Colombo, 2018; Fan dkk., 2018; Xia dan Sanjayan, 2016). Geopolimer memiliki sifat-sifat yang lebih unggul jika dibandingkan dengan OPC, antara lain memiliki sifat mekanik yang tinggi, durabilitas/ketahanan dalam lingkungan ekstrim yang tinggi, dan memiliki umur yang lebih panjang. Selain itu, kelebihan geopolimer adalah memiliki kemampuan memperangkap logam berat dalam jaringannya. Kemampuan inilah yang membuat sifat B3 dari abu layang berkurang ketika diolah menjadi geopolimer.

Kemampuan geopolimer dalam mempertahankan unsur logam berat yang terjebak dalam matriks jaringan disebut dengan amobilisasi. Proses amobilisasi logam berat dalam geopolimer dapat terjadi melalui 2 tahap, yaitu terjadi secara enkapsulasi (pemerangkapan) fisik dan pembentukan ikatan kimia (Wang dkk., 2018). Kemampuan amobilisasi dapat dilihat dari jumlah logam berat yang dapat terlepas (*ter-leaching*) dari geopolimer menuju ke lingkungan. Semakin rendah jumlah logam berat yang keluar dari jaringan geopolimer, maka semakin bagus kemampuan amobilisasi logam berat dari geopolimer tersebut.

Dalam beberapa dekade, kemampuan amobilisasi logam berat dalam geopolimer sudah banyak diteliti oleh para peneliti. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi amobilisasi logam berat dalam geopolimer antara lain jenis logam berat yang teramobilisasi, komposisi penyusun geopolimer, dan pH lingkungan. Keberadaan logam berat dalam jaringan geopolimer ternyata memberikan efek terhadap sifat geopolimer yang dihasilkan, terutama sifat mekanik geopolimer. Oleh karena itu, penambahan konsentrasi logam berat dalam geopolimer akan mempengaruhi kuat tekan dari geopolimer (Fansuri dkk., 2015). Dalam penelitian sebelumnya, geopolimer yang disintesis dari abu layang PT. IPMOMI mampu mengamobilisasi ion Pb^{2+} sebesar 765 ppm relatif terhadap jumlah abu layang yang digunakan. Penambahan konsentrasi ion Pb^{2+} tersebut tidak mengganggu sifat mekanik (kuat tekan) dari geopolimer yang dihasilkan (Supriadi dkk., 2016). Namun demikian, dalam pengaplikasian geopolimer sebagai material pengganti bahan bangunan, perlu diketahui kinetika pelepasan ion logam berat (*leaching*) dari matriks geopolimer agar tidak membahayakan lingkungan jika diterapkan dalam jangka panjang.

1.2. Rumusan Masalah

Kinetika *leaching* ion logam berat dari geopolimer perlu diketahui untuk pengaplikasian geopolimer sebagai material pengganti bahan bangunan dalam jangka panjang. Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana model kinetika *leaching* ion Pb^{2+} dalam geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI?
2. Bagaimana efisiensi amobilisasi ion Pb^{2+} dalam geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI.
3. Bagaimana mekanisme *leaching* ion Pb^{2+} yang terjadi dalam geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI?

1.3. Batasan Penelitian

Batasan-batasan yang diterapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Penggunaan abu layang PT. IPMOMI sebagai sumber aluminosilikat dalam sintesis geopolimer.
2. Komposisi campuran yang digunakan dalam sintesis geopolimer merujuk pada penelitian sebelumnya (Supriadi, 2017).
3. Ion logam berat yang ditinjau dalam penelitian ini adalah Pb^{2+} .
4. Lingkungan saat proses *leaching* diatur memiliki nilai pH 5, sesuai dengan nilai pH rata-rata pada kondisi tanah.
5. Perendaman geopolimer pada saat *leaching* menggunakan asam organik, yaitu larutan buffer asetat

1.4. Tujuan Penelitian

Secara garis besar, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kinetika *leaching* logam berat dari geopolimer yang nantinya akan digunakan sebagai material pengganti bahan bangunan dalam jangka panjang. Adapun uraian dari tujuan penelitian ini adalah :

1. Mengetahui model kinetika *leaching* ion Pb^{2+} dalam geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI.
2. Mengetahui efisiensi amobilisasi ion Pb^{2+} dalam geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI.
3. Mengetahui mekanisme *leaching* ion Pb^{2+} yang terjadi dalam geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI.

1.5. Manfaat Penelitian

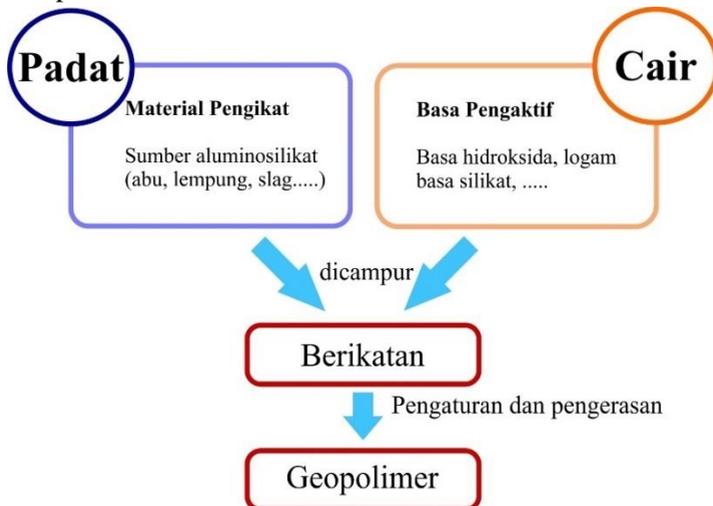
Dari hasil penelitian ini diharapkan memberikan informasi mengenai kinetika *leaching* ion logam berat Pb^{2+} dalam geopolimer, sehingga dapat diprediksi efek penggunaan jangka panjang geopolimer yang mengandung ion logam Pb^{2+} terhadap lingkungan pada kondisi asam. Selain itu, diharapkan juga dapat memberikan informasi tentang efisiensi amobilisasi dan mekanisme *leaching* ion Pb^{2+} dalam geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI, sesuai *mix design* geopolimer yang sudah diteliti sebelumnya.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PSUTAKA

2.1 Geopolimer

Istilah geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits pada tahun 1978. Geopolimer berasal dari kata “geo” yang menunjukkan material anorganik aluminosilikat berbasis material geologis dan kata “polimer” yang berarti rantai panjang. Secara umum, geopolimer adalah material polimer anorganik aluminosilikat yang terbentuk dari pencampuran sumber aluminosilikat dan larutan basa aktivator yang diiringi oleh proses pengeringan pada suhu ruang atau suhu yang sedikit tinggi berkisar 20-100°C. Reaksi pembentukan geopolimer disebut reaksi geopolimerisasi (Singh dkk., 2015) yang secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.1.



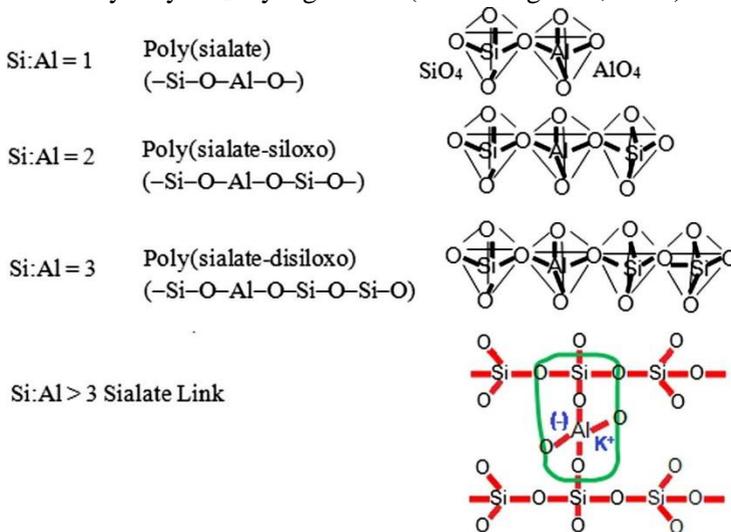
Gambar 2. 1 Skema diagram pembentukan geopolimer (Yun-Ming dkk., 2016)

Geopolimer memiliki komposisi kimia yang menyerupai zeolit tetapi memiliki struktur 3 dimensi yang amorf dengan

jaringan polimerik Si-O-Al. Tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan tetrahedral $[\text{AlO}_4]^{5-}$ akan saling berikatan dengan berbagi atom oksigen. Dalam jaringan tersebut, Al akan masuk kedalam tetrahedral Si yang dijembatani oleh O, memiliki bilangan koordinasi 4 sehingga membuat Al bermuatan negatif. Muatan negatif pada Al akan diseimbangkan oleh kation seperti Na^+ , K^+ , NH_4^+ dan H_3O^+ . Kehadiran ion penyeimbang tersebut sangat penting untuk mempertahankan ketetrelan struktur geopolimer. secara terminologi, struktur geopolimer dapat dikategorikan menjadi 3 bentuk dasar geopolimer tergantung dari rasio Si/Al, yaitu *poly(sialate)*, *poly(sialate-siloxo)*, dan *poly(sialate-disiloxo)* seperti pada Gambar 2.2. Rumus empirik dari geopolimer secara umum adalah sebagai berikut:

$$M_n (-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2)_n \cdot w\text{H}_2\text{O} \quad (2.1)$$

dimana “M” adalah kation monovalen, “n” adalah derajat polikondensasi, “z” adalah banyaknya Si dalam satu rantai dan “w” adalah banyaknya H_2O yang terikat (Yun-Ming dkk., 2016).



Gambar 2. 2 Macam struktur dasar jaringan geopolimer
(Davidovits, 2002)

2.1.1 Sumber Aluminosilikat

Aluminosilikat merupakan salah satu komponen penting dalam pembuatan geopolimer dikarenakan kandungannya yang kaya akan alumina (Al_2O_3) dan silika (SiO_2) sebagai kerangka utama dalam jaringan geopolimer. Banyak macam bahan baku yang telah digunakan dalam sintesis geopolimer. Pada awal pengembangan geopolimer, kaolinit digunakan untuk mensintesis geopolimer. Kemudian, penelitian diperluas pada bahan baku yang lain seperti tanah liat yang terkalsinasi, limbah industri, *water glass*, *slag*, abu layang sisa dari pembakaran batu bara dan masih banyak lagi yang lain baik aluminosilikat alami maupun buatan (seperti zeolit, bubuk murni Al_2O_3 - SiO_2 , dan lain-lain) (Cheng dan Chiu, 2003; Kong dkk., 2007).

Sumber aluminosilikat sendiri yang terdiri dari alumina dan silika dapat ditemukan di dalam kerak bumi dengan melimpah. Sumber aluminosilikat tersebut berperan penting dalam pembentukan geopolimer sebagai sumber ion Al^{3+} dan ion Si^{4+} yang penting dalam sistem ikatan geopolimer. Senyawa SiO_2 dan Al_2O_3 yang terkandung dalam sumber aluminosilikat dalam fasa amorf lebih reaktif ketika proses geopolimerisasi berlangsung (Cioffi dkk., 2003).

2.1.2 Larutan Basa Pengaktif

Basa pengaktif memiliki peran sebagai pengaktif prekursor (sumber aluminosilikat) dengan melarutkan unsur Si dan Al yang terdapat dalam prekursor menjadi unit tetrahedral AlO_4^{5-} dan SiO_4^{4-} dan membuat spesi-spesi tersebut mengalami polikondensasi untuk membentuk jaringan geopolimer. Semakin kuat larutan basa pengaktif (tinggi nilai pH yang dimiliki larutan basa pengaktif), semakin mudah melarutkan unsur Si dan Al dalam prekursor menjadi unit tetrahedralnya. Basa pengaktif yang biasanya digunakan adalah pencampuran basa alkali yang memiliki

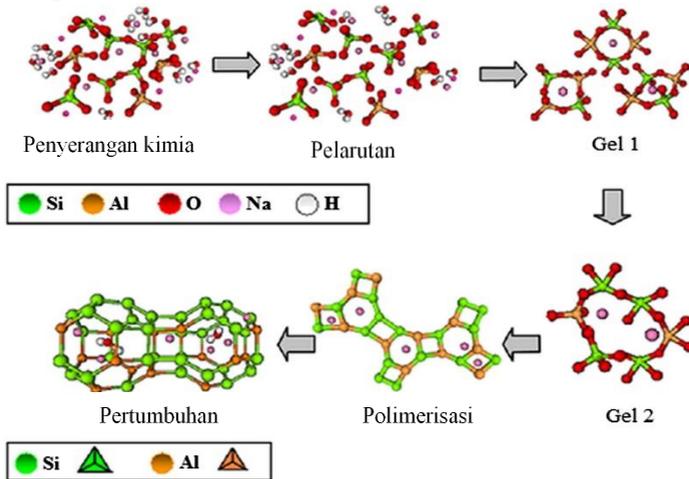
kation natrium (Na^+) atau kalium (K^+) dengan penambahan natrium silikat (Na_2SiO_3) atau potasium silikat (K_2SiO_3). Ion alkali yang disediakan basa alkali dan alkali silikat tersebut berfungsi sebagai penyeimbang muatan dalam jaringan geopolimer (Yip dkk., 2005). Banyak peneliti mengungkapkan bahwa sumber aluminosilikat lebih cepat larut dalam larutan basa pengaktif berbasis kation natrium (Na^+) daripada kation kalium (K^+). Ukuran kation Na^+ yang lebih kecil daripada kation K^+ membuatnya lebih berikatan dengan ion silikat dan ion aluminat untuk membentuk oligomer yang berukuran kecil. Alasan lain banyaknya penelitian geopolimer dengan penggunaan larutan basa pengaktif berbasis Na^+ adalah karena lebih ekonomis (Yun-Ming dkk., 2016).

Penambahan alkali silikat seperti natrium silikat (Na_2SiO_3) bertujuan untuk meningkatkan spesi Si dalam komposisi geopolimer. hal tersebut akan meningkatkan rasio Si/Al dari geopolimer. Selain itu, penambahan natrium silikat juga dapat berfungsi sebagai penyedia ion natrium (Na^+), menghasilkan porositas rendah dan sistem pori yang lebih kecil dalam matriks geopolimer (Zhuang dkk., 2016).

2.1.3 Reaksi Geopolimerisasi

Reaksi yang berlangsung selama proses pembentukan jaringan geopolimer biasanya disebut dengan reaksi geopolimerisasi. Reaksi geopolimerisasi adalah reaksi kimia dimana terjadi sebagian atau seluruh sumber aluminosilikat menjadi spesi-spesi Al dan Si yang kemudian membentuk jaringan polimerik 3 dimensi (Provis dan van Deventer, 2007). Banyak peneliti berpendapat bahwa pembentukan geopolimer meliputi pelarutan spesi Al dan Si dari permukaan sumber aluminosilikat, polimerisasi permukaan gugus aktif dan spesi yang terlarut menjadi bentuk gel, dan yang terakhir adalah pengerasan dari bentuk gel menjadi bentuk padatan yang kaku (Siyal dkk., 2016). Skema

pembentukan jaringan geopolimer pada saat geopolimerisasi dapat dilihat pada Gambar 2.3.



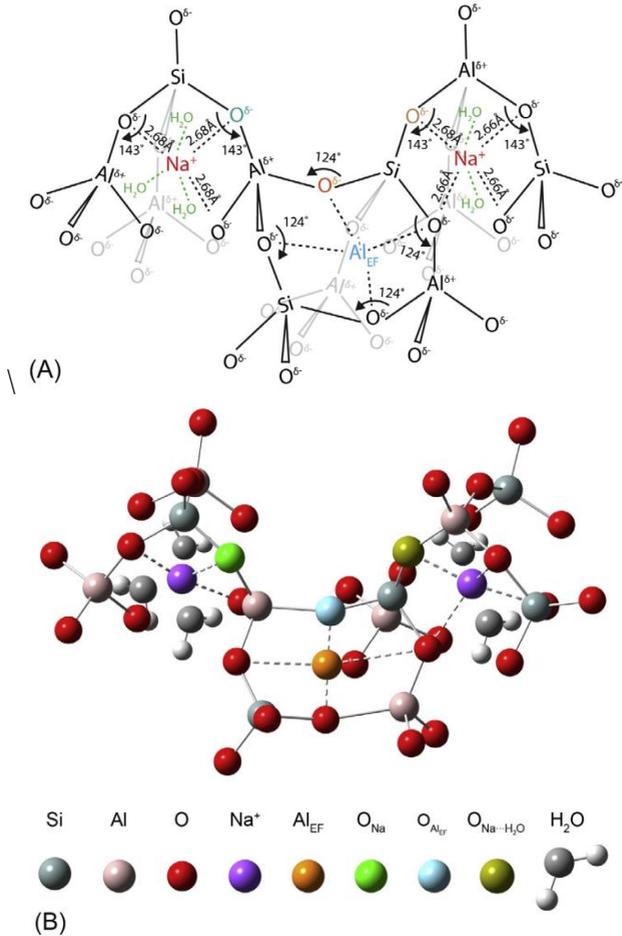
Gambar 2. 3 Skema reaksi geopolimerisasi (Duxson dkk., 2007)

Pada reaksi geopolimerisasi, nanostruktur yang dihasilkan berupa M-A-S-H dimana M adalah kation dari basa alkali (natrium atau kalium), berbeda dengan semen OPC yang memiliki nanostruktur C-S-H (kalsium silikat hidrat) sebagai hasil dari reaksi hidrasi. Menurut Dimas dkk., (2009), pengaktifan aluminosilikat oleh basa pengaktif dianggap melalui 4 tahap, yaitu

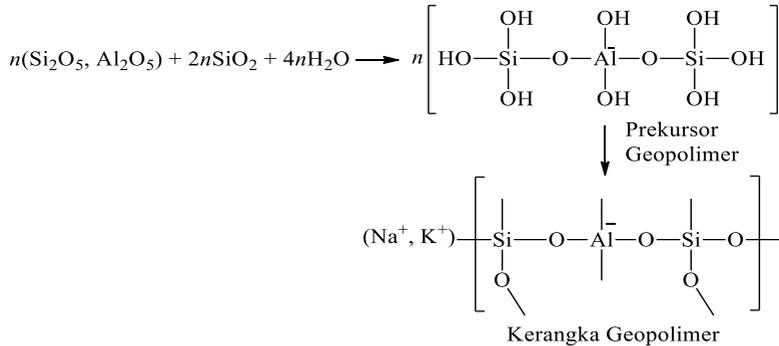
1. Pelarutan aluminosilikat dalam basa pengaktif pekat
2. Penataulangan dan penggabungan ion-ion terlarut dengan pembentukan struktur koagulan yang kecil (nukleasi)
3. Polikondensasi membentuk aluminosilikat berfasa gel
4. Perubahan menjadi keadaan padat dan pengerasan untuk membentuk padatan yang keras

Hidrolisis alkali dan pelarutan dari prekursor aluminosilikat tergantung pada kondisi aktivasi, nilai pH dari larutan aktivator, dengan semakin tinggi pH larutan aktivator maka akan semakin meningkatkan laju pelarutannya (Duxson dkk., 2007).

Selain itu, besar pelarutan juga bergantung pada kehalusan, kapabilitas pertukaran ion, konsentrasi alkali dan struktur dari prekursor.



Gambar 2. 4 (A) Model struktur geopolimer dengan formasi gel N-A-S-H, dengan oksigen sebagai jembatan penghubung dan Na⁺ sebagai penyeimbang muatan. (B) Representasi 3D dari bagian gel N-A-S-H yang terpolimerisasi (Nicolas dkk., 2017).



Gambar 2. 5 Mekanisme penyusunan jaringan geopolimer

Gambar 2.5 menggambarkan penyusunan jaringan geopolimer dengan kation alkali dan ion hidroksi dari larutan basa aktivator yang memulai jalannya reaksi geopolimerisasi. Ion hidroksi akan menyerang ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al, membentuk kompleks intermediet $\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, juga anion oligomer yang mengandung ikatan Si-O^- dan Al-O^- . Muatan negatif pada anion tersebut terstabilkan oleh adanya kation logam alkali dari basa aktivator, dan membentuk ikatan $\text{Si-O}^-\text{Na}^+$ dan $\text{Al-O}^-\text{Na}^+$ sehingga dapat terhindar dari pembentukan kembali ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al melalui reaksi balik (*reverse reaction*) (Provis dan Bernal, 2014). Setelah pelarutan aluminosilikat, larutan berubah menjadi slarutan super jenuh dikarenakan laju aluminosilikat amorf yang sangat cepat. Hal tersebut akan memicu terjadinya koagulasi membentuk ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al yang baru melalui kondensasi $\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Setelah dimer inti terbentuk, dimer tersebut dan $\text{Si}(\text{OH})_4$ yang lain mulai bereaksi, dan terjadi polikondensasi membentuk jaringan 3 dimensi (Provis dan van Deventer, 2009). Polimerisasi kondensasi yang terjadi mengarahkan pada presipitasi fasa solid dan kristalisasi dari jaringan 3 dimensi. Air yang digunakan selama hidrolisis alkali terlepas melalui reaksi kondensasi dan ada yang sebagian tinggal/terperangkap dalam pori jaringan 3 dimensi gel

aluminosilikat. Jaringan 3 dimensi aluminosilikat tersebut secara kontinyu terpolimeriasi, lama kelamaan akan menghasilkan jaringan 3 dimensi yang terhubung kuat (Bakharev, 2005a).

Reaksi geopolimerisasi untuk membentuk struktur yang keras/kompak, umumnya terbentuk sekitar 24 jam, tetapi kesetimbangan efektif dalam sistem tersebut dapat mencapai sekitar 6 bulan. Perlu diketahui, kesetimbangan efektif reaksi geopolimer dapat dianggap jika laju reaksi dalam sistem cukup lambat sehingga dapat diabaikan, sambil kesetimbangan asli terjadi jika kondisi kristalin sudah didapatkan. Kinetika reaksi dipengaruhi oleh banyak parameter yang berhubungan dengan kondisi pematangan (*curing*) dan bahan dasar, biasanya suhu *curing* dan sifat dari alkali aktivator (Criado dkk., 2005). Fase kristalin yang terdapat dalam bahan dasar (abu layang) seperti kuarsa dan mulit yang terbentuk pada suhu tinggi saat pembakaran batubara secara umum dianggap tidak dapat bereaksi dalam proses geopolimerisasi. Hal tersebut dikarenakan laju reaksi dari fasa kristal tersebut terlalu lambat jika dibandingkan dengan fasa amorf aluminosilikat. Akibatnya, fasa kristal yang terdapat dalam bahan dasar seperti abu layang, akan terdapat kembali dalam geopolimer walaupun telah melalui geopolimerisasi. Perbedaan laju reaksi antara fasa kristalin dan fasa amorf saat geopolimerisasi dikarenakan pada fasa amorf, ikatan antara Si dan O sangat renggang dan cacat. Hal tersebut membuat fasa amorf menjadi lebih lemah untuk diserang oleh basa alkali (semakin mudah bereaksi dengan basa alkali) (Lloyd dkk., 2009).

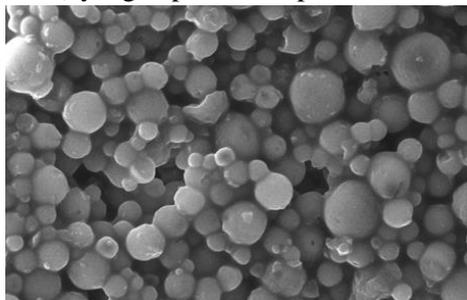
2.1.4 Sifat Geopolimer

Geopolimer merupakan material perekat dengan struktur polimer anorganik aluminosilikat yang mempunyai sifat mekanik, fisika dan kimiawi yang baik jika dibandingkan dengan material perekat biasa atau semen portland. Salah satu parameter utama

dalam sifat mekanik geopolimer adalah kuat tekan (*compressive strength*). Kuat tekan geopolimer dapat diukur pada usia 7 hari dan terus bertambah hingga mencapai kuat tekan optimal pada umur 28 hari. Pada usia geopolimer setelah 28 hari, kuat tekan yang ditunjukkan mengalami kenaikan yang tidak terlalu signifikan (B. Lee dkk., 2017). Geopolimer memiliki sifat ketahanan terhadap asam yang lebih kuat dibandingkan dengan semen OPC. Sistem jaringan N-A-S-H atau N-S-H pada geopolimer mampu menahan serangan asam kuat jika dibandingkan sistem jaringan C-S-H pada semen OPC (Bakharev, 2005b). Geopolimer juga memiliki sifat tahan api (Cheng dan Chiu, 2003), tahan panas (Subaer dan Riessen, 2007), dan mampu mengambobilisasi logam berat

2.2 Abu Layang

Abu layang adalah residu halus yang dihasilkan dari pembakaran bongkahan batubara maupun serbuk batubara yang diangkut oleh gas buang dari zona pembakaran menuju sistem penghilangan partikel. Abu layang yang terbawa gas buang tersebut dikumpulkan secara mekanis maupun secara elektrostatis menggunakan presipitator elektrostatis. Partikel abu layang biasanya berbentuk bulat, lebih halus dari semen Portland dan kapur, dengan diameter mulai dari 1 μm hingga 150 μm (Hardjito dan Rangan, 2005) yang dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Partikel abu layang yang menyerupai bola (Ebin dan Gurmen, 2010)

Karakteristik kimia dan fisika abu layang bergantung pada metode pembakaran batubara, sumber batubara, suhu pembakaran, dan bentuk partikel. Komposisi kimia dari abu layang didominasi oleh oksida silikon (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), besi (Fe_2O_3), dan kalsium (CaO). Adapun logam oksida magnesium, natrium, kalium, titanium dan sulfur sebagai komposisi kimia minor dari abu layang. Komposisi kimia mayor abu layang dipengaruhi oleh kandungan batubara. Pembakaran batubara semi-bituminus menghasilkan abu layang yang mengandung lebih banyak kalsium dan lebih sedikit besi daripada abu layang hasil pembakaran batubara bituminus (G. Xu dan Shi, 2018).

Menurut kandungan kimianya, abu layang dibedakan menjadi 2 kelas yaitu abu layang kelas C dan abu layang kelas F seperti pada Tabel 2.1. Abu layang kelas C atau biasa disebut abu layang tinggi kalsium memiliki kandungan CaO mencapai lebih dari 20%, sedangkan abu layang kelas F atau biasa disebut abu layang rendah kalsium memiliki kandungan CaO sekitar 10% dan didominasi fasa amorf dari alumino-silikat (Hower dkk., 2017).

Tabel 2. 1 Kriteria pembagian kelas abu layang sesuai ASTM C618

Spesifikasi kimia	Abu layang kelas F	Abu layang kelas C
Silikon dioksida, aluminium oksida, besi oksida ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), min%	70	50
Sulfur trioksida (SO_3), maks%		
Kandungan air, maks%	5,0	5,0
<i>Loss on ignition</i> , maks%	3,0	3,0
	6,0	6,0

(American Standard Testing and Material, 2015)

Abu layang yang digunakan sebagai sumber aluminosilikat dalam penelitian ini didapatkan dari PT. IPMOMI. Pada penelitian Supriadi (2017), abu layang PT. IPMOMI telah

dikarakterisasi menggunakan XRF dan menunjukkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Komposisi Kimia Abu Layang PT. IPMOMI.

Senyawa	Kandungan (%)
SiO ₂	50,67
Al ₂ O ₃	13,76
CaO	12,7
MgO	6,26
Na ₂ O	0,19
K ₂ O	1,28
TiO ₂	0,76
Fe ₂ O ₃	11,99
MnO ₂	0,14
S ₂ O	0,63
P ₂ O ₅	0,08
<i>Loss of Ignation</i>	1,42

(Supriadi, 2017)

Dari tabel diatas, abu layang PT. IPMOMI memiliki kandungan yang didominasi oleh SiO₂, yaitu sebesar 50,67% dan diikuti kandungan Al₂O₃ sebesar 13,76%. Kandungan kalsium (CaO) dalam abu layang PT. IPMOMI sebesar 12,7%, sehingga abu layang PT. IPMOMI dapat dikategorikan sebagai abu layang kelas F (*low-calcium fly ash*) dikarenakan kandungan CaO yang kurang dari 20%.

2.3 Timbal (Pb)

Timbal (Pb) merupakan salah satu jenis logam berat dengan nama ilmiah *plumbum* yang sering juga disebut dengan istilah timah hitam. Logam Pb dapat ditemukan secara alami pada kerak bumi dan sering digunakan dalam industri kimia seperti pembuatan baterai dan industri pewarnaan pada cat. Logam Pb

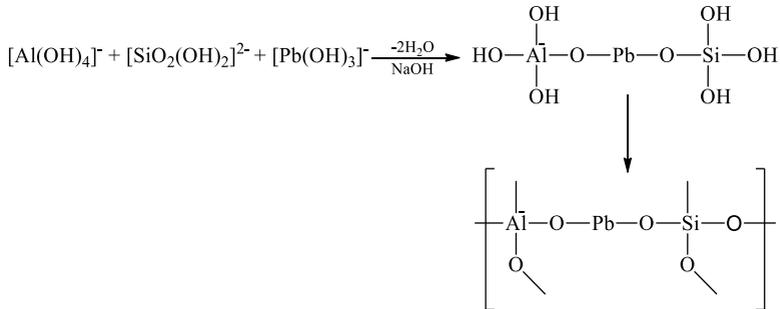
memiliki karakteristik fisik yang lunak, berwarna coklat kehitaman, tahan terhadap korosi atau karat, titik leleh 327°C dan titik didih 1620°C. Logam Pb termasuk dalam kelompok golongan IV-A pada tabel periodik unsur kimia dengan nomor atom 82, massa atom 207,2 dan kerapatan 11,34 g/cm³. Logam Pb memiliki konfigurasi elektron [54Xe] 4f¹⁴ 5d¹⁰ 6s² 6p² dengan elektron valensi sebesar 4 serta memiliki bilangan oksidasi +2 dan +4 dengan bilangan oksidasi +2 yang lebih stabil jika dibandingkan dengan +4. Pada suhu 500-600°C, Pb akan menguap dan bereaksi dengan oksigen dan membentuk senyawa PbO berwarna kuning. bentuk timbak oksida yang lain adalah PbO₂ berwarna coklat dan Pb₃O₄ berwarna merah (Sugiyarto, 2001).

2.4 Amobilisasi Logam Berat

Amobilisasi merupakan salah satu cara yang paling efektif untuk penanggulangan potensi bahaya dari material yang beracun seperti logam berat. Teknik amobilisasi logam berat mampu mereduksi potensi perpindahan logam berat dengan mengubah sifat kimia dan fisika dari limbah logam berat itu sendiri. Sudah banyak metode amobilisasi logam berat yang telah dikembangkan beberapa tahun terakhir, seperti solidifikasi/stabilisasi berbasis semen, solidifikasi/stabilisasi berbasis geopolimer, vitrifikasi, karbonasi, enkapsulasi aspal, COSMOS (*Colloidal Silica Medium to Obtain Safe Inert*), sintering, dan masih banyak lain (Guo, Liu, dkk., 2017). Diantara metode-metode tersebut, amobilisasi logam berat dengan metode solidifikasi/stabilisasi berbasis material geopolimer memiliki keuntungan yang lebih daripada metode lain. Geopolimer sebagai material solidifikasi/stabilisasi logam berat dapat disintesis pada suhu rendah, berkisar 10-100 °C sehingga memudahkan dan hemat energi untuk amobilisasi logam berat (Khalil dan Merz, 1994; Provis, 2009). Logam berat yang teramobilisasi dalam jaringan geopolimer terjadi menjadi 3 mekanisme, yaitu:

1. Pertukaran ion logam berat dengan Na^+ atau K^+ sebagai kation penyeimbang muatan negatif pada tetrahedral Al dalam matriks geopolimer. Penggantian kation penyeimbang tersebut dengan ion logam berat mampu mempengaruhi kuat tekan dari geopolimer, tergantung dari jari-jari ion logam berat yang menggantikannya. Semakin besar jari-jari ion logam pengganti, maka struktur tetrahedral menjadi membesar. Fenomena tersebut dapat dijelaskan melalui teori ikatan ion (*ion-pair theory*). Hal ini juga bisa disebut dengan enkapsulasi fisik ion Pb^{2+} dalam jaringan geopolimer (H. Xu dan Van Deventer, 2000). Mekanisme ini bisa disebut dengan enkapsulasi fisik (El-Eswed dkk., 2017)
2. Logam berat membentuk ikatan kovalen dengan jaringan aluminosilikat geopolimer. Pb^{2+} akan bereaksi dengan spesi Si atau Al membentuk Pb-O-Si atau Pb-O-Al pada saat geopolimerisasi seperti pada Gambar 2.7. Senyawa timbal nitrat sebagai sumber Pb^{2+} akan larut dalam larutan aktivator, dan membentuk kompleks mononukleat atau polinukleat seperti $[\text{Pb}(\text{OH})_3]^-$ atau $[\text{Pb}_3(\text{OH})_4]^-$. Monomer tersebut akan bereaksi dengan monomer $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ dan $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, dan berpolimerisasi membentuk kerangka jaringan geopolimer (Guo, dkk., 2017). Pb^{2+} akan terikat secara kovalen dengan Si dan Al melalui jembatan oksigen pada jaringan geopolimer. Mekanisme tersebut bisa dikatakan sebagai stabilisasi kimia atau enkapsulasi kimia dalam amobilisasi logam Pb^{2+} (El-Eswed dkk., 2017; Nikolic dkk., 2018)
3. Amobilisasi logam berat dengan pembentukan senyawa baru dalam bentuk hidroksida, karbonat, aluminat dan silikatnya (El-Eswed dkk., 2017). Pb^{2+} akan bereaksi dengan spesi Si, membentuk senyawa kristalin Pb_3SiO_5

(Guo, Liu, dkk., 2017; Palacios dan Palomo, 2004). Dengan terbentuknya senyawa tersebut, spesi Si yang seharusnya menjadi kerangka utama dalam sistem N-A-S-H geopolimer menjadi berkurang dan akibatnya bisa menurunkan kuat tekan geopolimer.



Gambar 2. 7 Skema pengikatan Pb^{2+} dalam jaringan geopolimer (Guo, Pan, dkk., 2017)

Pembentukan ion kompleks hidroksil juga mengakibatkan peningkatan viskositas dan penurunan alkalinitas. Pb^{2+} berlebih juga akan meningkatkan kandungan M-O (M = kation Pb^{2+}) yang mampu mempercepat waktu setting geopolimer (Arnoult dkk., 2018; Krisbiantoro, 2015). Hal tersebut akan mempengaruhi pelarutan Si dan Al dalam abu layang pada saat geopolimerisasi. Akibatnya, reaksi geopolimersiasi menjadi terganggu dan pembentukan kerangka jaringan tetrahedral $[\text{SiO}_4]$ dan $[\text{AlO}_4]$ menjadi terganggu (Wang dkk., 2018).

Peningkatan viskositas dan penurunan alkalinitas pada saat pencampuran sumber aluminosilikat dengan basa aktivator dapat mempengaruhi laju geopolimerisasi. Alkalinitas yang rendah tidak mampu melarutkan semua spesi Si dan Al terdapat dalam abu layang. Akibatnya, spesi silikat $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ dan aluminat $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ sedikit yang terbentuk, dan kerangka jaringan Si-O-Si atau Si-O-Al dalam geopolimer sedikit yang terbentuk. Selain itu, viskositas

yang tinggi juga mengganggu difusi larutan basa aktivator maupun spesi-spesi kimia untuk saling bereaksi, mengakibatkan sedikitnya spesi-spesi tersebut untuk bereaksi. Meningkatnya waktu seting (semakin cepat waktu seting) memungkinkan terbentuknya beberapa struktur cacat (*defect structure*) dikarenakan terbatasnya difusi spesi-spesi kimia melalui matriks geopolimer sebagai akibat cepat mengerasnya geopolimer. Selain itu, reaksi geopolimerisasi yang terlalu cepat dapat menimbulkan campuran yang tidak homogen dalam jaringan geopolimer, sehingga dapat menimbulkan cacat struktur. Performa terbaik amobilisasi logam berat dalam geopolimer dapat dicapai untuk spesi kimia tertentu karena geopolimer memiliki sifat unggul seperti kelimpahan pori yang sangat kecil, permeabilitas yang rendah, alkalinitas yang sangat tinggi, stabilitas kimia yang baik, dan mikrostruktur tiga dimensi (Malviya dan Chaudhary, 2006; Palomo dan de la Fuente, 2003).

2.5 Faktor Efisiensi Amobilisasi Logam Berat dalam Geopolimer

Amobilisasi logam berat dalam geopolimer tidak hanya bergantung pada kelarutan endapan logam berat, tetapi juga pada permeabilitas monolit sebagai fungsi dari struktur pori dan jumlah air yang terkandung dalam limbah logam berat. Sebagai akibatnya, semua faktor yang dapat mengubah kelarutan endapan logam dan permeabilitas matriks geopolimer mungkin memiliki pengaruh terhadap efisiensi amobilisasi akhir logam berat. Adapun 3 faktor yang mempengaruhi efisiensi amobilisasi logam berat dari geopolimer, antara lain:

1. Karakteristik dari sumber aluminosilikat penyusun geopolimer. Karakteristik dari bahan mentah (aluminosilikat) akan mempengaruhi karakteristik dari geopolimer yang dihasilkan. Semakin banyak Si dan Al

yang terbebas dari bahan mentah akan menghasilkan geopolimer yang ampu mengamobilisasi logam berat lebih baik.

2. Nilai pH dan tipe basa aktivator memiliki peranan terbesar dalam efisiensi amobilisasi logam berat dari geopolimer. Peningkatan nilai pH akan mengarahkan pada reduksi ukuran pori dan permeabilitas matriks geopolimer.
3. Karakteristik dan bentuk logam berat. Hal tersebut menjadi salah satu faktor dikarenakan jari-jari atom logam berat memiliki peran yang cukup penting. Jari-jari atom atau ukuran atom logam berat akan menempati rongga dalam matriks geopolimer. Stabilitas dari logam berat dalam geopolimer dapat dipengaruhi dari sifat kimia dari sumber senyawa kontaminan. Jika senyawa logam berat yang ditambahkan dalam geopolimer memiliki sifat beracun, mudah bergerak (*mobile particle*), dan mudah terlarut biasanya dapat menurunkan efisiensi amobilisasi logam berat dalam geopolimer.

(Vu dan Tran, 2018)

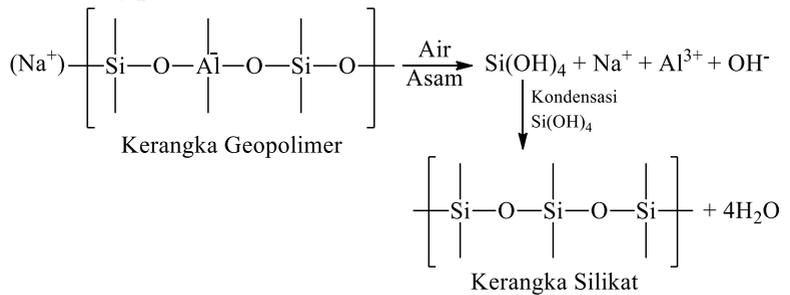
Selain itu, anion yang dibawa oleh sumber kontaminan juga memiliki peran dalam amobilisasi logam berat. Macam-macam anion yang dapat mengganggu amobilisasi tersebut adalah nitrat (NO_3^-), sulfat (SO_4^{2-}), sulfida (S^{2-}), klorida (Cl^-), dan karbonat (CO_3^-). Keberadaan Anion NO_3^- berlebih dapat mempengaruhi proses geopolimerisasi, khususnya dapat memberikan efek pada larutan basa aktivator. Anion NO_3^- akan bereaksi dengan kation Na^+ dari larutan basa aktivator pada saat reaksi geopolimerisasi berlangsung. Akibatnya, gel yang terbentuk pada saat geopolimerisasi menjadi sedikit dan tidak terkoneksi secara merata (Lancellotti dkk., 2015; Lee dan van Deventer, 2002; Zhang dkk., 2008). Hal ini akan mengakibatkan penurunan kuat tekan geopolimer yang disebabkan oleh NO_3^- berlebih.

2.6 Leaching

Pelindian (*leaching*) merupakan suatu peristiwa atau proses ekstraksi suatu konstituen/spesi kimia yang terlarut dari padatan dengan menggunakan pelarut cair. Metode ekstraksi padat-cair (*leaching*) dipengaruhi beberapa hal, antara lain adalah jumlah konstituen/spesi yang tersebar dalam padatan, sifat padatan, dan ukuran konstituen/spesi. Di dalam padatan, konstituen/spesi yang paling dekat dengan permukaan yang kontak dengan pelarut akan lebih mudah terlindih sehingga meninggalkan pori dalam padatan tersebut. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi proses *leaching* suatu konstituen/spesi dalam padatan, antara lain ukuran partikel, pelarut, suhu dan agitasi fluida dari pelarut. Ukuran partikel konstituen mempengaruhi laju dalam proses *leaching*. Ukuran partikel yang kecil memiliki area antarmuka yang lebih besar antara padatan dan larutan dan memiliki laju transfer material yang besar. Besarnya interaksi antara partikel konstituen dan pelarut sebanding dengan laju pelindihan (*leaching*). Pelarut juga memiliki peranan penting dalam pelindihan. Pelarut yang digunakan harus selektif dan memiliki viskositas yang rendah agar dapat mengalir dengan bebas. Semakin besar viskositas pelarut, maka akan semakin sulit pelarut berinteraksi dan berdifusi ke dalam padatan. Suhu pada proses *leaching* juga mempengaruhi laju ekstraksi. Kelarutan dari material atau partikel akan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu proses *leaching*. Agitasi dari pelarut juga penting karena hal tersebut meningkatkan difusi dan transfer partikel dari permukaan menuju ke pelarut (Richardson dkk., 2002). Efisiensi amobilisasi logam berat dalam geopolimer pada dasarnya ditentukan dengan kekuatan dan ketahanan pelindian (*leaching*). Perubahan kekuatan mekanik dari geopolimer dianggap sebagai indikator dalam solidifikasi logam berat, sedangkan tes pelindihan (*leaching test*) merupakan indikator yang penting untuk menilai derajat stabilisasi logam berat

dalam jaringan geopolimer (Pereira dkk., 2009). Metode dalam mengukur efisiensi logam berat yang terlindih dalam geopolimer dengan alkalinitas tinggi salah satunya adalah metode TCLP (*Toxic Characteristic Leaching Test*). Metode TCLP sering digunakan untuk mengetahui resistensi pelindihan logam berat dalam geopolimer (solidifikasi/stabilisasi solid) pada kondisi asam dikarenakan memiliki kapasitas netralisasi asam yang cukup tinggi dan menunjukkan hasil terbaik (konsisten) dari semua metode pengujian pelindihan yang ada (ANSI/ANS 16.1, MCC1-P, dan EN 12457) (Garrabrants dkk., 2010).

Proses *leaching* dalam penelitian ini bisa disebut juga dengan penyerangan asam pada geopolimer yang dapat dilihat pada Gambar 2.8. Larutan asam mampu memutus jaringan Si-O-Al dan Si-O-Si sehingga mengakibatkan deteriorasi (penurunan mutu), dapat melepaskan kation penyeimbang (Na^+ atau Pb^{2+}) dalam jaringan geopolimer dan digantikan oleh ion hidrogen (H^+), serta membentuk polimer jaringan silikon yang mampu menurunkan kuat tekan secara signifikan. Penyerangan oleh larutan asam kuat dapat mengikis geopolimer hingga terjadi pengurangan massa setelah perendaman. Penurunan kualitas geopolimer rata-rata terjadi pada geopolimer yang memiliki permeabilitas tinggi pada saat *leaching* dan terjadi pada larutan asam yang pekat (Bakharev, 2005b; Ken dkk., 2016).



Gambar 2. 8 Penyerangan asam pada jaringan geopolimer (Singh dkk., 2015)

2.7 Kinetika *Leaching*

Kinetika reaksi secara umum adalah ilmu dalam bidang kimia fisika yang mempelajari tentang laju reaksi, faktor-faktor yang mempengaruhi serta hubungan terhadap mekanisme reaksi, begitu juga dengan kinetika *leaching* (pelindian). Kinetika *leaching* merupakan ilmu yang mempelajari tentang laju keluarnya suatu spesi kimia berupa ion dari dalam material padatan menuju pelarut, faktor-faktor yang mempengaruhi laju pelindian, serta ada hubungannya dengan mekanisme pelindian. Kinetika pelindian dari suatu material pengamobil yang mengandung ion logam berat perlu diketahui untuk menentukan laju *leaching* ion logam berat serta jumlah konsentrasi ion logam berat yang keluar dari padatan (*ter-leaching*) pada kondisi lingkungan dalam waktu tertentu.

Teknologi geopolimer merupakan salah satu solusi dalam penanganan logam berat karena memiliki kemampuan amobilisasi ion logam berat yang cukup baik. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak penelitian yang berkembang terkait kemampuan amobilisasi ion logam berat dalam geopolimer (Fansuri dkk., 2015; Guo, Liu, dkk., 2017; Nikolić dkk., 2017), namun hanya sedikit yang membahas kinetika *leaching* ion logam berat dari geopolimer. Adapun beberapa model kinetika *leaching* yang sudah pernah diteliti salah satunya adalah kinetika reaksi heterogen fluida-padatan. Reaksi heterogen tersebut meliputi geopolimer sebagai padatan yang *ter-leaching* dan larutan pelindih (*leachate*) sebagai fluida.

2.8 Kinetika Reaksi Heterogen Fluida-Padatan

Kinetika reaksi pada reaksi heterogen antara suatu padatan dengan cairan atau gas umumnya berbeda dengan kinetika reaksi pada umumnya, contohnya adalah proses *leaching*. Pada proses *leaching*, padatan akan bereaksi dengan larutan yang berperan sebagai fluida pada saat reaksi. Salah satu hal yang mencolok

dalam reaksi heterogen adalah zona reaksi yang terletak pada lapisan antarmuka (*interface*) antara padatan dan fluida larutan. Prinsip dasar dari reaksi heterogen ini terletak pada sifat kimia fisika dari padatan maupun larutan. Laju reaksi kimia bergantung pada konsentrasi reaktan. Jika salah satu reaktan adalah padatan, konsentrasi efektif tergantung pada luas permukaan aktual dan kekasaran permukaan, serta permukaan internal juga harus dipertimbangkan. Laju reaksi menurun dengan cepat seiring dengan konsumsi reaktan pada saat reaksi (Havlik, 2008).

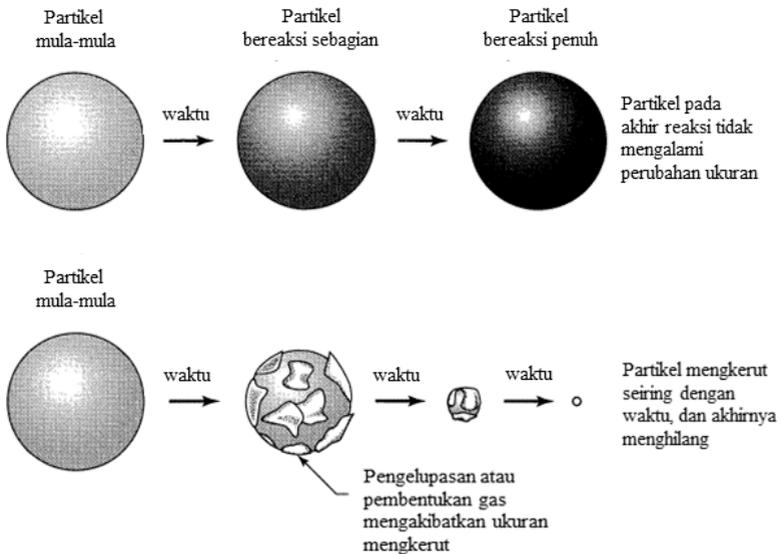
Teori kinetika kimia pada reaksi heterogen tidak dapat disamakan dengan reaksi homogen cairan atau gas. Dalam reaksi heterogen dengan menggunakan fasa cair (larutan), ada juga proses antara satu atau beberapa zat terlarut dengan permukaan padatan dimana tidak dapat dijelaskan oleh hukum dari kinetika reaksi homogen. Permukaan dari padatan dianggap konstan dalam reaksi, sehingga reaktan pelarut harus mencapai/mengalami kontak dengan permukaan padatan. Hal tersebut dapat dijelaskan oleh hubungan difusi sederhana atau difusi yang terbatas (*constrained diffusion*) dari larutan ke permukaan padatan. Sejumlah besar reaksi heterogen terjadi melalui beberapa tahapan dasar. Interaksi antara padatan dan larutan terjadi melalui beberapa tahap, yaitu:

1. Difusi reaktan dari larutan pelindi (*leaching agent*) menuju lapisan antarmuka (permukaan luar/*outer surface* dari padatan).
2. Adsorpsi reaktan pada permukaan padatan
3. Reaksi kimia dari reaktan yang teradsorpsi menjadi produk
4. Desorpsi produk teradsorpsi dari reaksi dalam padatan
5. Difusi produk dari permukaan dalam (*inner surface*) menuju permukaan luar
6. Difusi produk dari antarpermukaan menuju larutan pelindi

Jika produk terbentuk pada permukaan padatan, tahapan yang terjadi sebagai berikut:

1. Difusi reaktan terjadi melalui lapisan antarmuka menuju permukaan padatan
2. Reaksi kimia dari reaktan menjadi produk di permukaan padatan
3. Difusi produk reaksi dari lapisan padatan dari antarpermukaan menuju ke lingkungan luar

Tahap 1, 5 dan 6 dikontrol oleh laju difusi dari reaktan dan produk, serta dikontrol oleh sistem hidrodinamika. Tahap 2, 3 dan 4 dapat dianggap sebagai proses yang dikontrol oleh reaksi kimia (Havlik, 2008). Ada 2 jenis perilaku yang dialami oleh padatan dalam reaksi heterogen, yaitu reaksi yang mengakibatkan ukuran padatan menyusut (*Shrinking Particle Size*) dan reaksi yang mengakibatkan ukuran padatan tetap konstan (*Constant Particle Size*) seiring dengan bertambahnya waktu reaksi (Levenspiel, 1999) seperti pada Gambar 2.9.

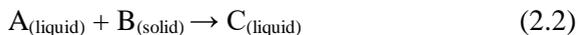


Gambar 2. 9 Ilustrasi perilaku partikel padatan dengan larutan dalam reaksi heterogen (Levenspiel, 1999)

Untuk memahami kinetika leaching pada reaksi heterogen, perlu suatu permodelan untuk menjabarkan kinetika laju reaksinya. Pemilihan model kinetika reaksi harus relevan dengan kondisi nyata yang terjadi pada saat reaksi berlangsung. Jika model kinetika reaksi berbeda dengan kondisi nyata reaksi, model persamaan yang digunakan akan tidak relevan berikut juga dengan hasil perhitungannya. Maka dari itu, perlunya memahami kondisi yang terjadi pada saat reaksi berlangsung sehingga dapat menentukan model persamaan kinetika reaksi yang relevan.

2.9 Permodelan Kinetika Reaksi *Shrinking Particle Size*

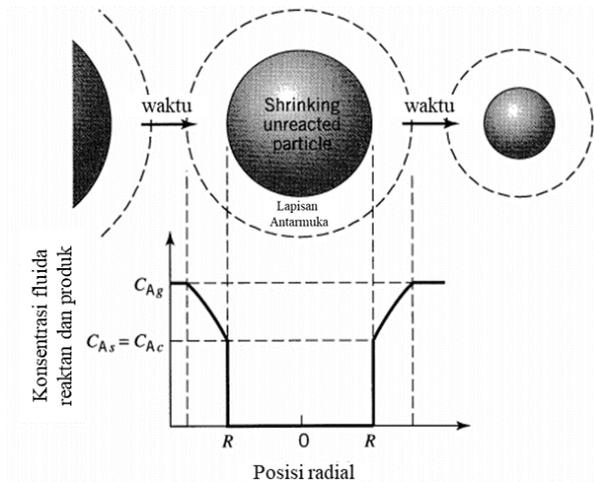
Permodelan ini mengasumsikan bahwa reaksi heterogen yang terjadi antara partikel padatan dan fluida larutan akan mengakibatkan perubahan fasa dari partikel solid menjadi fasa liquid.



Secara umum, persamaan reaksi yang terjadi dengan asumsi kinetika *Shrinking Particle Size* ditunjukkan pada Persamaan 2.2, dimana reaksi antara reaktan A dan B menghasilkan satu produk C. Partikel padatan akan mengalami penyusutan ukuran seiring dengan bertambahnya waktu reaksi, dan akan menghilang/ terkonversi menjadi bentuk fasa lain. Untuk reaksi heterogen jenis ini dapat digambarkan terjadi melalui 3 tahap, yaitu:

1. Difusi reaktan (pelarut) dari lingkungan menuju ke permukaan padatan melalui lapisan antarmuka.
2. Reaksi kimia antara padatan dengan pelarut pada permukaan.
3. Difusi produk reaksi dari permukaan menuju ke lingkungan melalui lapisan antarmuka.

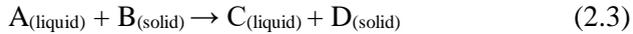
Permodelan ini dapat diilustrasikan pada gambar 2.10. Pada permodelan kinetika *Shrinking Particle Size* terdapat 2 variabel kontrol yang mampu mempengaruhi laju kinetika, antara lain adalah kontrol reaksi kimia pada permukaan padatan dan kontrol difusi fluida larutan pada lapisan antarmuka. Masing-masing kontrol tersebut memberikan pengaruh yang berbeda-beda dalam penentuan kinetika reaksinya. Adapun faktor yang mempengaruhi antara lain ukuran partikel padatan, velositas relatif antara padatan dan fluida larutan, dan sifat fluida (Levenspiel, 1999).



Gambar 2. 10 Permodelan Kinetika *Shrinking Particle Size* (Levenspiel, 1999)

2.10 Permodelan Kinetika Reaksi *Constant Particle Size*

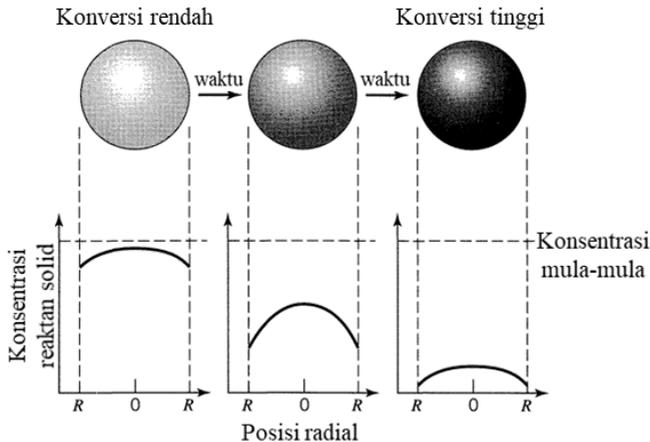
Permodelan ini mengasumsikan bahwa reaksi heterogen yang terjadi antara partikel padatan dengan fluida larutan tidak mengubah ukuran partikel padatan (ukuran konstan) walau seiring bertambahnya waktu reaksi. Reaktan dalam padatan akan tetap bereaksi dengan pelarut dan menghasilkan produk, tetapi tidak mempengaruhi ukuran padatan.



Secara umum, persamaan reaksi yang terjadi dengan asumsi kinetika *Shrinking Particle Size* ditunjukkan pada Persamaan 2.3. Permodelan ini memiliki 2 model ideal sederhana, yaitu model konversi progresif (*Progressive-Conversion Model*, PCM) dan model pengerutan inti (*Shrinking-Core Model*). Kedua model ideal tersebut sama-sama mempertahankan ukuran partikel padatan di akhir reaksi, tetapi memiliki mekanisme reaksi yang berbeda (Levenspiel, 1999).

2.10.1 *Progressive-Conversion Model Kinetics*

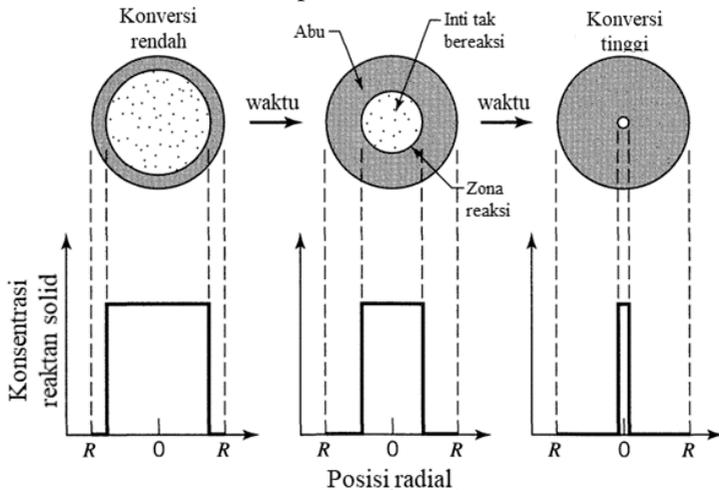
Kinetika PCM dapat digambarkan bahwa reaktan fluida larutan masuk dan bereaksi merata pada partikel pada awal reaksi sampai akhir reaksi dan kemungkinan besar pada lokasi yang berbeda dalam partikel, memiliki laju yang berbeda. Dengan demikian, reaktan dalam padatan terkoversi secara kontinyu dan secara progresif merata pada padatan. Kinetika PCM dapat diilustrasikan melalui gambar 2.11 (Levenspiel, 1999).



Gambar 2. 11 Ilustrasi laju kinetika *Progressive-Conversion Model* (Levenspiel, 1999)

2.10.2 *Shrinking-Core Model Kinetics*

Kinetika SCM dapat digambarkan bahwa reaktan fluida larutan akan bereaksi dengan padatan pertama kali terjadi pada lapisan luar padatan. Zona reaksi kemudian berpindah menuju padatan, melepaskan material yang telah terkonversi dan padatan inert. Dengan demikian, pada waktu tertentu akan ada inti material padatan yang tidak bereaksi dan konsentrasi reaktan padatan akan terus menyusut, terkonversi menjadi produk seiring dengan waktu tanpa merubah ukuran partikel. Hal tersebut dapat dilustrasikan pada Gambar 2.12 (Levenspiel, 1999).



Gambar 2. 12 Ilustrasi laju kinetika *Shrinking-Core Model* (Levenspiel, 1999)

2.11 Persamaan Kinetika *Shrinking-Core Model*

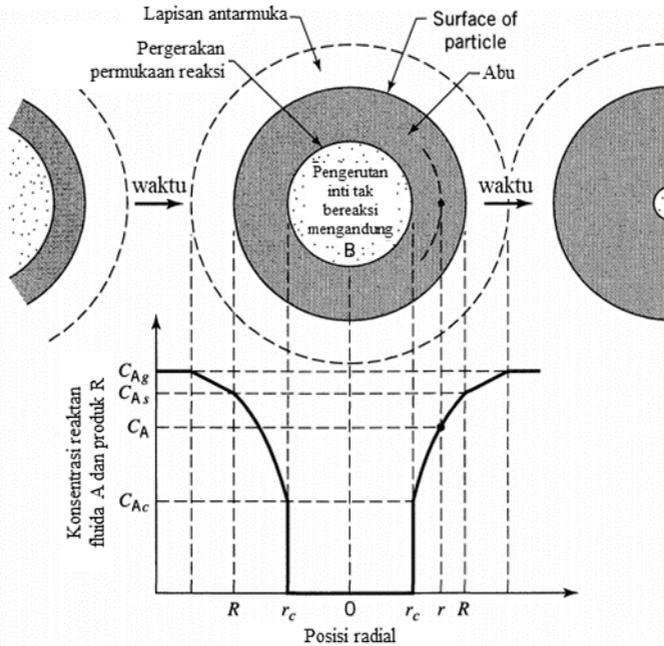
Kinetika *Shrinking-Core Model* diasumsikan bahwa kinetika reaksi terjadi melalui 5 tahap, yaitu:

1. Difusi larutan menuju permukaan luar padatan melalui lapisan antarmuka larutan-padatan.

2. Penetrasi dan difusi larutan dari permukaan luar padatan menuju ke permukaan dari inti padatan yang belum bereaksi (*unreacted core*).
3. Reaksi antara larutan dengan padatan pada permukaan inti yang bereaksi
4. Difusi larutan dan produk menuju lapisan permukaan luar padatan.
5. Difusi larutan dan produk dari lapisan permukaan luar padatan menuju lingkungan melalui lapisan antarmuka larutan-padatan.

Dari tahapan laju kinetika diatas, dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor yang berfungsi sebagai kontrol dalam laju kinetika adalah difusi antarmuka larutan-padatan, reaksi kimia pada permukaan, dan difusi melalui lapisan padatan yang dapat diilustrasikan pada Gambar 2.13. Ketiga kontrol reaksi tersebut dapat memberikan informasi terkait kinetika reaksi dan laju reaksi yang terjadi dalam proses *leaching* padatan dalam larutan asam. Persamaan kinetika dari setiap kontrol reaksi juga dipengaruhi oleh bentuk dari padatan. Hal tersebut dikarenakan pertama kali terjadinya reaksi berada pada permukaan, otomatis bentuk dari padatan juga akan mempengaruhi persamaan matematika dari model kinetika. Secara matematika, padatan berbentuk bola memiliki rumus yang berbeda dengan bentuk silinder dalam penghitungan luas area permukaan dan volume. Hal inilah yang mengakibatkan perbedaan persamaan kinetika secara matematika, tetapi secara konseptualnya sama .

Selama proses reaksi berlangsung, konsentrasi reaktan dalam padatan akan terus berkurang seiring dengan meningkatnya konversi reaktan menjadi produk. Hal tersebut akan mengakibatkan berubahnya ukuran reaktan seiring bertambahnya waktu dalam padatan. Perubahan ini dihitung dalam bentuk fraksional untuk dimasukkan dalam persamaan kinetika reaksi.



Gambar 2. 13 Tahapan reaksi dengan menggunakan kinetika *Shrinking-Core Model* (Levenspiel, 1999)

Dikarenakan setiap bentuk padatan memiliki rumus matematika untuk volume yang berbeda, maka persamaan fraksionalnya pun berbeda. Adapun persamaan fraksional dari beberapa bentuk padatan yang sering dijumpai dapat dilihat pada persamaan 2.4a dan 2.4b

(1) Bentuk bola:

$$X_{\text{produk}} = 1 - X_{\text{reaktan}}$$

$$X_{\text{produk}} = 1 - \frac{\text{volume reaktan yang belum bereaksi}}{\text{total volume padatan}}$$

$$X_{\text{produk}} = 1 - \frac{4/3\pi r^3}{4/3\pi R^3} = 1 - \frac{r^3}{R^3} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^3 \quad (2.4a)$$

(2) Bentuk silinder

$$X_{\text{produk}} = 1 - X_{\text{reaktan}}$$

$$X_{\text{produk}} = 1 - \frac{\text{volume reaktan inti yang belum bereaksi}}{\text{total volume padatan}}$$

$$X_{\text{produk}} = 1 - \frac{\pi r^2 t}{\pi R^2 t} = 1 - \frac{r^2}{R^2} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (2.4b)$$

dimana k adalah koefisien kontrol difusi lapisan padatan, r adalah jari-jari reaktan inti, R adalah jari-jari total padatan, t adalah waktu berjalannya reaksi (jam), dan X_{produk} adalah fraksional dari produk yang terbentuk. (Levenspiel, 1999)

2.11.1 Kontrol Difusi Antarmuka Larutan-Padatan

Kontrol difusi antarmuka larutan-padatan pada kinetika SCM terjadi awal dan akhir pada tahap reaksi, yaitu pada saat difusi larutan menuju permukaan luar padatan melalui lapisan antarmuka larutan-padatan dan difusi produk dari permukaan luar padatan menuju ke lingkungan melalui lapisan antarmuka larutan-padatan. Untuk padatan berbentuk bola dan silinder memiliki persamaan kinetika pada kontrol difusi antarmuka larutan-padatan yang sama, yang dapat dilihat pada Persamaan 2.5.:

$$k_1 t = X_{\text{produk}} \quad (2.5)$$

dimana k_1 adalah koefisien kontrol difusi antarmuka, t adalah waktu berjalannya reaksi (jam), dan X_{produk} adalah fraksional dari produk yang terbentuk (Levenspiel, 1999; Luo dkk., 2017; Xu dkk., 2018).

2.11.2 Kontrol Difusi Lapisan Padatan

Kontrol difusi pada lapisan padatan berasumsi bahwa pelarut dari dari permukaan luar padatan akan mengalami difusi dan penetrasi kedalam lapisan padatan untuk mencapai permukaan padatan yang belum bereaksi. Pada saat difusi, larutan mengalami hambatan oleh lapisan padatan. Hal tersebut mirip dengan difusi larutan pada lapisan antarmuka, tetapi memiliki nilai hambatan yang lebih besar. Larutan berdifusi secara perlahan kedalam lapisan padatan dan tergantung dari sifat fluida larutan dan

ketahanan lapisan padatan. Untuk memahami kontrol difusi lapisan padatan, diperlukan analisis dua tahap. Analisis pertama adalah menentukan fluks larutan menembus padatan pada saat difusi dan analisis kedua adalah menghubungkan fluks larutan dengan jari-jari inti padatan yang belum bereaksi menjadi suatu persamaan kinetika. Adapun persamaan kinetika untuk padatan berbentuk bola dan silinder dapat dilihat pada Persamaan 2.6a dan 2.6b.

(1) Bentuk Bola

$$kt = 1 - 3(1 - X_{\text{produk}})^{\frac{2}{3}} + 2(1 - X_{\text{produk}}) \quad (2.6a)$$

(2) Bentuk Silinder

$$kt = X_{\text{produk}} + (1 - X_{\text{produk}}) \ln(1 - X_{\text{produk}}) \quad (2.6b)$$

dimana k adalah koefisien kontrol difusi lapisan padatan, t adalah waktu berjalannya reaksi (jam), dan X_{produk} adalah fraksional dari produk yang terbentuk (Levenspiel, 1999; Luo dkk., 2017; Y. Xu dkk., 2018).

2.11.3 Kontrol Reaksi Kimia Pada Permukaan

Kontrol reaksi kimia terjadi pada permukaan inti yang belum bereaksi. Kontrol reaksi ini berasumsi bahwa larutan yang telah melewati lapisan padatan akan sampai pada permukaan inti dan bereaksi di permukaan inti tersebut. Reaktan yang berada pada permukaan inti padatan bereaksi dengan pelarut dan menghasilkan produk. Dengan perubahan tersebut, volume reaktan inti akan semakin berkurang seiring berjalannya waktu reaksi. Persamaan kinetik dari kontrol reaksi kimia hampir sama dengan kontrol reaksi difusi antarmuka larutan-padatan, bedanya terletak pada koefisien transfer massa dan adanya perubahan volume reaktan. Adapun persamaan kinetika untuk padatan berbentuk bola dan silinder untuk kontrol reaksi permukaan ditunjukkan pada Persamaan 2.7a dan 2.7b.

(1) Bentuk Bola

$$kt = 1 - \frac{r}{R} = 1 - (1 - X_{\text{produk}})^{\frac{1}{3}} \quad (2.7a)$$

(2) Bentuk Silinder

$$kt = 1 - \frac{r}{R} = 1 - (1 - X_{\text{produk}})^{\frac{1}{2}} \quad (2.7b)$$

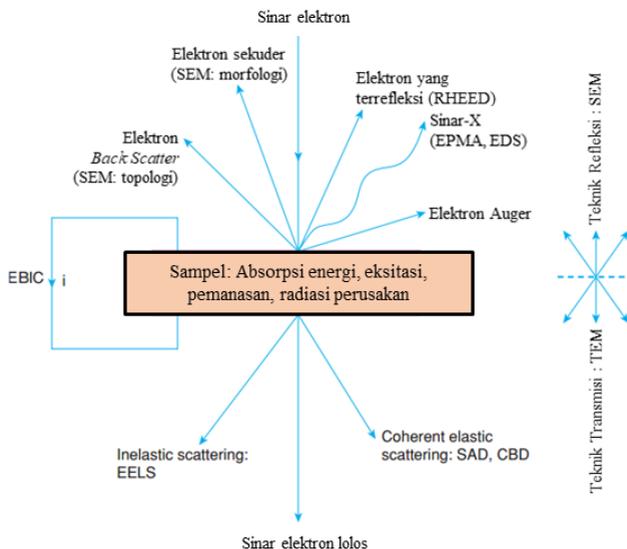
dimana k adalah koefisien kontrol reaksi di permukaan padatan, r adalah jari-jari reaktan inti, R adalah jari-jari total padatan, t adalah waktu berjalannya reaksi (jam), dan X_{produk} adalah fraksional dari produk yang terbentuk (Levenspiel, 1999; Luo dkk., 2017; Y. Xu dkk., 2018).

2.12 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Mikroskop elektron merupakan suatu alat yang digunakan untuk membantu dalam penglihatan suatu material yang berukuran sangat kecil. Pada dasarnya, mikroskop elektron dan mikroskop optik memiliki prinsip kerja yang sama, yaitu menggunakan bantuan berkas cahaya yang melewati lensa untuk difokuskan pada titik tertentu pada sampel untuk dilakukan pembacaan. Perbedaan mikroskop elektron dengan mikroskop optik adalah sumber cahaya yang digunakan untuk proses penglihatan atau pembacaannya berbeda. Pada elektron mikroskop, sumber cahaya berasal dari cahaya tampak, sedangkan pada mikroskop cahaya hanya menggunakan cahaya tampak. Selain itu, resolusi pembacaan pada elektron mikroskop jauh lebih tinggi daripada mikroskop cahaya, hingga mencapai resolusi 60 Å.

Pada prinsipnya, mikroskop elektron memakai pancaran berkas elektron sebagai sumber cahaya dalam pembacaan. Sumber elektron berasal dari *tungsten filament (electron gun)* dan akan dipercepat dengan bantuan anoda pada tegangan tinggi (50-100 kV). Elektron tersebut kemudian akan masuk ke lensa kondenser dan difokuskan untuk mengenai sampel. Elektron yang mengenai sampel memiliki 3 kemungkinan yang akan terjadi, yaitu ter-

refleksi, ter-absorpsi, dan ter-transmisikan melewati sampel. Pembacaan pada mikroskop elektron secara garis besar dibedakan menjadi 2, yaitu elektron yang direfleksikan dan ditransmisikan oleh sampel. Salah satu teknik pada elektron mikroskop adalah *scanning electron microscopy* (SEM) dengan memanfaatkan elektron yang ter-refleksikan dari permukaan sampel dan ditangkap oleh detektor. Elektron yang ditangkap detektor tersebut bisa elektron sekunder (*secondary electron*) yang dapat memberikan informasi morfologi permukaan dari sampel, dan *back-scattered electron* yang dapat memberikan informasi topografi sampel yang ditunjukkan pada Gambar 2.14. Instrumen SEM dapat menghasilkan penggambaran suatu material padatan mendekati 3 dimensi, dikarenakan *depth of focus* yang dimiliki instrumen SEM (West, 2014).



Gambar 2. 14 Sinyal refleksi dan transmisi dari pancaran elektron menuju sampel untuk pembacaan model SEM dan TEM (West, 2014)

2.13 Kuat Tekan

Kuat tekan adalah kemampuan beton untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Kuat tekan beton mengidentifikasi mutu dari sebuah struktur. Semakin tinggi kekuatan struktur dikehendaki, semakin tinggi pula mutu beton yang dihasilkan. Nilai kuat tekan beton didapat dari pengujian standar dengan benda uji yang lazim digunakan berbentuk silinder. Dimensi benda uji berbentuk silinder adalah rasio tinggi dan diameter sebesar 2:1, sedangkan untuk benda uji berbentuk kubus memiliki dimensi dengan rasio panjang:lebar:tinggi sebesar 1:1:1. Pengujian kuat tekan pada umumnya dilakukan sesuai dengan ketentuan SNI pada beton yang berusia minimal 7 hari pemeraman (Badan Standarisasi Nasional, 2011; Sari dkk., 2017).

Rumus yang digunakan untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton berdasarkan percobaan dilaboratorium dapat dilihat pada Persamaan 2.8.

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (2.8)$$

Dimana: f_c' = kuat tekan (MPa)
 P = gaya tekan aksial (N)
 A = luas penampang benda uji (mm^2)

Beton mempunyai kuat tekan yang tinggi jika tersusun dari bahan lokal yang berkualitas baik. Bahan penyusun beton yang perlu mendapat perhatian adalah agregat, karena agregat mencapai 70-75% volume beton (Badan Standarisasi Nasional, 2011)

2.14 Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

Atomic absorption spectroscopy (AAS) atau spektroskopi serapan atom adalah salah satu teknik spektroskopi yang digunakan untuk mendeteksi konsentrasi analit dalam sampel dengan prinsip serapan energi oleh atom. Elektron dalam atom

akan tereksitasi ke keadaan yang lebih tinggi dengan menyerap energi (radiasi pada panjang gelombang tertentu). Dalam teknik ini, senyawa yang ingin dianalisa harus memiliki sifat mudah menguap (volatil) agar mudah untuk diubah dalam bentuk ionnya. Salah satu metode yang digunakan untuk membuat senyawa dalam sampel tersebut berubah menjadi bentuk ionnya adalah dengan cara penyemprotan (*spray*), menjadi kabut yang kemudian difokuskan menuju pembakar yang bersuhu tinggi untuk diubah menjadi bentuk atom. Udara (kabut) dicampurkan dengan gas asetilen, propana atau N_2O untuk menghasilkan api dalam suhu antara $2100^\circ K$ sampai $3200^\circ K$. Suhu yang tinggi diperlukan untuk unsur yang bersifat refraktori, antara lain Al, Si, V, dan Be. Sumber radiasi dalam instrument AAS berasal dari tabung katoda berongga (*hollow cathode*), sebuah anoda yang terbuat dari tungsten dan katoda silinder yang terbuat dari logam yang dianalisa dan memiliki rongga. Rongga tersebut berisi gas pembawa inert, semisal gas neon. Selain tabung katoda berongga, bagian-bagian lain dari instrument AAS adalah suplai daya, *nebulizer/atomizer*, monokromator, detektor, dan komputer untuk memvisualisasi dan mengelola data (Hollas, 2004).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI

3.1 Alat dan Bahan

3.1.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan gelas dan peralatan non gelas. Peralatan gelas yang digunakan adalah labu ukur (ukuran 50 ml, 100 ml, dan 1000 ml), pipet ukur 10 ml, pipet volume 10 ml, gelas ukur 100 ml, gelas beaker 250 ml. Peralatan non gelas meliputi pipet plastik, gelas plastik, bola hisap, ayakan 100 mesh, spatula besi, cetakan silinder dengan rasio diameter:tinggi adalah 2:1, *mixer*, neraca analitik dan oven. Selain itu, digunakan pula instrumen analisis yaitu alat uji tekan universal (*universal testing machine*), *Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) dan spektrometer serapan atom (*Absorption Atomic Spectrometer*, AAS). Semua peralatan kecuali alat uji universal, instrumen SEM-EDX dan instrumen AAS, tersedia di laboratorium Kimia Material dan Energi sedangkan alat uji kuat tekan ada di Laboratorium Beton, Teknik Infrastruktur Sipil, ITS, instrumen SEM-EDX ada di Laboratorium Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat ITS dan instrumen AAS ada di Laboratorium Terpadu Fakultas MIPA UNESA.

3.1.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu layang dari PLTU PT. IPMOMI di Paiton, Probolinggo, pelet natrium hidroksida (NaOH) p.a. dari MERCK, larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) teknis dari PT. Brataco, aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) *reagent grade* dari Sigma-Aldrich, air terdemineralisasi (aqua DM), asam asetat glasial (CH_3COOH) p.a. dari MERCK, natrium asetat (CH_3COONa) dan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$

3.2 Preparasi Abu Layang PT. IPMOMI

Abu layang PT. IPMOMI terlebih dahulu diayak menggunakan ayakan 100 mesh untuk mendapatkan ukuran partikel abu layang yang halus dan kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam lalu didinginkan di dalam desikator. Pemanasan pada suhu tersebut berfungsi untuk menghilangkan kandungan air yang masih terdapat dalam abu layang. Abu layang yang telah dingin kemudian ditimbang sebanyak 260 g sesuai dengan resep penelitian terdahulu (Fansuri dkk., 2015). Selanjutnya, abu layang tersebut dicampur dengan larutan $Pb(NO_3)_2$ yang dibuat dengan melarutkan padatan $Pb(NO_3)_2$ dalam 25 ml aqua DM. Campuran abu layang dan larutan $Pb(NO_3)_2$ diaduk merata menggunakan *mixer*. Campuran tersebut kemudian dikeringkan di dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air. Dibandingkan dengan penelitian Fansuri dkk (2015), perbedaan penelitian ini terletak pada proses penambahan ion Pb^{2+} di mana pada penelitian ini, ion Pb^{2+} ditambahkan ke dalam abu layang sebelum abu layang tersebut digunakan dalam pembuatan geopolimer.

Massa padatan $Pb(NO_3)_2$ yang dilarutkan divariasikan untuk mendapatkan abu layang PT. IPMOMI dengan kandungan Pb relatif terhadap massa abu layang sebesar 1000, 4000, 8000 dan 16000 ppm. Massa $Pb(NO_3)_2$ tersebut disajikan pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 massa $Pb(NO_3)_2$ yang digunakan

Konsentrasi Pb^{2+} (ppm)	Massa $Pb(NO_3)_2$ (g)	Kode Sampel Geopolimer
1000	0,416	GeoPb-1000
4000	1,664	GeoPb-4000
8000	3,328	GeoPb-8000
16000	6,656	GeoPb-16000

3.3 Pembuatan Larutan Basa Pengaktif (*Alkaline activator*)

Pembuatan larutan basa pengaktif dilakukan dengan mencampurkan larutan NaOH dengan *waterglass* (Na_2SiO_3) dalam wadah plastik. Larutan NaOH dibuat terlebih dahulu dengan melarutkan 28 gram pelet NaOH dengan aqua DM lalu diencerkan dalam labu ukur 50 ml. Larutan NaOH yang terbentuk kemudian dipindahkan ke dalam beker plastik dan ditutup lalu didiamkan selama 24 jam pada suhu kamar.

Pencampuran larutan NaOH dengan *waterglass* menghasilkan panas. Oleh karena itu, setelah bercampur dengan baik (larut) maka beker plastik yang berisi larutan basa pengaktif kemudian ditutup rapat menggunakan plastik dan dibiarkan hingga kembali ke suhu kamar sebelum digunakan untuk sintesis geopolimer.

3.4 Sintesis Geopolimer

Geopolimer disintesis dengan komposisi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.2. Komposisi tersebut didapatkan dari penelitian sebelumnya (Fansuri dkk., 2015) yang juga menggunakan abu layang PT. IPMOMI dalam pembuatan geopolimer.

Tabel 3. 2 Komposisi pembuatan geopolimer

Bahan	Nilai	Satuan
Abu layang PT. IPMOMI	260,0	gram
Pelet NaOH	28,0	gram
$\text{Al}(\text{OH})_3$	3,4	gram
<i>Waterglass</i> (Na_2SiO_3)	80,0	gram
Total aqua DM (H_2O)	61,3	ml

Abu layang yang telah dicampur dengan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, ditambah dengan larutan $\text{Al}(\text{OH})_3$ lalu diaduk menggunakan *mixer*

sampai tercampur merata. Campuran tersebut kemudian ditambah dengan larutan basa pengaktif sambil terus diaduk dengan *mixer* selama 4 menit. Pasta kental yang dihasilkan kemudian dituangkan ke dalam cetakan silinder dengan tinggi 4 cm dan diameter 2 cm yang sudah diolesi bagian dalamnya dengan vaselin. Setelah pasta geopolimer dituang, bagian atas cetakan ditutup dengan plastik. Proses pencetakan geopolimer dilakukan pada suhu ruang dan hasil pencetakan kemudian didiamkan selama 24 jam agar terbentuk geopolimer yang telah mengeras. Geopolimer yang sudah mengeras kemudian dikeluarkan dari cetakan dan dimasukkan ke dalam plastik klip yang selanjutnya dipanaskan di dalam oven pada suhu 55 °C selama 24 jam. Setelah itu, geopolimer dikeluarkan dari pelastik klik lalu didiamkan untuk proses pematangan jaringan (*curing*) selama 7 hari. Kekuatan tekan geopolimer yang dihasilkan dan kemampuannya mengamobilisasi ion Pb^{2+} diuji pada hari ke-7.

3.5 Pembuatan Larutan Buffer

Larutan pelindih (*leaching*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah larutan buffer asetat. Larutan buffer asetat yang digunakan dalam pelindihan (*leachig*) memiliki pH = 5. Nilai pH tersebut disesuaikan dengan pH rata-rata kondisi tanah pada umumnya. Larutan buffer asetat dibuat dengan mencampurkan 1 liter larutan asam asetat 1 M dengan 1 liter larutan natrium asetat 1,8 M. Satu liter larutan asam asetat dibuat dengan mengencerkan 57,2 ml asam asetat glasial p.a. dalam labu ukur 1 liter, sedangkan 1 liter larutan natrium asetat dibuat dengan melarutkan 147,6 g natrium asetat dengan aqua DM lalu diencerkan dalam labu ukur 1 liter. Volume larutan buffer asetat yang digunakan pada proses *leaching* adalah 2 liter.

3.6 Leaching Ion Logam Pb^{2+} dalam Geopolimer

Uji *leaching* dilakukan pada geopolimer yang dibuat dari abu layang PT. IPMOMI yang telah ditambahi ion Pb^{2+} dengan berbagai variasi konsentrasi, relatif terhadap massa abu layang. Uji *leaching* bertujuan untuk mengetahui kemampuan geopolimer dalam mengmobilisasi ion Pb^{2+} . Pengujian *leaching* dilakukan pada geopolimer yang sudah berusia 7 hari. Sebelum geopolimer direndam dengan larutan pelindih, setiap sampel geopolimer direndam dalam larutan etanol teknis selama 24 jam. Perendaman dilakukan untuk menghentikan proses geopolimerisasi (Chen dkk., 2014).

Perendaman geopolimer dalam etanol dilakukan pada wadah yang berbeda untuk setiap variasi konsentrasi ion Pb^{2+} dalam geopolimer. Setelah perendaman dengan etanol, geopolimer dikeringkan terlebih dahulu untuk uji *leaching*. *Leaching* ion Pb^{2+} dilakukan dengan mengambil cuplikan sampel geopolimer sekitar 100 gram (4 spesimen geopolimer) yang kemudian dimasukkan ke dalam wadah uji yang berisi 2 liter larutan buffer asetat. Proses *leaching* dikondisikan dalam keadaan dinamis dengan bantuan pompa yang mengalirkan larutan untuk menjaga sirkulasi larutan dalam wadah uji. Proses uji *leaching* dilakukan selama 7 hari dengan interval pengambilan larutan hasil *leaching* (*leachate*) setiap 6 jam, masing-masing sebanyak 10 ml. Proses *leaching* pada variasi geopolimer dengan penambahan ion Pb^{2+} dilakukan pada wadah sendiri-sendiri yang terpisah. *Leachate* yang didapat kemudian dianalisis menggunakan AAS untuk mengetahui kandungan ion Pb^{2+} yang ter-*leaching* dari gopolimer. Pengenceran dilakukan apabila konsentrasi Pb^{2+} terlalu tinggi jika dibandingkan dengan kurva kalibrasinya.

3.7 Kalibrasi AAS dalam pengukuran konsentrasi Pb^{2+}

Prosedur kalibrasi AAS dilakukan dengan metode kalibrasi standar. Dalam metode ini dibuat suatu seri larutan standar dengan berbagai variasi konsentrasi yang sudah diketahui. Larutan standar yang digunakan dalam analisis konsentrasi Pb^{2+} berasal dari perusahaan PerkinElmer, sesuai dengan spesifikasi instrument AAS yang digunakan. Larutan standar tersebut kemudian diencerkan dalam labu ukur 10 ml untuk mendapatkan konsentrasi larutan standar tertentu. Variasi konsentrasi larutan standar yang digunakan adalah 0 (aqua DM murni), 20, 40, 60 dan 80 ppm. Setiap variasi konsentrasi larutan standar diuji dengan pengulangan 3 kali untuk mendapatkan nilai absorbansi rata-rata. Langkah selanjutnya adalah membuat grafik antara absorbansi larutan standar sebagai fungsi y dan konsentrasi standar sebagai fungsi x. Dari grafik tersebut didapatkan kurva kalibrasi berbentuk garis lurus yang memotong titik nol (intersep = 0) dan didapatkan persamaan linier. Kurva kalibrasi yang baik memiliki koefisien korelasi (R^2) mendekati 1. Apabila koefisien korelasi tidak mendekati 1, maka metode kalibrasi diulang dari awal.

3.8 Karakterisasi

3.8.1 Sifat Mekanik Kuat Tekan Geopolimer

Sifat mekanik geopolimer yang diuji adalah kekuatan tekan geopolimer. Pengujian kuat tekan dilakukan sebanyak 2 kali, yaitu sebelum uji *leaching* dan sesudah uji *leaching*. Sampel geopolimer dengan variasi konsentrasi ion Pb^{2+} diuji kuat tekannya pada saat berumur 7 hari menggunakan *Universal Testing Machine* di Laboratorium Beton, Teknik Infrastruktur Sipil ITS. Sampel geopolimer pada setiap variasi terlebih dahulu dipersiapkan dengan meratakan permukaan bidang sentuh geopolimer dengan kertas amplas. Data yang didapat dari pengujian kuat tekan berupa kekuatan geopolimer dalam menerima beban dalam satuan Newton

(N), yang kemudian dikonversi menjadi Mega Pascal (MPa) untuk dilaporkan sebagai hasil uji kuat tekan geopolimer.

3.8.2 Kandungan Ion Logam yang Ter-leaching dengan AAS

Pengujian pada *leachate* menggunakan instrumen AAS bertujuan untuk mengetahui konsentrasi Pb^{2+} yang terlepas dari matriks geopolimer setelah proses *leaching*. Semua *leachate* yang diambil setiap 6 jam pada setiap variasi selama 7 hari di analisis AAS untuk mengetahui laju pelindihan (*leaching rate*) Pb^{2+} dari dalam matriks geopolimer. Data yang didapatkan kemudian diolah dalam bentuk % Pb^{2+} ter-leaching untuk mengetahui jumlah Pb^{2+} yang keluar dari sampel uji yang digunakan. Perhitungan %ion Pb^{2+} dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.1 dan 3.2.

$$\text{massa } Pb^{2+} \text{ (mg)} = \frac{\text{konsentrasi } Pb^{2+} \text{ (ppm)}}{\text{volume buffer (l)}} \quad (3.1)$$

$$\%Pb^{2+} = \frac{\text{massa } Pb^{2+} \text{ terleaching (mg)}}{\text{massa } Pb^{2+} \text{ dalam sampel uji (mg)}} \times 100\% \quad (3.2)$$

3.8.3 Morfologi Geopolimer dengan SEM-EDX

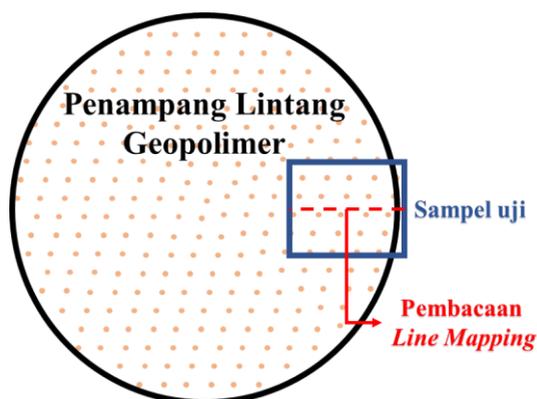
Analisa geopolimer yang mengandung ion Pb^{2+} juga dilakukan menggunakan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-ray*). Analisis ini dilakukan untuk mengetahui morfologi permukaan dan sebaran ion Pb^{2+} di dalam matriks geopolimer. Analisa menggunakan SEM-EDX dilakukan sebanyak 2 kali, yaitu sebelum dan sesudah proses *leaching* untuk membandingkan morfologi dan sebaran ion Pb^{2+} sebelum dan setelah proses *leaching*.

Untuk mendapatkan informasi tersebut maka bagian yang diamati adalah penampang lintang dari geopolimer. Penampang lintang geopolimer disiapkan dengan memotong spesimen geopolimer di bagian tengahnya dengan ketebalam sekitar 5 mm. Permukaan hasil pemotongan kemudian digosok/dihaluskan

menggunakan kertas amplas No. 600 hingga rata. Setelah itu, penghalusan dilanjutkan dengan kertas amplas No. 1200 hingga permukaan terlihat mengkilap. Spesimen uji geopolimer tersebut kemudian dilapisi dengan *aloy* emas-paladium untuk memaksimalkan resolusi gambar yang dapat diperoleh menggunakan SEM-EDX Zeiss EVO MA-10 yang ada di Laboratorium Energi dan Lingkungan ITS.

3.8.4 Line Scan dengan SEM-EDX

Pengukuran atau pengamatan pergerakan ion Pb^{2+} dalam geopolimer setelah proses *leaching* dapat menggunakan SEM-EDX dengan pembacaan *line scan*. Metode ini biasanya disebut dengan *Line Scan*. Preparasi sampel uji geopolimer dilakukan pada penampang lintang bagian tepi geopolimer yang kemudian dihaluskan permukaan sesuai dengan prosedur preparasi sampel umum pada SEM. Pembacaan *Line Scan* dilakukan mulai dari tepi terluar menuju kedalam, seperti pada Gambar 3.1:



Gambar 3. 1 Pembacaan *Line Scan* pada sampel geopolimer

3.9 Penentuan Kinetika *Leaching* Pb^{2+} dalam Geopolimer

Penentuan kinetika *leaching* ion Pb^{2+} dalam geopolimer pada penelitian ini menggunakan model kinetika reaksi heterogen

SCM (*Shrinking Core Model*) sesuai dengan literatur pada bab 2.10. Hasil dari pengukuran AAS selanjutnya diolah menjadi grafik kinetika *leaching* dengan memplotkan hasil pengolahan data sesuai dengan persamaan kinetika *leaching*. Adapun persamaan kinetika yang dipakai dalam kinetika *Shrinking Core Model* meliputi 3 persamaan kinetika kontrol reaksi beserta variabel plot grafik linier sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 3.3-3.8:

1. Kinetika kontrol difusi lapisan antarmuka.

$$x = t \quad (3.3)$$

$$y = X_{\text{produk}} \quad (3.4)$$

2. Kinetika kontrol difusi lapisan padatan.

$$x = t \quad (3.5)$$

$$y = X_{\text{produk}} + (1 - X_{\text{pb}}) \ln(1 - X_{\text{pb}}) \quad (3.6)$$

3. Kinetika kontrol reaksi kimia pada permukaan.

$$x = t \quad (3.7)$$

$$y = 1 - \frac{r}{R} = 1 - (1 - X_{\text{produk}})^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Masing-masing dari ketiga model kinetika reaksi kontrol tersebut diplot grafik sesuai dengan persamaannya kinetikanya. Ketiga plot grafik tersebut akan mengikuti persamaan linier $y = ax$, dimana a adalah nilai konstanta dari persamaan kinetika kontrol. Untuk menentukan kontrol yang mendominasi dalam proses *leaching* dapat dilihat dari nilai koefisien korelasi (R^2) yang mendekati 1. Semakin linier grafik yang dihasilkan (nilai R^2 semakin mendekati 1), maka semakin cocok persamaan kinetika *leaching* tersebut digunakan dalam penelitian ini. Dari persamaan kinetika *leaching* yang terpilih paling cocok itulah yang nanti

digunakan untuk memperkirakan jumlah ion logam yang akan keluar dalam waktu tertentu.

3.10 Penentuan Orde Reaksi *Leaching* Pb^{2+}

Orde reaksi *leaching* Pb^{2+} didapatkan dengan memplot hasil konstanta laju dari setiap variasi konsentrasi Pb^{2+} yang berbeda, sesuai dengan Persamaan 3.9 (Luo dkk., 2017):

$$k = k_0 C^n e^{-E_a/(RT)} \quad (3.9)$$

dimana k adalah konstanta laju reaksi, k_0 adalah faktor pre-eksponensial, C adalah konsentrasi Pb^{2+} (mg Pb^{2+} /g geopolimer), n adalah orde reaksi, E_a adalah energi aktivasi, dan T adalah suhu pada saat reaksi berjalan. Untuk mencari nilai orde reaksi (n), Persamaan 3.7 perlu diturunkan menjadi Persamaan 3.10 agar dapat diplot menjadi grafik linier

$$\ln k = \ln k_0 + n \ln C_{Pb} - \frac{E_a}{RT} \quad (3.10)$$

Pada penelitian ini, reaksi *leaching* semua sampel geopolimer dilakukan pada suhu ruang sehingga variabel T pada persamaan dianggap konstan dan penentuan orde reaksi dipengaruhi oleh konsentrasi Pb^{2+} dalam geopolimer.

$$y = ax + b \quad (3.11)$$

$$\ln k = n \ln C_{Pb} + \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (3.12)$$

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Preparasi Larutan Basa Aktivator

Larutan basa aktivator yang digunakan untuk membuat geopolimer merupakan campuran dari larutan NaOH dan *waterglass* (natrium silikat/ $\text{Na}_2\text{SiO}_3(\text{aq})$). Alasan pemilihan campuran NaOH dan natrium silikat sebagai larutan basa aktivator adalah karena campuran tersebut memberikan hasil kuat tekan yang tinggi dibandingkan hanya menggunakan NaOH sebagai larutan basa aktivator (Hadi dkk., 2018). Dalam larutan basa aktivator, NaOH bertindak sebagai agen untuk melarutkan aluminosilikat dari abu layang untuk menjadi monomer, dimer dan oligomer ($[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$) yang akan berpolimerisasi membentuk jaringan/matriks geopolimer. Semakin tinggi konsentrasi NaOH, semakin banyak spesi $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ yang terlarut, sehingga dapat membentuk jaringan geopolimer yang lebih kuat (Fansuri dkk., 2010; Hamidi dkk., 2016). Sementara itu natrium silikat bertindak sebagai agen perekat (*binder*), meningkatkan alkalinitas dan agen penambah spesi Si dalam jaringan geopolimer. Konsentrasi natrium silikat yang ditambahkan memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap kuat tekan yang dihasilkan (Yun-Ming dkk., 2016). Pada konsentrasi campuran NaOH dan natrium silikat tertentu dapat memberikan hasil kuat tekan yang tinggi. Pada penelitian sebelumnya, campuran larutan yang menghasilkan kuat tekan geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI terbaik adalah 50 ml larutan NaOH 14 M dan 80 gram natrium silikat (*waterglass*) (Anisatun, 2014).

Pelarutan pelet NaOH dengan aqua DM hingga 50 ml yang selanjutnya diperam (dibiarkan) selama 24 jam bertujuan untuk mengembalikan suhu larutan NaOH ke suhu normal (suhu

lingkungan). Hal ini dikarenakan reaksi yang terjadi antara pelet NaOH dengan aqua DM merupakan reaksi eksotermis. Begitu juga pada saat pencampuran larutan NaOH dengan natrium silikat juga terjadi reaksi eksotermis, sehingga perlu diperam hingga mencapai suhu normal. Penambahan natrium silikat dalam larutan basa aktivator juga dapat mengurasngi derajat kristalinitas yang akan terbentuk saat geopolimerisasi serta mengurangi kecenderungan *shrinkage* pada jaringan geopolimer (Krisbiantoro, 2015). Pembuatan larutan basa aktivator dilakukan dalam wadah plastik. Hal ini dikarenakan sifat dari larutan basa aktivator mampu melarutkan senyawa silika. Jika pembuatan larutan basa aktivator dilakukan dalam gelas kaca (mengandung silika), maka dikhawatirkan spesi Si yang ada pada gelas kaca tersebut larut ke dalam larutan basa aktivator sehingga merubah komposisi dari larutan basa aktivator itu sendiri.

4.2 Amobilisasi logam berat Pb^{2+} menggunakan geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI

Geopolimer yang digunakan untuk amobilisasi logam berat Pb^{2+} disintesis menggunakan komposisi yang telah dilaporkan oleh Anisatun (2014), antara lain 260 g abu layang PT. IPMOMI, 28 g pelet NaOH, 3,4 g $Al(OH)_3$, 80 g *water glass*, dan total aqua DM sebanyak 61,3 ml. Berdasarkan komposisi resep tersebut, diperoleh rasio perbandingan mol yang digunakan dalam sintesis geopolimer sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Rasio perbandingan mol dalam geopolimer

Rasio	Nilai
<i>Solid/Liquid</i> (S/L)	4,10
SiO_2/Al_2O_3	6,79
Na_2O/SiO_2	0,23
Na_2O/Al_2O_3	1,59
Rasio H_2O/Na_2O	7,80

Perhitungan rasio pada Tabel 4.1 diperoleh dengan mengetahui kandungan logam oksida/spesi kimia yang terkandung dalam setiap bahan penyusun geopolimer. Dari komposisi tersebut, sistem jaringan yang akan dihasilkan oleh geopolimer adalah N-A-S-H (natrium aluminasilikat hidrat) karena adanya peran spesi Al dan Na dalam pembentukan struktur geopolimer. Hal ini berbeda dengan semen OPC, dimana sistem jaringan utamanya adalah C-S-H (kalsium silikon hidrat) (Nicolas dkk., 2017).

Pemakaian $Pb(NO_3)_{2(s)}$ sebagai agen kontaminan buatan disebabkan karena senyawa tersebut mudah larut dalam air, sehingga pelepasan Pb^{2+} dari senyawa timbal(II) nitrat dapat berjalan sempurna. Penambahan $Al(OH)_3$ kedalam abu layang bertujuan untuk menambah jumlah spesi Al yang terkandung dalam abu layang. Pencampuran antara abu layang PT. IPMOMI, ion logam Pb^{2+} , dan $Al(OH)_3$ dilakukan terlebih dahulu sebelum ditambahkan larutan basa aktivator. Hal tersebut bertujuan untuk mengkondisikan abu layang (sumber aluminosilikat) rendah logam menjadi abu layang kaya logam Pb pada awal pembuatan.

Abu layang PT. IPMOMI yang sudah dipreparasi kemudian ditambahkan dengan larutan basa aktivator sambil dilakukan pengadukan selama 4 menit. Pasta yang dihasilkan kemudian dituang ke dalam cetakan silinder yang sudah disiapkan. Adonan geopolimer dalam cetakan tersebut kemudian digetarkan agar gelembung-gelembung yang masih terperangkap dalam adonan dapat keluar, sehingga tidak membentuk pori dalam jaringan geopolimer. Cetakan yang berisi pasta geopolimer tersebut kemudian didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang sambil bagian atas cetakan ditutup dengan plastik. Penutupan dengan plastik tersebut bertujuan untuk menjaga kelembapan geopolimer dalam proses pembentukan jaringan. Setelah 24 jam, geopolimer selanjutnya dikeluarkan dari cetakan dan kemudian dimasukkan ke plastik klip untuk dipanaskan pada suhu $55^{\circ}C$

selama 24 jam. Perlakuan tersebut dimaksudkan agar air yang terdapat dalam jaringan geopolimer tidak menguap dengan cepat (Nuruddin dkk., 2011). Proses pematangan jaringan (*curing*) berlangsung selama 7 hari, yang kemudian diuji sifat mekanik (uji kuat tekan) dan kemampuan amobilisasi logam berat Pb^{2+} (uji *leaching*)

4.3 Hasil Kuat Tekan Geopolimer dengan Penambahan Ion Logam Berat Pb^{2+}

4.3.1 Sebelum Proses *Leaching*

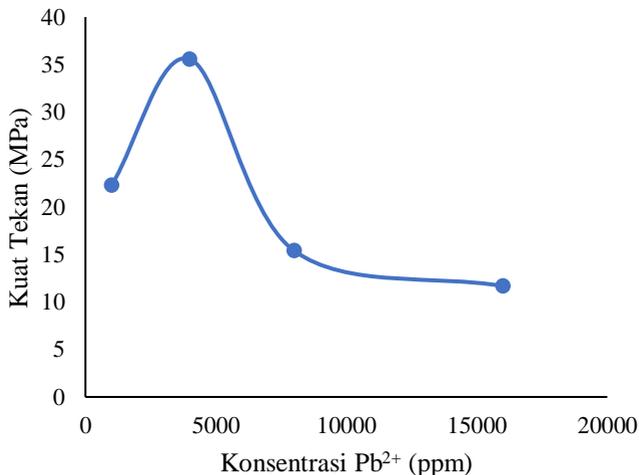
Pengujian kuat tekan semua sampel variasi geopolimer dilakukan pada geopolimer yang telah berusia 7 hari. Hal ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi konsentrasi ion Pb^{2+} serta batas optimal penambahan ion Pb^{2+} yang ditambahkan ke dalam geopolimer terhadap kuat tekan yang dihasilkan. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine*. Sampel terlebih dahulu dipersiapkan dengan menghaluskan permukaan sentuh sampel uji bagian atas dan bawah sampai rata agar seimbang dengan permukaan sentuh alat kuat tekan. Benda uji geopolimer memiliki tinggi 4 cm dan diameter 2 cm. Rasio antara tinggi dan diameter benda uji geopolimer tersebut sesuai dengan SNI 1974:2011 tentang cara uji kuat tekan beton pada benda uji silinder (Badan Standarisasi Nasional, 2011). Data kuat tekan yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa penambahan ion logam berat Pb^{2+} memberikan pengaruh terhadap kuat tekan yang dihasilkan geopolimer. Sementara itu, grafik kuat tekan terhadap konsentrasi Pb^{2+} ditampilkan pada Gambar 4.1. Gambar 4.1 menunjukkan bahwa penambahan Pb^{2+} pada konsentrasi tertentu dapat mempengaruhi kuat tekan geopolimer. Nilai kuat tekan pada penambahan 1000 ppm Pb^{2+} adalah sebesar 22,29 Mpa. Nilai ini

lebih tinggi dibandingkan geopolimer tanpa penambahan ion Pb^{2+} . Nilai tersebut juga mengalami peningkatan hingga penambahan ion Pb^{2+} 4000 ppm dengan nilai kuat tekan mencapai 35,56 MPa. Penambahan konsentrasi ion Pb^{2+} selanjutnya menyebabkan nilai kuat tekan menurun.

Tabel 4. 2 Kuat tekan geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} setelah proses *leaching*

No	Konsentrasi (ppm)	Kuat Tekan (MPa)
1	0	14,86
2	1000	22,29
3	4000	35,56
4	8000	15,39
5	16000	11,67



Gambar 4. 1 Kuat tekan geopolimer dengan variasi penambahan konsentrasi Pb^{2+}

Perubahan kuat tekan yang dihasilkan geopolimer pada setiap variasi konsentrasi Pb^{2+} dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jumlah konsentrasi logam berat Pb^{2+} yang ditambahkan, anion dari kontaminan logam yang ditambahkan (NO_3^- dari $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), volume rongga kosong yang terbentuk, enkapsulasi ion logam berat serta reaksi kimia antara ion logam berat dengan silikat dan aluminat dalam matriks geopolimer (Supriadi dkk., 2016). Keberadaan ion Pb^{2+} dalam jaringan geopolimer memiliki dampak positif dan negatif terhadap kuat tekan yang dihasilkan geopolimer.

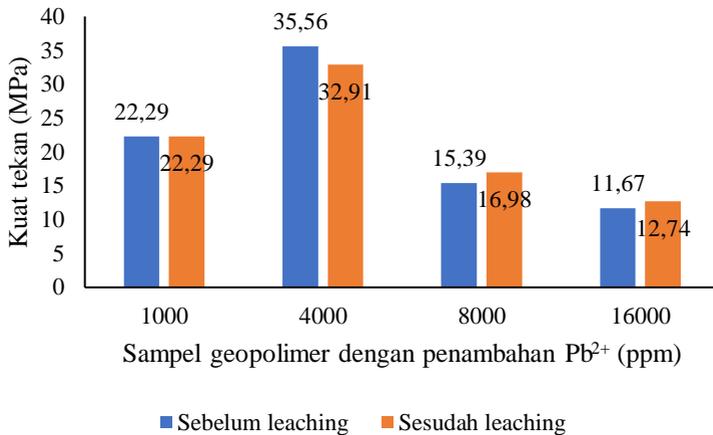
Keberadaan ion Pb^{2+} yang terenkapsulasi fisik dalam geopolimer dapat mengisi rongga-rongga yang terdapat dalam matriks geoplimer. Hal tersebut tentunya akan mempengaruhi kuat tekan yang dihasilkan oleh geopolimer. Semakin sedikit volume pori yang terbentuk, maka akan semakin besar kuat tekan yang dihasilkan geopolimer (Supriadi dkk., 2016). Keberadaan ion Pb^{2+} dalam geopolimer juga dapat menggantikan peran ion Na^+ sebagai penyeimbang muatan pada tetrahedral aluminat $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ (Van Jaarsveld dan Van Deventer, 1999). Ion Pb^{2+} memiliki jari-jari ion yang lebih besar daripada ion Na^+ , dimana jari-jari ion Pb^{2+} sebesar 133 pm sedangkan ion Na^+ hanya sebesar 116 pm. Jari-jari ion Pb^{2+} yang lebih besar tersebut akan menghasilkan struktur jaringan yang lebih rapat dan kompak, sehingga menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan geopolimer standar (tanpa penambahan Pb^{2+}). Tetapi, keberadaan ion Pb^{2+} yang berlebihan mampu merusak jaringan geopolimer. Ion Pb^{2+} yang melebihi kemampuan/kapasitas enkapsulasi dalam jaringan geopolimer akan membuat *cracking* (retakan) dalam struktur aluminosilikat. Hal ini dapat menjelaskan peningkatan kuat tekan dengan penambahan Pb^{2+} hingga 4000 ppm, dan kuat tekan langsung menurun pada penambahan Pb^{2+} melebihi 4000 ppm. Matriks geopolimer tidak mampu menampung Pb^{2+} melebihi 4000 ppm,

akibatnya matriks geopolimer yang menjadi rusak dan menghasilkan struktur yang cacat dengan banyak retakan. Penurunan kuat tekan geopolimer juga dipengaruhi oleh anion NO_3^- yang terkandung dalam kontaminan Pb^{2+} (Lancellotti dkk., 2015). Ion NO_3^- mampu menghalangi proses geopolimerisasi pada saat pencampuran basa pengaktif karena NO_3^- akan bereaksi dengan Na^+ dari basa pengaktif membentuk NaNO_3 . Dengan adanya hal tersebut, gel yang terbentuk pada saat geopolimerisasi menjadi sedikit sehingga struktur yang dihasilkan tidak terkoneksi/tersambung secara merata (Komnitsas dkk., 2013; Xu dkk., 2001). Hal ini tentu saja mempengaruhi struktur jaringan aluminosilikat yang terbentuk dalam geopolimer dan menurunkan kuat tekan geopolimer.

Penambahan kontaminan Pb^{2+} dalam geopolimer memiliki batas optimal tertentu agar tidak mengalami efek negatif. Pada penelitian ini, dapat dilihat dari data kuat tekan yang dihasilkan bahwa batas toleransi penambahan konsentrasi optimal sebesar 4000 ppm. Penambahan konsentrasi melebihi batas toleransi dalam matriks geopolimer mengakibatkan penurunan nilai kuat tekan yang dihasilkan. Dapat dilihat pada penambahan konsentrasi Pb^{2+} 8000 ppm dan 16000 ppm justru menurunkan kuat tekan geopolimer.

4.3.2 Setelah Proses *Leaching*

Hasil uji kuat tekan dari berbagai sampel geopolimer dan perbandingannya dengan sampel sebelum uji *leaching* ditunjukkan pada Gambar 4.2. Gambar 4.2 menunjukkan bahwa secara umum, proses *leaching* Pb^{2+} tidak berpengaruh negatif terhadap kuat tekan geopolimer. Penurunan kuat tekan geopolimer hanya tampak pada konsentrasi Pb^{2+} 4000 ppm, sementara pada konsentrasi yang lain, kuat tekan geopolimer adalah sama bahkan cenderung mengalami peningkatan.



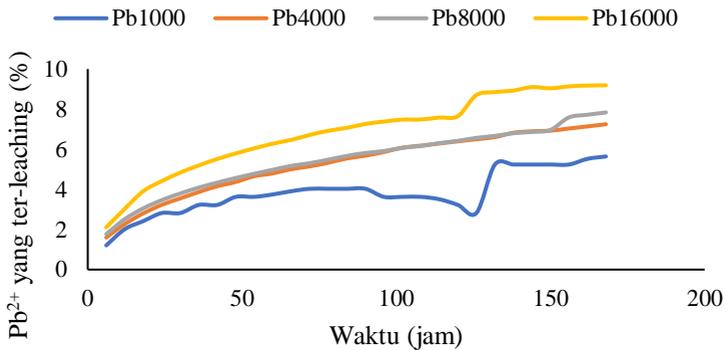
Gambar 4. 2 Perbedaan kuat tekan geopolimer sebelum dan sesudah *leaching*

Penurunan kuat tekan pada geopolimer dengan konsentrasi Pb²⁺ 4000 ppm terjadi dikarenakan faktor pengamplasan pada saat preparasi sampel uji kuat tekan. Permukaan yang tidak rata atau tidak seimbang pada saat pengujian kuat tekan membuat pembacaan pada alat uji menjadi tidak akurat. Pada umumnya, geopolimer dengan sistem jaringan N-A-S-H memiliki ketahanan asam yang lebih baik daripada semen OPC yang memiliki sistem C-S-H (Ariffin dkk., 2013). Hal tersebut dapat diamati pada geopolimer dengan konsentrasi Pb²⁺ 1000, 8000, dan 16000 ppm yang tidak mengalami penurunan kuat tekan setelah *leaching*. Peningkatan kuat tekan geopolimer terjadi karena pematangan jaringan (*curing*) geopolimer dimungkinkan masih berlanjut.

4.4 Hasil Uji *Leaching* Pb²⁺ pada Geopolimer

Uji *leaching* pada geopolimer bertujuan untuk mengetahui kemampuan geopolimer dalam mengamobilisasi ion logam berat pada kondisi asam. Larutan asam yang digunakan pada uji *leaching*

adalah larutan buffer asetat. Penggunaan sistem buffer sebagai pelarut adalah untuk menjaga stabilitas pH larutan selama pengujian *leaching*. Selain itu, asam asetat merupakan asam organik yang banyak ditemukan dalam tanah. Pengambilan *leachate* yang dilakukan setiap 6 jam sekali selanjutnya di uji AAS untuk mengetahui konsentrasi Pb^{2+} yang ter-*leaching*. Hasil uji *leaching* dari berbagai sampel geopolimer ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan Tabel 4.3.



Gambar 4. 3 Konsentrasi ion Pb^{2+} yang ter-*leaching* dengan lama waktu uji

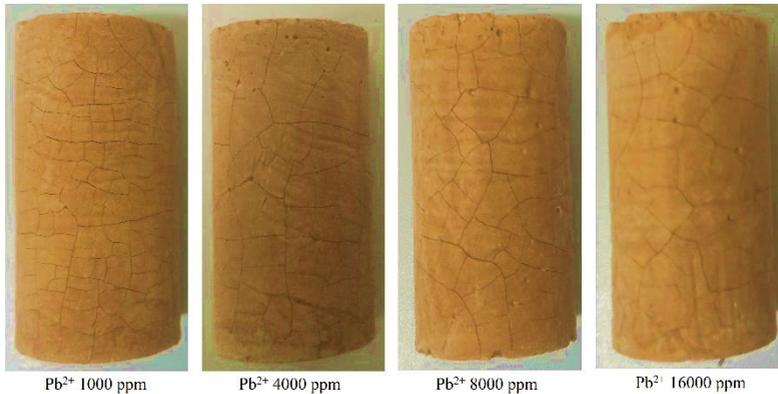
Gambar 4.3 menunjukkan bahwa jumlah ion Pb^{2+} yang ter-*leaching* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi ion Pb^{2+} yang ditambahkan pada saat sintesis dan semakin meningkat pula seiring dengan semakin lamanya waktu uji *leaching*. Hasil *leaching* Pb^{2+} pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} 1000 ppm memiliki hasil *leaching* terendah sebesar 5,64% dan geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} 16000 ppm menunjukkan hasil *leaching* tertinggi sebesar 9,1869%. Hasil *leaching* dari semua sampel geopolimer meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi Pb^{2+} dalam geopolimer. Data hasil pengujian *leaching* memiliki korelasi positif dengan data nilai kuat tekan geopolimer pada setiap sampel.

Geopolimer dengan nilai kuat tekan terendah, yaitu geopolimer dengan penambahan ion Pb^{2+} 16000 ppm memiliki nilai % ion Pb^{2+} yang ter-*leaching* paling besar. Keberadaan ion Pb^{2+} dalam jaringan geopolimer yang melebihi batas optimum akan merubah/modifikasi struktur jaringan geopolimer menjadi lebih tidak stabil (Guo, Pan, dkk., 2017). Akibatnya, kemampuan dalam mengamobilisasi ion logam berat dalam geopolimer juga menurun seiring dengan penambahan ion Pb^{2+} yang berlebihan.

Tabel 4. 3 Konsentrasi total ion Pb^{2+} yang ter-*leaching* pada akhir uji *leaching*

Geopolimer		Konsentrasi yang Pb^{2+} ter- <i>leaching</i>		
Sampel	Pb^{2+} (mg)	(ppm)	(mg)	(%)
Pb1000	68,006	1,918	3,836	5,640
Pb4000	257,119	9,315	18,630	7,246
Pb8000	556,157	21,781	43,562	7,833
Pb16000	1051,820	48,315	96,630	9,187

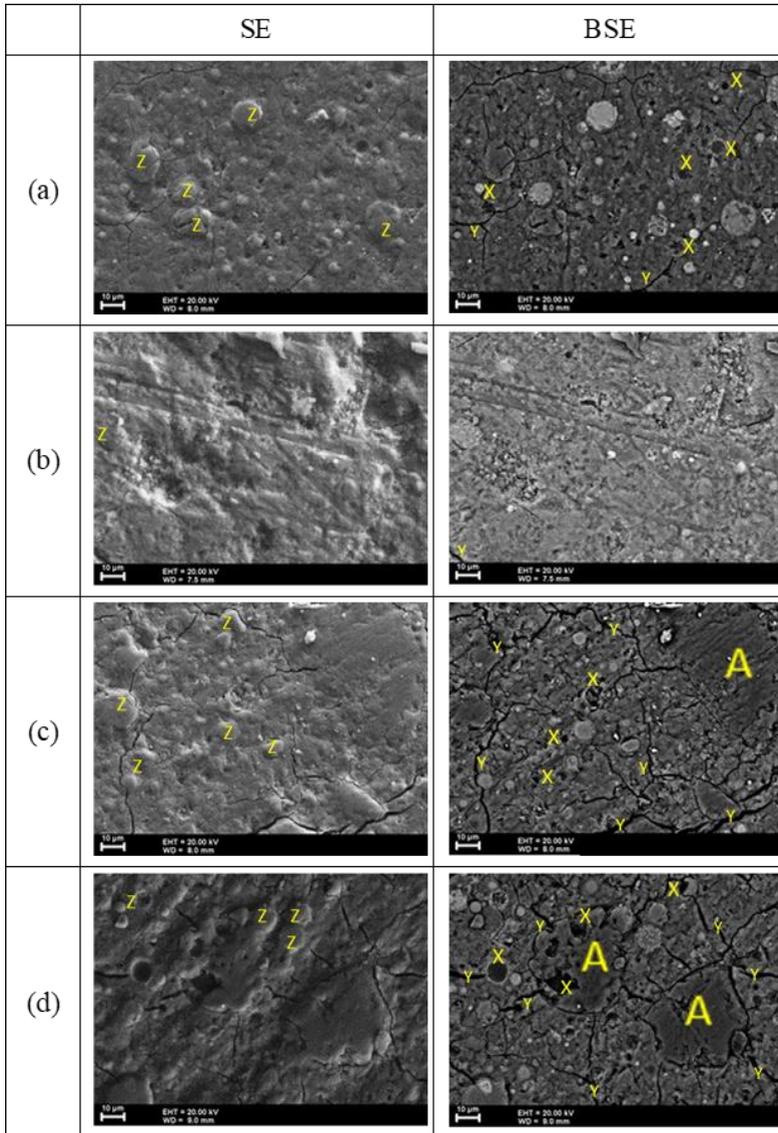
Selain itu, peningkatan konsentrasi Pb^{2+} yang ter-*leaching* selama pengujian juga dipengaruhi oleh penetrasi larutan pelindi untuk berdifusi ke dalam geopolimer. Semakin kuat larutan melakukan penetrasi, maka semakin dalam larutan pelindi dapat berdifusi dan semakin banyak pula terjadi kontak antara ion Pb^{2+} dengan pelarut. Hal tersebut akan meningkatkan konsentrasi ion Pb^{2+} yang keluar dari jaringan geopolimer. Mikrostruktur dari geopolimer juga menjadi faktor dalam penetrasi larutan pelindi (Richardson dkk., 2002). Gambar 4.4 menunjukkan permukaan geopolimer setelah pelindian tampak bahwa permukaan luar geopolimer mengalami keretakan. Hal ini mengindikasikan bahwa adanya larutan pelindi yang masuk ke dalam badan geopolimer tersebut yang akhirnya dapat melarutkan ion logam Pb^{2+} .



Gambar 4. 4 Permukaan luar sampel geopolimer setelah pengujian *leaching*

4.5 Analisa Morfologi dan Persebaran Pb²⁺

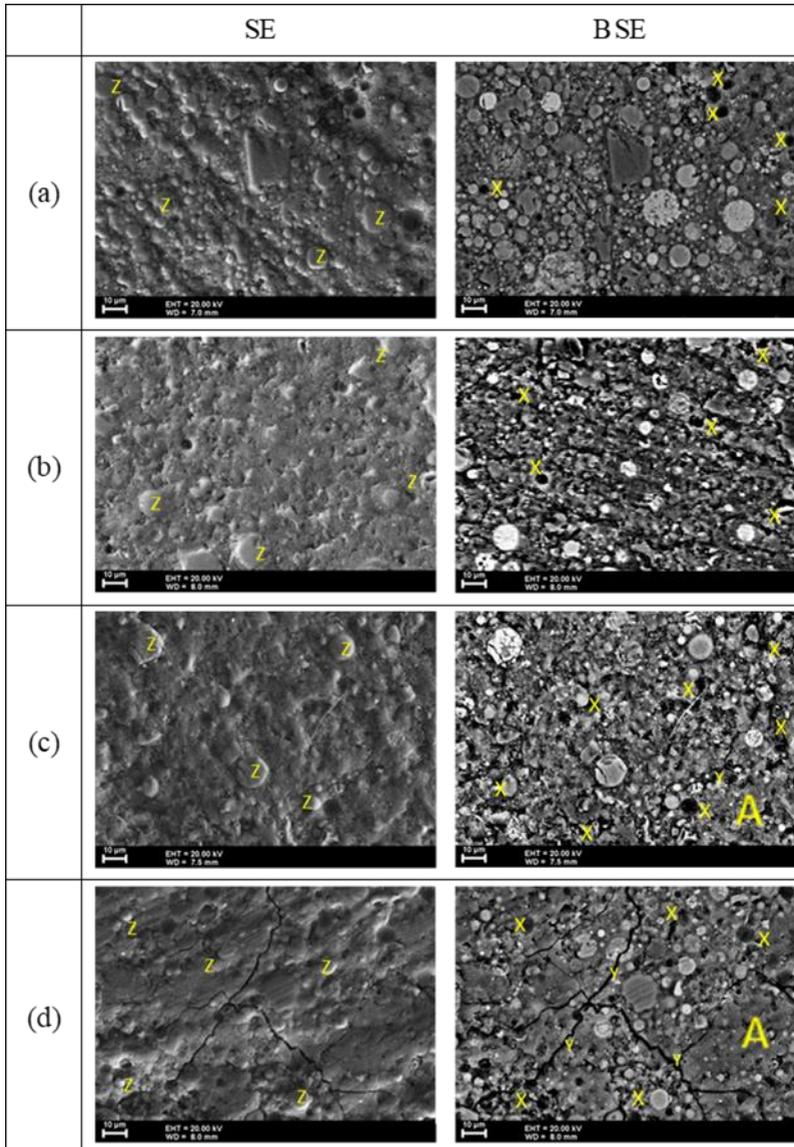
Sampel geopolimer dengan penambahan Pb²⁺ dianalisis menggunakan SEM-EDX untuk mengetahui persebaran ion Pb²⁺ dan morfologi mikrostruktur dari geopolimer. Analisis dilakukan sebelum dan setelah proses *leaching* bertujuan untuk mengetahui perbedaan yang dihasilkan setelah proses *leaching*. Gambar 4.5 merupakan hasil SEM dari geopolimer dengan penambahan ion Pb²⁺ sebelum proses *leaching* yang menunjukkan masih adanya pori (tanda “X”) dan retakan (tanda “Y”) yang terbentuk, serta adanya partikel abu layang yang tidak bereaksi (tanda “Z”) pada proses geopolimerisasi yang ditunjukkan dengan adanya butiran-butiran pada semua sampel konsentrasi Pb²⁺ (Xu dan Shi, 2018). Namun, jumlah partikel abu layang yang tidak bereaksi cenderung sedikit pada geopolimer dengan Pb²⁺ 4000 ppm jika dibandingkan dengan sampel lainnya.



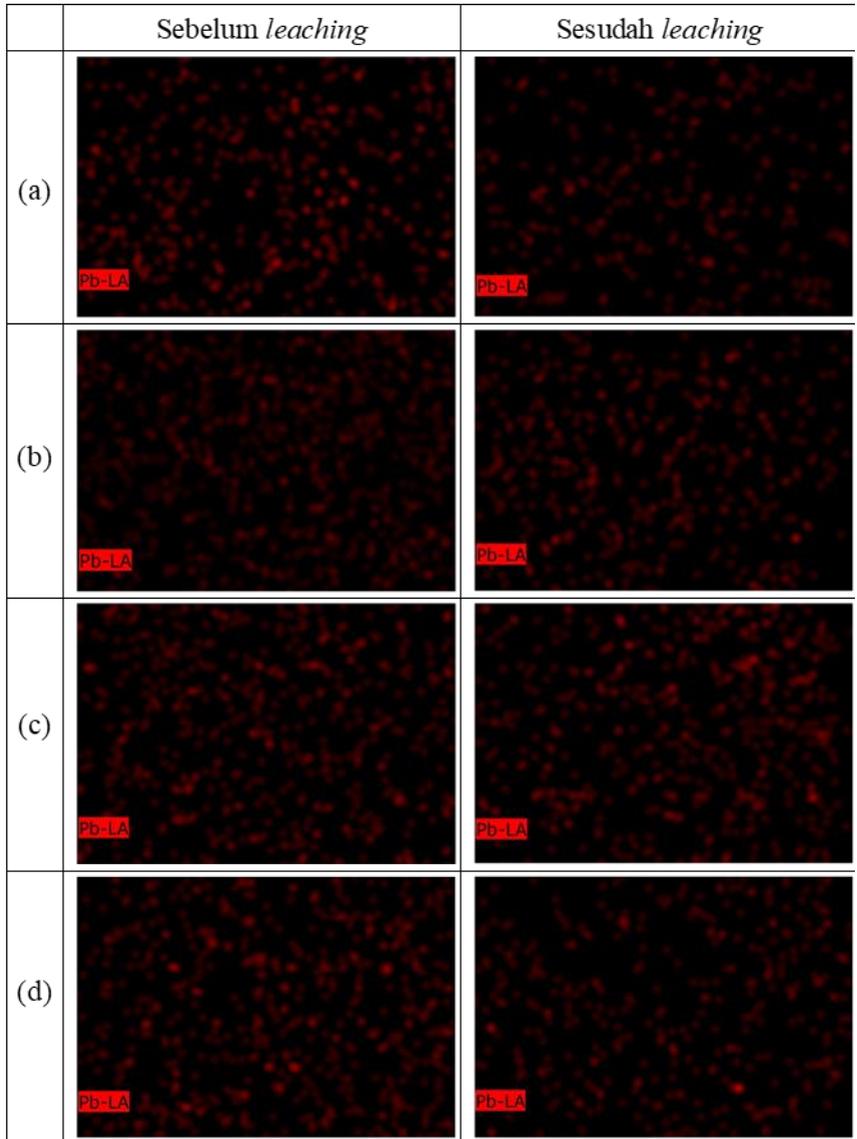
Gambar 4. 5 Mikrograf SEM geopolimer penambahan Pb^{2+} (a) 1000, (b) 4000, (c) 8000, dan (d) 16000 ppm sebelum *leaching* dengan detektor SE dan BSE.

Topografi permukaan pada geopolimer Pb^{2+} 4000 ppm terlihat lebih merata dibandingkan sampel geopolimer yang lain. Hal ini mengindikasikan bahwa partikel abu layang hampir semuanya bereaksi. Selain itu, jumlah pori dan retakan yang terlihat pada geopolimer dengan konsentrasi Pb^{2+} 4000 ppm juga sangat sedikit. Jumlah pori dan retakan dalam geopolimer relatif meningkat ketika penambahan konsentrasi Pb^{2+} melebihi 4000 ppm. Pada geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} 8000 dan 16000 ppm terlihat adanya gumpalan besar. Gumpalan tersebut dimungkinkan adalah partikel yang mengalami aglomerasi (ditandai sebagai "A") (Kutchko dan Kim, 2006). Pengamatan mikrograf SEM memiliki korelasi positif dengan data tren kuat tekan yang dihasilkan geopolimer sebelum proses *leaching* (Gambar 4.1). Penambahan konsentrasi Pb^{2+} berlebih akan mengarahkan pembentukan jaringan geopolimer menjadi semakin buruk yang ditandai dengan meningkatnya jumlah pori, retakan dan partikel abu layang yang tidak bereaksi yang dapat diamati pada hasil SEM. Hal tersebut dapat menghasilkan penurunan kuat tekan geopolimer.

Gambar 4.6 menunjukkan hasil SEM dari geopolimer setelah *leaching*. Pengambilan foto SEM dilakukan pada tepi geopolimer. Hasil SEM geopolimer setelah *leaching* cenderung menunjukkan peningkatan jumlah pori pada semua sampel jika dibandingkan dengan hasil SEM sebelum *leaching* (Gambar 4.5). Peningkatan jumlah pori setelah *leaching* diperkirakan karena terlepasnya ion Pb^{2+} yang teramobilisasi dalam jaringan geopolimer (Supriadi dkk., 2016). Untuk lebih jelasnya, diperlukan foto persebaran ion Pb^{2+} dalam geopolimer sebelum dan sesudah proses *leaching* yang ditunjukkan pada Gambar 4.7. Semua sampel konsentrasi Pb^{2+} dalam geopolimer pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa konsentrasi Pb^{2+} dalam geopolimer relatif berkurang setelah proses *leaching*, sesuai dengan hasil *leaching* pada Tabel 4.4 yang menunjukkan peningkatan konsentrasi Pb^{2+} yang ter-*leaching*.



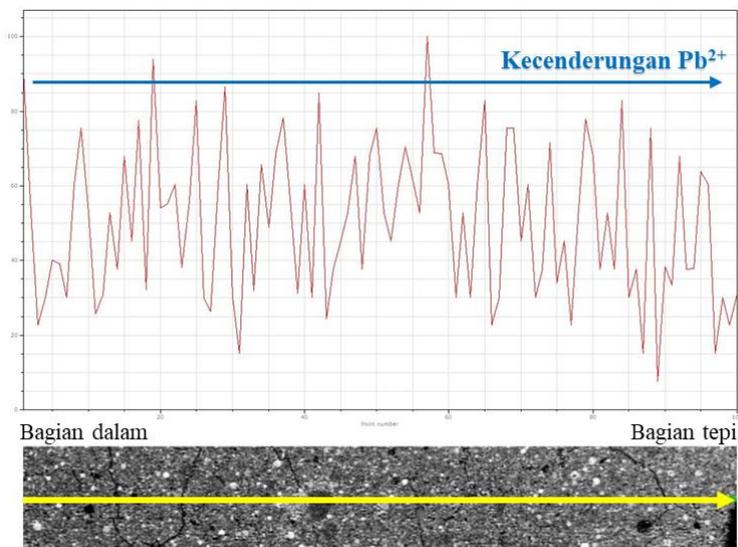
Gambar 4. 6 Mikrograf SEM geopolimer penambahan Pb^{2+} (a) 1000, (b) 4000, (c) 8000, dan (d) 16000 ppm sebelum *leaching* dengan detektor SE dan BSE.



Gambar 4. 7 Persebaran Pb^{2+} dalam gepolimer dengan penambahan Pb^{2+} (a) 1000, (b) 4000, (c) 8000 dan (d) 16000 ppm sebelum dan setelah proses *leaching*

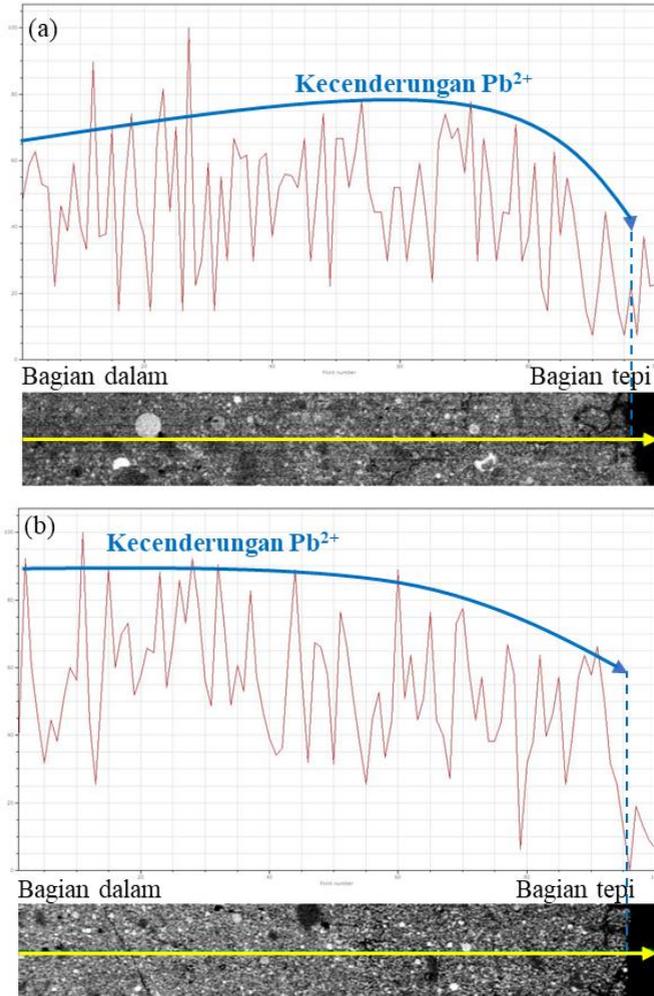
4.6 Pergerakan Pb^{2+} dalam Geopolimer setelah *Leaching*

Untuk melihat pergerakan ion Pb^{2+} dalam geopolimer, diperlukan pembacaan *line scan* pada geopolimer sebelum dan sesudah *leaching* menggunakan SEM-EDX. Pembacaan dilakukan pada bagian penampang lintang tepi terluar geopolimer untuk meninjau persebaran Pb^{2+} . Pembacaan pada sampel geopolimer sebelum proses *leaching* dimaksudkan sebagai pembandingan atau standar pada setiap sampel konsentrasi Pb^{2+} . Profil *line scan* pada geopolimer sebelum proses *leaching* menunjukkan tren yang sama pada semua sampel konsentrasi Pb^{2+} , seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Profil *Line Scan* Pb^{2+} pada geopolimer dengan konsentrasi 1000 ppm sebelum *leaching*

Profil *Line Scan* Pb^{2+} pada geopolimer sebelum proses *leaching* memiliki orientasi yang cenderung membentuk garis lurus. Hal tersebut menandakan bahwa ion Pb^{2+} pada semua sampel geopolimer sebelum *leaching* memiliki persebaran yang merata dalam jaringan mulai dari bagian dalam hingga tepi geopolimer.



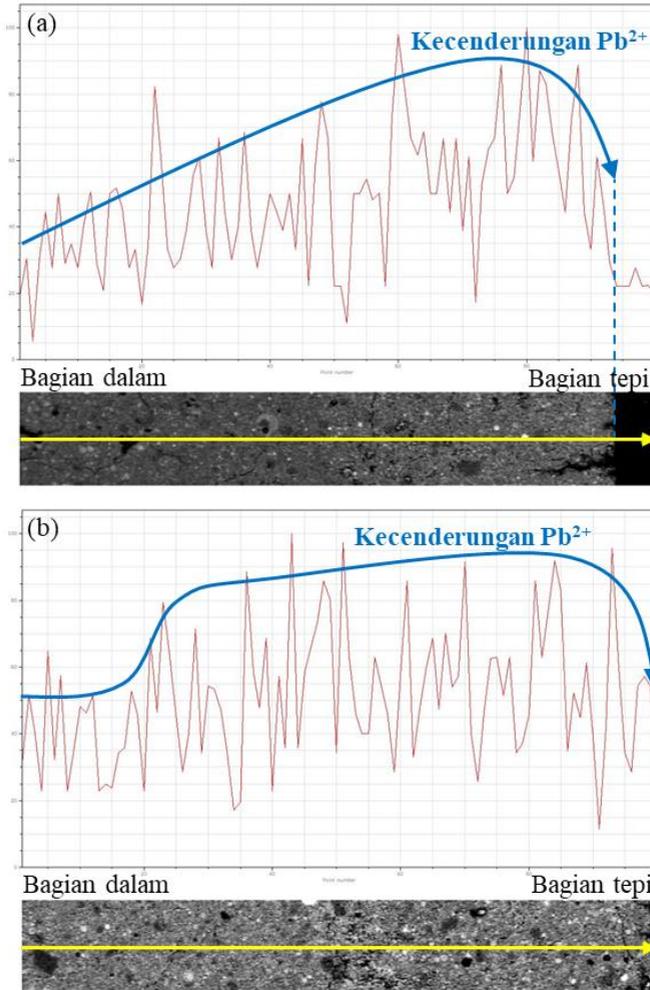
Gambar 4. 9 Profil *line scan* Pb²⁺ pada geopolimer konsentrasi (a) 1000 dan (b) 4000 ppm setelah *leaching* (Tren A)

Dari Gambar 4.9, dapat dilihat tren yang dihasilkan dari *Line Scan* pada geopolimer dengan Pb²⁺ 1000 ppm dan 4000 ppm setelah *leaching* relatif sama. Tren yang dihasilkan kedua sampel tersebut (Tren A) menunjukkan bahwa pada bagian tepi luar

mengalami penurunan konsentrasi Pb^{2+} yang ditunjukkan dengan intensitas yang ditunjukkan yang relatif menurun pada bagian tepi. Sedangkan pada bagian dalam relatif tidak mengalami perubahan konsentrasi atau intensitas (konstan). Hal ini dimungkinkan proses *leaching* Pb^{2+} dari geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} 1000 ppm dan 4000 ppm terjadi di dalam lapisan terluar saja, sedangkan lapisan terdalam tidak terlalu berubah konsentrasinya. Diperkirakan larutan pelindi tidak dapat masuk/berdifusi terlalu dalam pada lapisan geopolimer, sehingga ion Pb^{2+} pada bagian dalam geopolimer tidak mengalami kontak dan tidak berkurang konsentrasinya.

Profil *line scan* pada geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} 8000 ppm memiliki tren yang sama dengan profil *line scan* Pb^{2+} 16000 ppm, ditunjukkan pada Gambar 4.10. Akan tetapi, kedua tren yang dihasilkan dari profil *line scan* geopolimer tersebut berbeda dengan tren profil *line scan* pada geopolimer Pb^{2+} 1000 dan 4000 ppm setelah *leaching* (Gambar 4.9). Tren pada profil *line scan* Pb^{2+} pada geopolimer 8000 dan 16000 ppm cenderung terjadi peningkatan dari bagian dalam menuju bagian tengah, kemudian terjadi penurunan pada bagian tepi luar. Hal ini dimungkinkan karena larutan pelindi dapat berdifusi ke dalam lapisan geopolimer lebih dalam jika dibandingkan dengan profil *line scan* Tren A. Akibatnya, kontak antara larutan pelindi dengan Pb^{2+} semakin banyak dan semakin dalam laju difusi larutan pelindinya. Ion Pb^{2+} yang mengalami kontak dengan larutan pelindi dan berhasil terlepas dari jaringan geopolimer tersebut kemudian terbawa keluar bersama larutan pelindi dengan kembali melewati lapisan geopolimer. Pada bagian tengah geopolimer diperkirakan terjadi penumpukan ion Pb^{2+} , sehingga intensitas Pb^{2+} yang terbaca pada *line scan* meningkat (tren mengalami kenaikan). Persitiwa perpindahan ion Pb^{2+} dari bagian dalam menuju bagian tengah tersebut terjadi bersamaan dengan peristiwa perpindahan ion Pb^{2+}

yang terlepas dari bagian tepi menuju lingkungan luar geopolimer, ditandai dengan menurunnya intensitas pada bagian tepi geopolimer (mengalami penurunan).

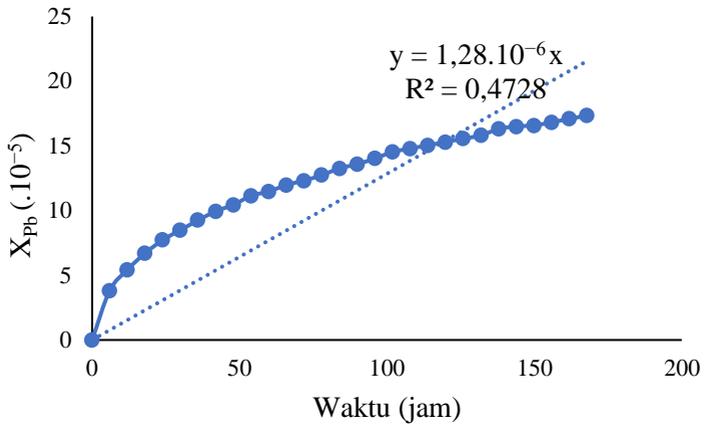


Gambar 4. 10 Profil *line scan* Pb²⁺ pada geopolimer konsentrasi (a) 8000 dan (b) 16000 ppm setelah leaching (Tren B)

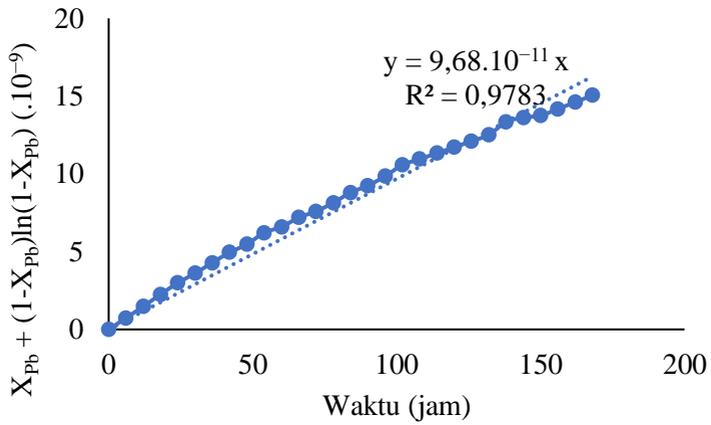
4.7 Penentuan Model Kinetika Leaching Pb^{2+}

Permodelan kinetika ini dilakukan untuk mengetahui faktor yang paling berpengaruh (dominan) dalam proses leaching Pb^{2+} dari badan geopolimer. Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah kinetika *Shrinking-Core Model* (SCM). Model tersebut dipilih karena dianggap lebih sesuai dengan kondisi pada saat pengujian *leaching*, dimana reaksi yang berlangsung termasuk reaksi heterogen antara fluida larutan pelindi dengan sampel padatan geopolimer (Levenspiel, 1999; Y. Xu dkk., 2018). Dalam kinetika SCM, terdapat tiga variabel kontrol (faktor) yang mempengaruhi laju kinetika *leaching* yakni kontrol difusi antarmuka, kontrol difusi lapisan padatan dan kontrol reaksi di permukaan inti. Ketiga variabel kontrol tersebut memiliki persamaan kinetika yang berbeda pula.

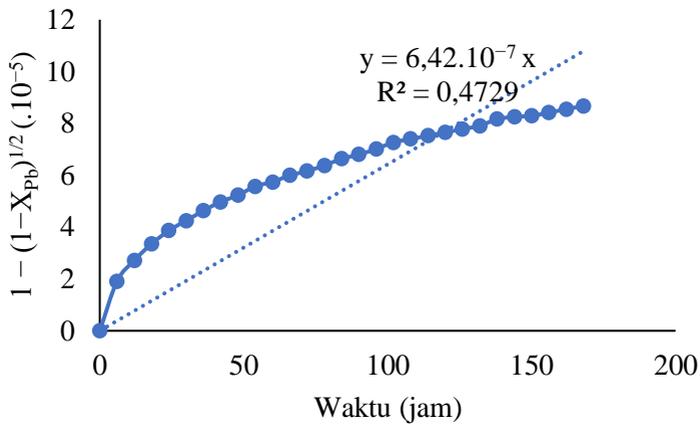
Geopolimer yang digunakan dalam penentuan kinetika leaching adalah geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} 4000 ppm karena memiliki kuat tekan tertinggi. Hasil konsentasi (ppm) pada pengujian *leaching* kemudian diolah sehingga diperoleh miligram (mg) Pb^{2+} yang terlarut pada setiap waktu pengambilan larutan sampel. Setelah mendapatkan jumlah mg Pb^{2+} yang terlarut, data kemudian diolah kedalam persamaan pada setiap variabel kontrol SCM. Grafik yang dihasilkan dari setiap persamaan kinetika kontrol kemudian ditentukan persamaan garis linier dengan fungsi $y = ax$, dimana garis linier tersebut memotong titik 0 (intersep = 0) Persamaan dengan nilai koefisien relasi (R) paling mendekati 1 merupakan model persamaan yang paling tepat untuk proses *leaching* logam Pb^{2+} dari geopolimer. Hasil plot untuk ketiga model kinetika ditampilkan pada Gambar 4.11-4.13. Sementara itu nilai koefisien korelasi ketiga grafik ditunjukkan pada Tabel 4.4.



Gambar 4. 11 Kinetika SCM dengan kontrol difusi lapisan antarmuka



Gambar 4. 12 Kinetika SCM dengan kontrol difusi lapisan padatan



Gambar 4. 13 Kinetika SCM dengan kontrol reaksi kimia pada permukaan inti

Tabel 4. 4 Nilai R^2 pada ketiga grafik persamaan kinetika kontrol

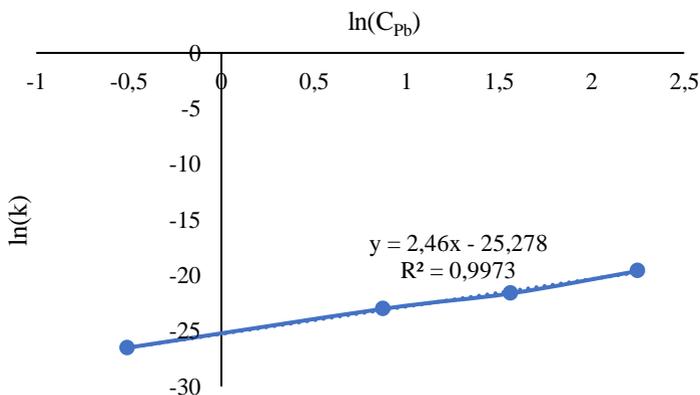
No	Persamaan Kinetika Kontrol	(R^2)	Koefisien Korelasi (R)
1	Difusi lapisan antarmuka	0,4728	0,6876
2	Difusi lapisan padatan	0,9783	0,9891
3	Reaksi kimia pada permukaan	0,4729	0,6876

Hasil perbandingan nilai koefisien korelasi (R) dari ketiga persamaan pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa kinetika *leaching* pada penelitian ini sesuai dengan model kinetika SCM dengan didominasi oleh kontrol difusi lapisan padatan. Hal ini menunjukkan bahwa proses *leaching* Pb^{2+} dari geopolimer terjadi di dalam lapisan padatan (dalam jaringan) geopolimer. Ion Pb^{2+} akan keluar bersama dengan larutan pelindi yang masuk kedalam jaringan geopolimer. Lapisan antarmuka yang dibentuk antara padatan

geopolimer dengan larutan pelindih tidak memberikan pengaruh yang signifikan, ditunjukkan dari plot kinetika kontrol lapisan antarmuka yang tidak menghasilkan garis linier. Faktor yang mempengaruhi keluarnya Pb^{2+} dari dalam lapisan padatan adalah fluida larutan pelindi, kerapatan jaringan geopolimer, dan kekuatan larutan pelindi untuk melepaskan Pb^{2+} dalam jaringan (Levenspiel, 1999).

4.8 Penentuan Orde Reaksi *Leaching* Pb^{2+}

Orde reaksi *leaching* Pb^{2+} dari geopolimer dapat ditentukan dengan memplotkan konstanta laju dari setiap variasi konsentrasi Pb^{2+} yang ditambahkan dalam geopolimer. Persamaan yang digunakan untuk menentukan orde reaksi *leaching* Pb^{2+} seperti pada Persamaan 3.8. Persamaan 3.8. tersebut kemudian diubah menjadi bentuk persamaan garis lurus sebagaimana ditampilkan pada Persamaan 3.9(a dan b). Dari persamaan tersebut, variabel T dianggap konstan dikarenakan *leaching* semua sampel geopolimer berlangsung pada kondisi ruang. Akibatnya, variabel E_a/RT merupakan konstanta dalam penelitian ini. Dengan hal tersebut, maka akan didapatkan persamaan linier yaitu:



Gambar 4. 14 Grafik orde reaksi pada proses *leaching* Pb^{2+}

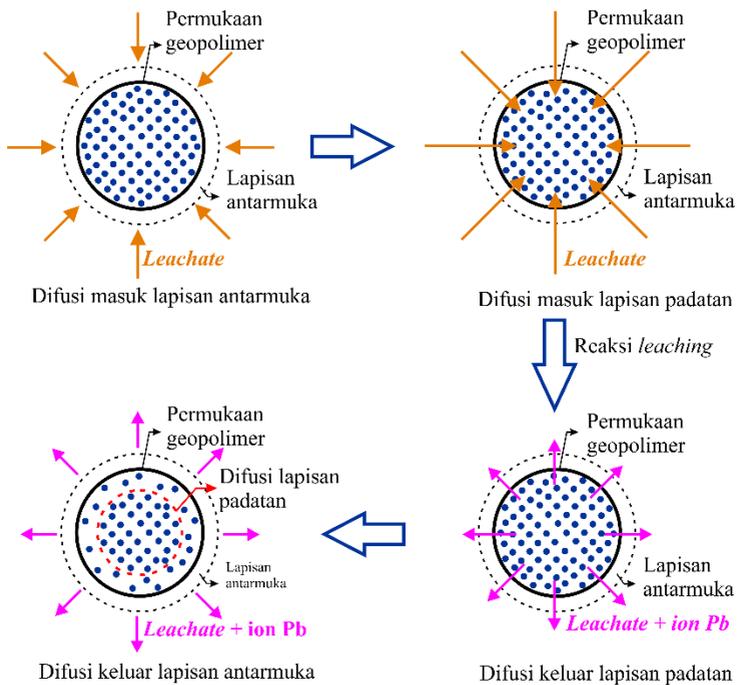
Grafik persamaan linier $\ln(k)$ vs $\ln(C_{Pb})$ yang ditunjukkan pada gambar 4.14 menghasilkan persamaan linier $y = 2,4655x - 25,278$ dengan nilai R^2 sebesar 0,9973. Berdasarkan persamaan tersebut, diketahui bahwa laju proses *leaching* Pb^{2+} dari geopolimer pada penelitian ini memiliki orde reaksi 2,46.

4.9 Mekanisme *Leaching* Pb^{2+}

Untuk mengetahui mekanisme berjalannya *leaching*, perlu diketahui beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses *leaching*. Pada penelitian ini, faktor yang dapat mempengaruhi *leaching* adalah karakteristik fisik geopolimer dan kemampuan larutan pelindi berinteraksi dengan geopolimer. Data yang didapat dari profil *line scan* pada semua sampel geopolimer tersebut dapat dikorelasikan dengan data morfologi, hasil *leaching* setiap sampel geopolimer, dan model kinetika yang telah didapatkan pada subbab sebelumnya. Kinetika SCM dengan kontrol difusi padatan pada penelitian ini memiliki tingkat korelasi yang tinggi. Asumsi dalam permodelan kinetika SCM dengan kontrol difusi padatan pada penelitian ini adalah proses *leaching* Pb^{2+} dari geopolimer terjadi karena adanya difusi larutan pelindi ke dalam geopolimer (Xu dkk., 2018). Lapisan antarmuka yang terbentuk antara geopolimer dengan larutan pelindi tidak memiliki peran yang signifikan terhadap laju keluarnya ion Pb^{2+} maupun difusi larutan pelindi. Hasil plot kinetika SCM dengan reaksi dipermukaan menunjukkan kecocokan yang rendah.

Larutan pelindi akan berdifusi dari permukaan menuju ke dalam lapisan padatan melewati retakan dan pori-pori yang terbentuk pada geopolimer, dan kembali berdifusi keluar bersama ion Pb^{2+} yang ter-*leaching* dalam bentuk molekul Pb . Semakin banyak retakan dan pori pada permukaan geopolimer, semakin mudah larutan pelindi untuk berdifusi kedalam padatan geopolimer. Larutan pelindi yang berdifusi tersebut akan

berinteraksi dengan Pb^{2+} dalam jaringan, sehingga Pb^{2+} dapat terlepas dari jaringan. Semakin banyak interaksi antara larutan pelindi dengan ion Pb^{2+} dalam jaringan, maka memungkinkan peningkatan konsentrasi Pb^{2+} yang dapat ter-*leaching*. Namun tidak semua Pb^{2+} yang berinteraksi dengan larutan pelindi dapat terlepas dari jaringan geopolimer. Larutan pelindi akan terus berdifusi kedalam jaringan geopolimer bersamaan melakukan pembilasan Pb^{2+} . Ion Pb^{2+} yang terbilas tidak dapat langsung keluar dari geopolimer, melainkan harus berdifusi kembali bersama dengan larutan pelindi melalui lapisan padatan geopolimer menuju lingkungan luar. Diperkirakan Pb^{2+} yang terikat secara lemah pada jaringan geopolimer yang terbilas keluar, sedangkan yang terikat kuat pada jaringan masih tetap tertinggal dalam geopolimer.



Gambar 4. 15 Ilustrasi mekanisme *leaching* Pb^{2+} pada geopolimer

Leaching Pb^{2+} dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain fluida larutan pelindih, ukuran pori geopolimer, bentuk amobilisasi Pb^{2+} dalam jaringan geopolimer, dan kemampuan larutan pelindih menembus lapisan padatan. Pb^{2+} yang ter-*leaching* selalu dalam bentuk molekulnya. Bentuk molekul Pb^{2+} yang ter-*leaching* bergantung pada bentuk amobilisasi Pb^{2+} dalam geopolimer (El-Eswed dkk., 2017; Nguyen dan Skavara, 2016) dan jenis atau sifat larutan pelindi. Pembentukan molekul Pb yang keluar bisa terjadi secara reaksi pertukaran kation (*cation exchange*) antara ion Pb^{2+} dengan kation dari larutan pelindi (Ohashi dkk., 1979) dan pendesakan molekul Pb oleh larutan pelindi dengan konsentrasi dan fluiditas yang tinggi (Deugherty dkk., 1984).

BAB V

KESIMPULAN

Geopolimer berbasis abu layang PT. IPMOMI dapat digunakan untuk mengambobilisasi Pb^{2+} . Geopolimer dengan penambahan konsentrasi Pb^{2+} tertentu mampu meningkatkan kuat tekan geopolimer. Penambahan ion Pb^{2+} 4000 ppm mampu memberikan kuat tekan tertinggi sebesar 35,56 MPa, sedangkan penurunan kuat tekan setelah penamabahan Pb^{2+} melebihi 4000 ppm. Geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} 4000 ppm menghasilkan mikro struktur yang lebih kompak dan partikel yang tidak bereaksi lebih sedikit. Semakin tinggi konsentrasi ion Pb^{2+} yang ditambahkan dalam geopolimer, semakin tinggi konsentrasi ion Pb^{2+} yang dapat ter-*leaching*. Geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} 16000 ppm mampu ter-*leaching* sebesar 9,1869%, lebih tinggi dari sampel geopolimer yang lain. Hasil uji *leaching* menunjukkan bahwa model kinetika yang sesuai dengan sesuai dengan penelitian adalah kinetika SCM dengan kontrol difusi padatan dengan orde reaksi 2,46. Mekanisme keluarnya ion Pb^{2+} dari geopolimer terjadi melalui difusi larutan pelindih melalui rongga dan pori dalam geopolimer. Ion Pb^{2+} yang terenkapsulasi/terikat secara lemah dalam geopolimer akan terlepas dan berdifusi bersamaan dengan larutan pelindih keluar dari geopolimer. Hasil ini didukung dengan profil *line scan* geopolimer setelah *leaching* yang menunjukkan adanya pergerakan Pb^{2+} dari dalam menuju tepi geopolimer.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- American Standard Testing and Material (2015): Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete (ASTM C618-15), *ASTM International*.
- Anisatun, I. (2014): *Amobilisasi Kation Cd²⁺ Pada Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang PT. IPMOMI*, Surabaya: Departemen Kimia ITS.
- Ariffin, M. A. M., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W., Mohd Tahir, M., dan Aziah, N. (2013): Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete, *Construction and Building Materials*, 43, 80–86.
- Arnoult, M., Perronnet, M., Autef, A., dan Rossignol, S. (2018): How to control the geopolymer setting time with the alkaline silicate solution, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 495(February), 59–66.
- Badan Standarisasi Nasional (2011): *Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder (SNI 1974:2011)*, Badan Standarisasi Nasional Indonesia, 1-15.
- Bai, C., dan Colombo, P. (2018): Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: a review, *Ceramics International*.
- Bakharev, T. (2005a): Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing, *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1224–1232.
- Bakharev, T. (2005b): Resistance of geopolymer materials to acid attack, *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658–670.
- Chen, X., Meawad, A., dan Struble, L. J. (2014): Method to Stop Geopolymer Reaction, *Journal of the American Ceramic Society*, 97(10), 3270–3275.
- Cheng, T. W., dan Chiu, J. P. (2003): Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, 16, 205–210.
- Cioffi, R., Maffucci, L., dan Santoro, L. (2003): Optimization of geopolymer synthesis by calcination and polycondensation of a kaolinitic residue, *Resource, Conservation and Recycling*,

40, 27–38.

- Criado, M., Palomo, A., dan Fernandez-Jimenez, A. (2005): Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products, *Fuel*, 84(16), 2048–2054.
- Davidovits, P. J. (2002): 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs ., *Geopolymer 2002 Conference*, 1–16.
- Deugherty, D., Colombo, P., Doty, R., Fuhrmann, M., Sanborn, Y., dan Zhou, H. (1984): *Leaching Mechanisms Program*, 1-27.
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., dan van Deventer, J. S. J. (2007): Geopolymer Technology: The Current State of The Art, *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.
- Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., dan van Deventer, J. S. J. (2007): The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete,’ *Cement and Concrete Research and Concrete Research*, 37, 1590–1597.
- El-Eswed, B. I., Aldagag, O. M., dan Khalili, F. I. (2017): Efficiency and mechanism of stabilization/solidification of Pb(II), Cd(II), Cu(II), Th(IV) and U(VI) in metakaolin based geopolymers, *Applied Clay Science*, 140, 148–156.
- Ebin, B., Gurmen, S. (2010): *Synthesis of Alumina Nanoparticles by Heat Treatment of Thermal Decomposed Aluminium Sulfate Aerosol Droplets*, Karlsruhe Institute of Technology: Jerman
- Fan, F., Liu, Z., Xu, G., Peng, H., dan Cai, C. S. (2018): Mechanical and Thermal Properties of Fly Ash Based Geopolymers, *Construction and Building Materials*, 160, 66–81.
- Fansuri, H., Anisatun, I., Fatmawati, A., Utomo, W. P., Supriadi, W., Bayuaji, R., dan Subaer (2015): Cd²⁺ and Cr³⁺ Cation Immobilization by Using Geopolymer Based on PT. IPMOMI Fly Ash, *Materials Science Forum*, 841, 186–192.
- Fansuri, H., Prasetyoko, D., Zhang, Z., dan Zhang, D. (2010): The effect of sodium silicate and sodium hydroxide on the strength of aggregates made from coal fly ash using the

- geopolymerization method, *Asia Pacific Journal of Chemical Engineering*, 7, 73–79.
- Garrabrants, A. C., Kosson, D. S., van der Sloot, H. A., Sanchez, F., dan Hjelmar, O. (2010): *Background Information for the Leaching Environmental Assessment Framework (LEAF) Test Method*, United States Environmental Protection Agency.
- Guo, B., Liu, B., Yang, J., dan Zhang, S. (2017): The Mechanisms of Heavy Metal Immobilization by Cementitious Material Treatment and Thermal Treatments: A Review, *Journal of Environmental Management*, 193, 410–422.
- Guo, B., Pan, D., Liu, B., Volinsky, A. A., Fincan, M., Du, J., dan Zhang, S. (2017): Immobilization mechanism of Pb in fly ash-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 134, 123–130.
- Hadi, M. N. S., Al-Azzawi, M., dan Yu, T. (2018): Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 175, 41–54.
- Hamidi, R. M., Man, Z., dan Azizli, K. A. (2016): Concentration of NaOH and the Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer, *Procedia Engineering*, 148, 189–193.
- Hardjito, D., dan Rangan, B. V (2005): *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, Perth, Australia: Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.
- Havlik, T. (2008): *Hydrometallurgy: Principles and Applications*, *Hydrometallurgy*, Cambridge, Cambridge International Science Publishing Limited in association with Woodhead Publishing Limited, 61, 1-551.
- Hollas, J. M. (2004): *Modern Spectroscopy*, England, John Wiley & Sons, Ltd, Fourth Edi, 1-483.
- Hower, J. C., Henke, K. R., Dai, S., Ward, C. R., French, D., Liu, S., dan Graham, U. M. (2017): Generation and nature of coal fly ash and bottom ash, T. Robl, A. Oberlink, dan R. Jones (Ed.), *Coal Combustion Products (CCP's): Characteristics, Utilization and Beneficiation*, Inggris, Woodhead Publishing, 21–65.

- Jala, S., dan Goyal, D. (2006): Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production—a review, *Bioresource Technology*, 97, 1136–1147.
- Ken, P. W., Ramli, M., dan Ban, C. C. (2016): An Overview on the Influence of Various Factors on the Properties of Geopolymer Concrete Derived From Industrial Byproducts, *Handbook of Low Carbon Concrete*, 77, 263–334.
- Khalil, M. Y., dan Merz, E. (1994): Immobilization of Intermediate-Level Wastes in Geopolymers, *Journal of Nuclear Materials*, 211, 141–148.
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., dan Bartzas, G. (2013): Effect of sulphate and nitrate anions on heavy metal immobilisation in ferronickel slag geopolymers, *Applied Clay Science*, 73(1), 103–109.
- Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G., dan Sagoe-Crentsil, K. (2007): Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 37, 1583–1589.
- Krisbiantoro (2015): *Amobilisasi Fe^{3+} dan Co^{2+} Menggunakan Geopolimer Dari Abu Layang PT. IPMOMI*, Surabaya: Tugas Akhir Kimia ITS.
- Kumar, S., Singh, S. K., dan Mishra, S. C. (2018): Processing and characterization of fly ash compacts, *Materials Today: Proceedings*, 5, 3396–3402.
- Kutchko, B. G., dan Kim, A. G. (2006): Fly ash characterization by SEM–EDS, *Fuel*, 85, 2537–2544.
- Lancellotti, I., Barbieri, L., dan Leonelli, C. (2015): Use of alkali-activated concrete binders for toxic waste immobilization, *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Italy, Woodhead Publishing Limited, 539–554.
- Lee, B., Kim, G., Kim, R., Cho, B., Lee, S., dan Chon, C.-M. (2017): Strength Development Properties of Geopolymer Paste and Mortar with Respect to Amorphous Si/Al Ratios of Fly Ash, *Construction and Building Materials*, 151, 512–519.
- Lee, W. K. ., dan van Deventer, J. S. . (2002): The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated

- fly ash-based cements, *Cement and Concrete Research*, 32(4), 577–584. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00724-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00724-4)
- Levenspiel, O. (1999): *Chemical reaction engineering, Ind. Eng. Chem. Res.*, John Wiley & Sons, Inc, Third Edit, 38, 1-684.
- Lloyd, R. R., Provis, J. L., dan van Deventer, J. S. J. (2009): Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. 1: remnant fly ash particles, *Journal of Materials Science*, 44(2), 608–619.
- Luo, M. J., Liu, C. L., Xue, J., Li, P., dan Yu, J. G. (2017): Leaching kinetics and mechanism of alunite from alunite tailings in highly concentrated KOH solution, *Hydrometallurgy*, 174(September), 10–20.
- Malviya, R., dan Chaudhary, R. (2006): Factors affecting hazardous waste solidification / stabilization: A review, *Journal of Hazardous Materials*, 137, 267–276.
- Munir, M. (2008): *Pemanfaatan Abu Batubara (Fly Ash) Untuk Hollow Block Yang Bermutu dan Aman bagi Lingkungan*, Semarang: Universitas Diponegoro.
- Sari, N.P., Olivia, M., dan Djauhari, Z. (2017): Kuat tekan dan porositas mortar dengan bahan tambah gula aren, *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan (KN-TSP)*, 267.
- Nguyen, A. D., dan Skavara, F. (2016): The influence of ambient pH on fly ash-based geopolymer, *Cement and Concrete Composites*, 72, 275–283.
- Nicolas, R. V. R. S., Walkley, B., dan van Deventer, J. S. J. (2017): Fly Ash-Based Geopolymer Chemistry and Behavior, T. Robl, A. Oberlink, dan R. Jones (Ed.), *Coal Combustion Products (CCP's)*, United Kingdom, Woodhead Publishing, 184–214.
- Nikolić, V., Komljenović, M., Džunuzović, N., Ivanović, T., dan Miladinović, Z. (2017): Immobilization of hexavalent chromium by fly ash-based geopolymers, *Composites Part B: Engineering*, 112, 213–223.
- Nikolic, V., Komljenovic, M., Dzunuzovic, N., dan Miladinovic, Z. (2018): The Influence of Pb Addition on The Properties of

- Fly Ash-Based Geopolymers, *Journal of Hazardous Materials*, 350, 98–107.
- Nugraha, S. (2017): *Dewan Energi Nasional: OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2016*, Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia.
- Nuruddin, M. F., Kusbiantoro, A., Qazi, S., Darmawan, M. S., dan Husin, N. A. (2011): Development of Geopolymer Concrete with Different Curing Conditions, *The Journal for Technology and Science*, 22(1), 24–28.
- Ohashi, H., Sugawara, T., Kikuchi, K.-I., dan Henmi, T. (1979): Mass Transfer Between Particles and Liquid In Solid-Liquid Two-Phase Upflow In Vertical Tubes, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 12(3), 190–195.
- Palacios, M., dan Palomo, A. (2004): Alkali-activated fly ash matrices for lead immobilisation: a comparison of different leaching tests, *Advances in Cement Research*, 16(4), 137–
- Palomo, A., dan de la Fuente, J. I. L. (2003): Alkali-activated cementitious materials: Alternative matrices for the immobilisation of hazardous wastes Part I. Stabilisation of boron, *Cement and Concrete Research*, 33, 281–288.
- Pereira, C. F., Luna, Y., Querol, X., Antenucci, D., dan Vale, J. (2009): Waste Stabilization/Solidification of an Electric Arc Furnace Dust using Fly Ash-Based Geopolymer, *Fuel*, 88, 1185–1193.
- Provis, J. L. (2009): Immobilisation of Toxic Wastes in Geopolymers, *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, United Kingdom, Woodhead Publishing, 19, 421–440.
- Provis, J. L., dan Bernal, S. A. (2014): Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials, *Annual Review of Materials Research*, 44, 299–327.
- Provis, J. L., dan van Deventer, J. S. J. (2007): Geopolymerization kinetics. 2. Reaction kinetic modelling, *Chemical Engineering Science*, 62, 2318–2329.
- Provis, J. L., dan van Deventer, J. S. J. (2009): *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, Abingdon, Woodhead Publishing.

- Richardson, J. F., Harker, J. H., dan Backhurst, J. R. (2002): *Chemical Engineering Volume 2: Particle Technology and Separation Processes*, United Kingdom, Elsevier Ltd, Fifth Edit, 1-836.
- Rohilla, L., Garg, V., Mallick, S. S., dan Setia, G. (2018): An experimental investigation on the effect of particle size into the flowability of fly ash, *Powder Technology*, 330, 164–173.
- Singh, B., G., I., Gupta, M., dan Bhattacharyya, S. K. (2015): Geopolymer concrete: A review of some recent developments, *Construction and Building Materials*, 85, 78–90.
- Siyal, A. A., Azizli, K. A., Man, Z., Lukman, I., dan Khan, M. I. (2016): Geopolymerization kinetics of fly ash based geopolymers using JMAK model, *Ceramics International*, 42, 15575–15584.
- Subaer, S., dan Riessen, A. Van (2007): Thermo-mechanical and microstructural characterisation of sodium-poly (sialate-siloxo) (Na-PSS) geopolymers, *Jornal Material Science*, 42, 3117–3123.
- Sugiyarto, Kristian H (2001) *L Common Textbook Kimia Anorganik II Dasar-Dasar Kimia Anorganik Logam*. Yogyakarta: Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta.
- Supriadi, W. (2017): *Amobilisasi Kation-Kation Logam Berat Menggunakan Geopolimer dari Abu Layang*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 1-136.
- Supriadi, W., Subaer, Bayuaji, R., Burhan, R. Y. P., dan Fansuri, H. (2016): The Effect of Pb²⁺ and Cd²⁺ Addition to Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Paste, *Materials Science Forum*, 841, 178–185.
- Van Jaarsveld, J. G. S., dan Van Deventer, J. S. J. (1999): Effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers, *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1189–1200.
- Vu, T. H., dan Tran, M. Van (2018): A Review on Immobilisation of Toxic Wastes Using Geopolymer Technique, Ho Chi Minh City, Vietnam, Proceedings of the 4th Congres International

de Geotechnique - Ouvrages - Structure, Lecture Notes in Civil Engineering 8.

- Wang, Y., Han, F., dan Mu, J. (2018): Solidification/Stabilization Mechanism of Pb(II), Cd(II), Mn(II) and Cr(III) in Fly Ash Based Geopolymers, *Construction and Building Materials*, 160, 818–827.
- West, A. R. (2014): *Solid State Chemistry and its Applications*, United Kingdom, Wiley, Second Edi, 1, 453.
- Xia, M., dan Sanjayan, J. (2016): Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications, *Materials and Design*, 110, 382–390.
- Xu, G., dan Shi, X. (2018): Characteristics and applications of Fly Ash as a Sustainable Construction Material: A State-of-the-art Review, *Resources, Conservation and recycling*, 136, 95–109.
- Xu, H., van Deventer, J. S. ., dan Lukey, G. . (2001): Effect of Alkali Metals on the Preferential Geopolymerization of Stilbite/Kaolinite Mixtures, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40, 3749–3756.
- Xu, H., dan Van Deventer, J. S. J. (2000): The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247–266.
- Xu, Y., Jiang, T., Wen, J., Gao, H., Wang, J., dan Xue, X. (2018): Leaching kinetics of mechanically activated boron concentrate in a NaOH solution, *Hydrometallurgy*, 179(March), 60–72.
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Parker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., dan Xi, Y. Q. (2015): A comprehensive review on the applications of coal fly ash, *Earth-Science Review*, 141, 105–121.
- Yip, C. K., Lukey, G. C., dan van Deventer, J. S. J. (2005): The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, *Cement and Concrete Research*, 35, 1688–1697.
- Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bakri, M. M. Al, dan Hussin, K. (2016): Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review, *Progress in Material Science*, 83, 595–

629.

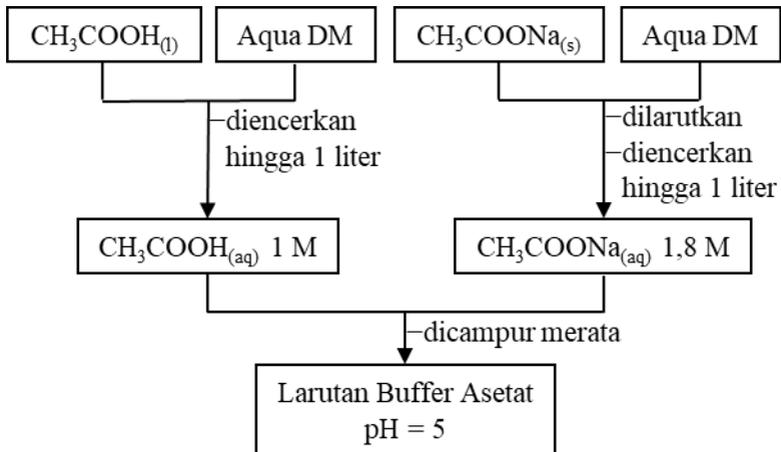
- Zhang, J., Provis, J. L., Feng, D., dan van Deventer, J. S. J. (2008): Geopolymers for Immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺, *Journal of Hazardous Materials*, 587–598, 157.
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., Yu, W. H., dan Wang, H. (2016): Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and application, *Journal of Cleaner Production*, 125, 253–267.

“Halaman Sengaja Dikosongkan”

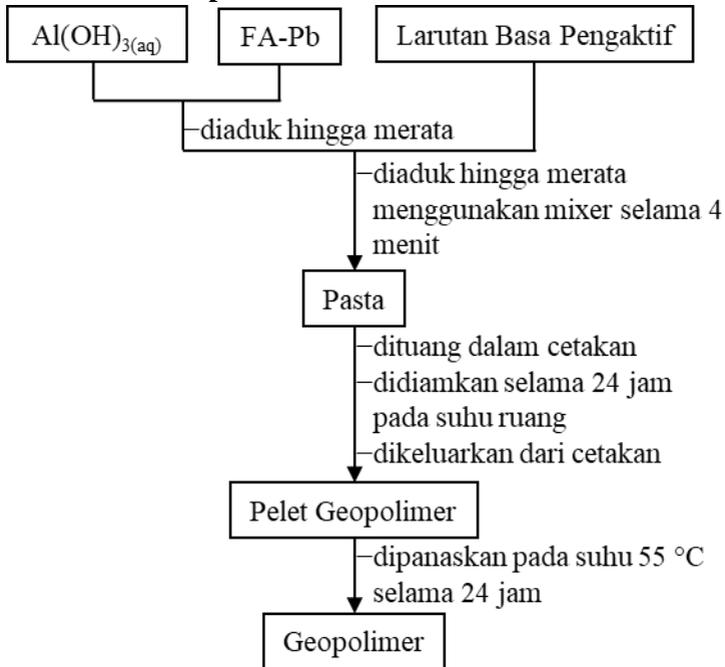
A3. Pembuatan Larutan Basa Pengaktif



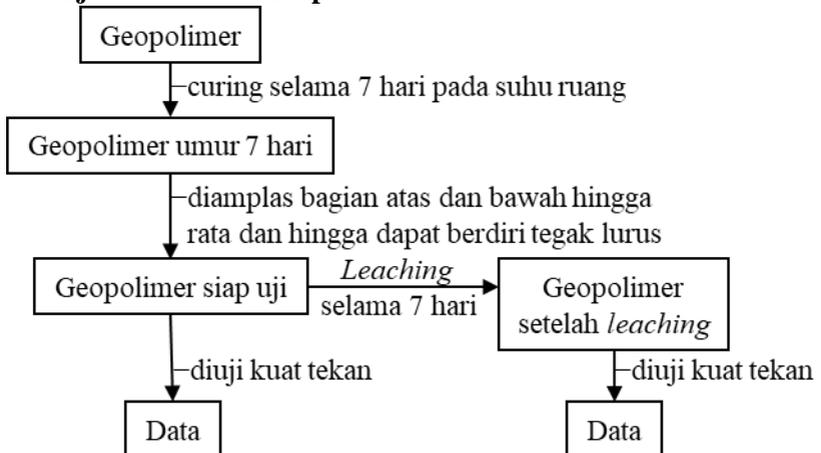
A4. Pembuatan Larutan Buffer Asetat



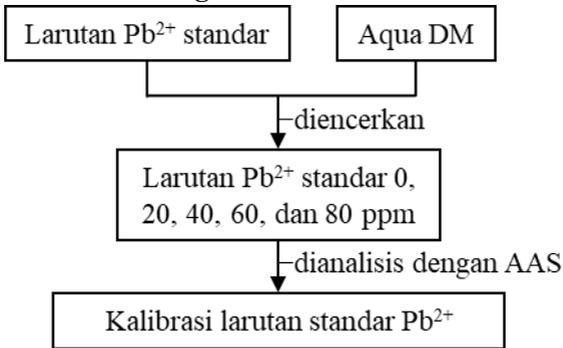
A5. Sintesis Geopolimer



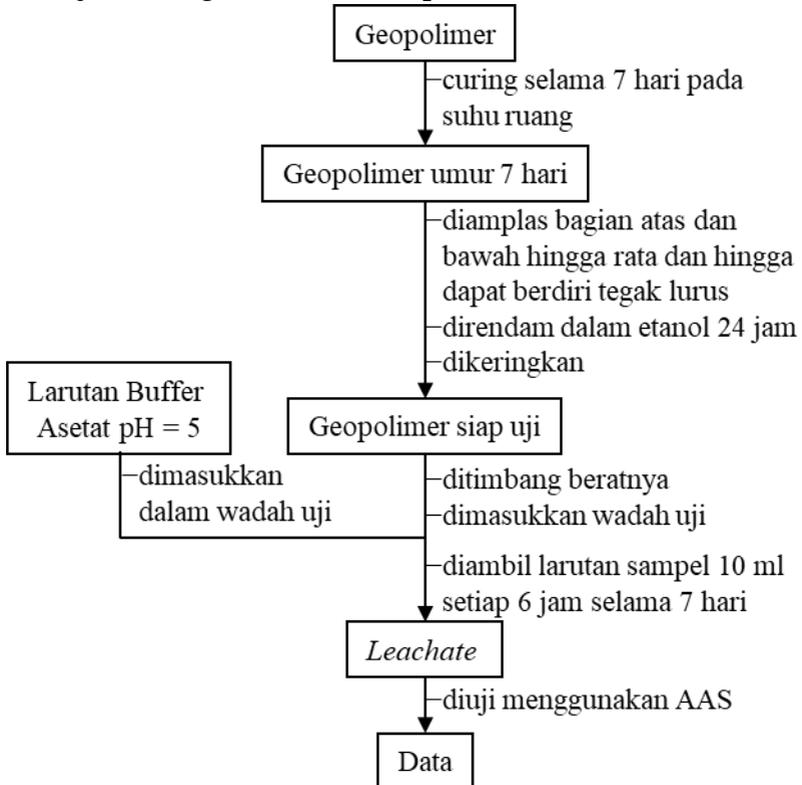
A6. Uji Kuat Tekan Geopolimer



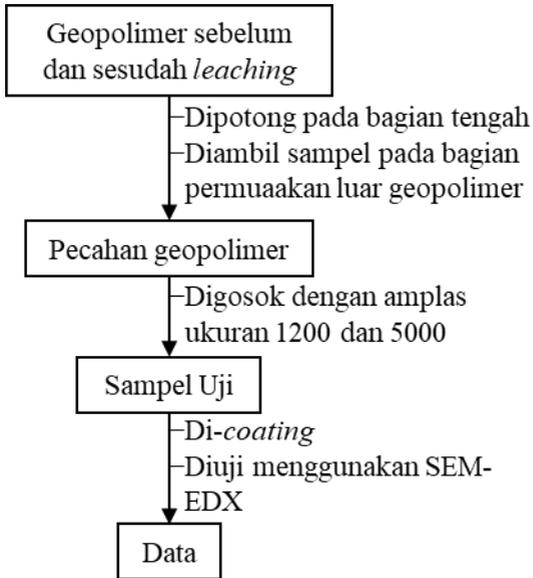
A7. Kalibrasi AAS dengan Larutan Standar Pb^{2+}



A8. Uji *Leaching* Pb^{2+} dalam Geopolimer



A9. Analisis Morfologi dan Persebaran Pb^{2+} dengan SEM-EDX



A10. Rangkaian Uji *Leaching*



Lampiran B: Perhitungan Sintesis Geopolimer

B1. Hasil Analisa Kandungan Abu Layang dan *Water Glass*

Kandungan	Abu layang (%)	<i>Water glass</i> (%)
SiO ₂	50,67	28,69
Al ₂ O ₃	13,76	0
Na ₂ O	0,19	19,35
H ₂ O	0	28,94
Prosentase solid	100	71,06

B2. Kandungan NaOH dan Al(OH)₃

Kandungan	Mr (g/mol)	NaOH (%)	Al(OH) ₃ (%)
Na ⁺	27	56,92	0
Al ³⁺	23	0	34,27
H ₂ O	18	1	1
Prosentase solid		99	99

Kandungan Na⁺ dalam NaOH dianggap sebagai Na₂O

Kandungan Al³⁺ dalam Al(OH)₃ dianggap sebagai Al₂O₃, dengan setiap 2 kali Al³⁺ sama dengan 1 kali Al₂O₃

B3. Perhitungan Rasio S/L

- Yang dimaksud solid (S) adalah semua bahan yang memiliki kandungan berfasa solid (abu layang, *water glass*, NaOH, dan Al(OH)₃)
- Yang dimaksud liquid (L) adalah semua bahan yang memiliki kandungan berfasa *liquid* (aqua DM, *water glass*, NaOH, dan Al(OH)₃)

1 resep komposisi bahan dalam pembuatan geopolimer terdiri dari:

Bahan	Berat (gram)
Abu Layang PT. IPMOMI (FA)	260
<i>Water glass</i> (WG)	80
NaOH	28
Al(OH) ₃	3,4
Aqua DM	61,4

Sehingga untuk menghitung rasio S/L geopolimer sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \text{Rasio S/L} \\ & = \frac{\text{FA} + (\text{WG} \times 71,06\%) + (\text{Al}(\text{OH})_3 \times 99\%) + (\text{NaOH} \times 99\%)}{(\text{WG} \times 71,06\%) + (\text{Al}(\text{OH})_3 \times 99\%) + (\text{NaOH} \times 99\%) + \text{Aqua DM}} \\ & = \frac{260 + (80 \times 71,06\%) + (3,14 \times 99\%) + (28 \times 99\%)}{(80 \times 1\%) + (3,14 \times 1\%) + (28 \times 1\%) + 61,4} \\ & = 4,10 \end{aligned}$$

B4. Perhitungan Rasio Jumlah Mol

Jumlah mol spesimen yang terkandung dalam 1 resep geopolimer:

Bahan	Berat (gram)	SiO ₂ (mol)	Al ₂ O ₃ (mol)	Na ₂ O (mol)	H ₂ O (mol)
FA	260	2,196	0,358	0,008	-
WG	80	0,382	-	0,250	1,286
Al(OH) ₃	3,4	-	0,022	-	0,002
NaOH	28	-	-	0,346	0,016
H ₂ O (61,4	-	-		3,408
Total		2,578	0,380	0,604	4,712

Dari jumlah mol tersebut, maka dapat diketahui rasio:

$$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,80$$

$$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,23$$

$$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,59$$

$$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 7,80$$

B5. Perhitungan Penambahan ion Pb²⁺ dalam Geopolimer

Konsentrasi Pb²⁺ yang ditambahkan berupa x ppm relatif terhadap berat abu layang

Berat Abu Layang PT. IPMOMI: 260 gram = 0,26 kg

$$1 \text{ ppm Pb} = \frac{1 \text{ mg Pb}}{1.000.000 \text{ mg Abu layang}} = \frac{\text{mg Pb}}{\text{kg Abu layang}}$$

$$\text{mg Pb} = \text{ppm Pb} \times \text{kg abu layang}$$

konsentrasi Pb^{2+} (ppm)	Massa Pb^{2+} (mg)	Massa $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (gram)
1000	260	0,416
4000	1040	1,664
8000	2080	3,328
16000	4160	6,656

Lampiran C: Perhitungan Pembuatan Larutan Buffer Asetat

Larutan buffer asetat dibuat dengan pencampuran larutan asam asetat dan larutan natrium asetat.

C1. Pembuatan Buffer Asetat pH=5

Untuk membuat larutan buffer asetat dengan nilai pH =5, maka perlu diketahui perbandingan mol asam asetat dan natrium asetat yang dibutuhkan

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log \frac{\text{garam/ basa konjugat}}{\text{asam lemah}}$$

$$\text{pH} = \text{pK}_a + \log \frac{[\text{CH}_3\text{COONa}]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

$$5 = 4,74427 + \log \frac{[\text{CH}_3\text{COONa}]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

$$0,255273 = \log \frac{[\text{CH}_3\text{COONa}]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

$$1,8 = \frac{[\text{CH}_3\text{COONa}]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]}$$

Berdasarkan perhitungan, untuk membuat larutan buffer asetat dengan pH 5, perbandingan molaritas $\text{CH}_3\text{COOH}:\text{CH}_3\text{COONa}$ yang dibutuhkan adalah 1:1,8

C2. Pembuatan 1 liter CH_3COOH 1 M

$$\text{mol} = M \times \text{Volume larutan}$$

$$\text{mol} = 1 \text{ mol/l} \times 1 \text{ liter} = 1 \text{ mol}$$

Dengan Mr $\text{CH}_3\text{COOH} = 60 \text{ g/mol}$ dan $\rho = 1,05 \text{ g/ml}$, maka

$$\text{mol} = \frac{\text{gram}}{\text{Mr}} = \frac{\rho \times V_{\text{as. asetat}}}{\text{Mr}}$$

$$V_{\text{asam asetat}} = \frac{\text{mol} \times \text{Mr}}{\rho}$$

$$V_{\text{asam asetat}} = \frac{1 \text{ mol} \times 60 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1,05 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}$$

$$V_{\text{asam asetat}} = 57,2 \text{ ml}$$

C3. Pembuatan 1 liter CH_3COONa 1,8 M

$$\text{mol} = M \times \text{Volume larutan}$$

$$\text{mol} = 1,8 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \times 1 \text{ liter} = 1,8 \text{ mol}$$

Dengan $M_r \text{CH}_3\text{COONa} = 82 \text{ g/mol}$, maka

$$\text{massa}_{\text{natrium asetat}} = \text{mol} \times M_r$$

$$\text{massa}_{\text{natrium asetat}} = 1,8 \text{ mol} \times 82 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{massa}_{\text{natrium asetat}} = 147,6 \text{ gram}$$

Lampiran D: Perhitungan kuat tekan geopolimer

Data yang diperoleh dari pengujian kuat tekan adalah gaya yang dapat ditanggung oleh geopolimer dalam satuan Newton (N). Data tersebut kemudian diolah menjadi data kuat tekan (MPa) dengan rumus:

$$f_c' = \frac{P}{A} = \frac{\text{Gaya (N)}}{\pi r^2} = \frac{\text{gaya yang tertera dalam alat uji (N)}}{\text{luas permukaan sentuh benda uji (mm}^2\text{)}}$$

dimana jari-jari geopolimer (r) adalah 10 mm dan $\pi = 3,14$

D1. Kuat tekan geopolimer sebelum *leaching*

No	Sampel	Kuat Tekan (MPa)
2	Pb-1000	22,29
3	Pb-4000	35,56
4	Pb-8000	15,39
5	Pb-16000	11,67

D2. Kuat tekan geopolimer setelah *leaching*

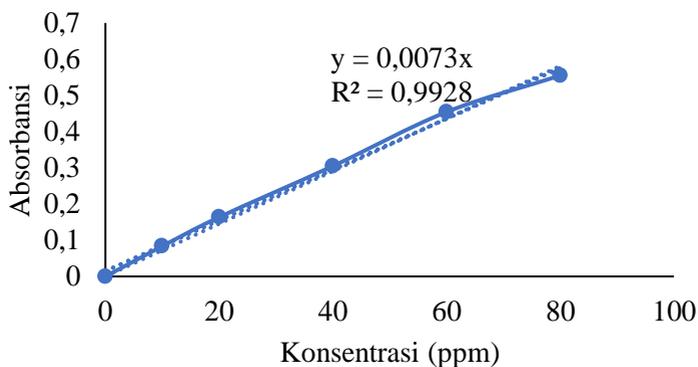
No	Sampel	Kuat Tekan (MPa)
2	Pb-1000-SL	22,29
3	Pb-4000-SL	32,91
4	Pb-8000-SL	16,98
5	Pb-16000-SL	12,74

Lampiran E: Perhitungan Hasil *Leaching* Pb²⁺

E1. Kurvas Kalibrasi AAS dengan Larutan Standar Pb

Konsentrasi (ppm)	Absorbansi
0	0
10	0,084
20	0,164
40	0,305
60	0,454
80	0,555

Kurva Standar AAS



Persamaan yang didapatkan:

$$y = 0,0073x$$

$$[\text{Absorbansi}] = 0,0073[\text{Konsentrasi Pb}^{2+}]$$

E2. Perhitungan kadar Pb²⁺ dalam geopolimer

Massa total = FA + WG + Al(OH)₃ + NaOH + Aqua DM +
x gram Pb(NO₃)₂

$$\text{Kadar Pb}^{2+} \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{mg Pb yang ditambahkan (mg)}}{\text{massa total geopolimer (gram)}}$$

Sampel	Massa		Kadar Pb (mg/g)
	Geopolimer (g)	Pb (mg)	
Pb-1000	433,166	260	0,601
Pb-4000	434,414	1040	2,394
Pb-8000	436,078	2080	4,769
Pb-16000	439,406	4160	9,467

Sampel geopolimer yang digunakan pada uji *leaching* pada setiap variasi sampel sebanyak 4 spesimen

massa Pb dalam spesimen uji

$$= \text{berat geopolimer yang digunakan (g)} \times \text{kadar Pb}^{2+} \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right)$$

Sampel	Berat geopolimer (g)	Berat Pb (mg)
Pb-1000	113,3	68,006
Pb-4000	107,4	257,119
Pb-8000	116,6	556,157
Pb-16000	111,1	1051,820

E3. Perhitungan konsentrasi Pb²⁺ yang ter-*leaching* dalam 2 liter buffer asetat

$$\text{Konsentrasi Pb}^{2+} \text{ (ppm)} = \frac{[\text{Absorbansi Pb}^{2+}]}{0,0073}$$

$$\text{massa Pb}^{2+} \text{ ter-}leaching \text{ (mg)} = \frac{\text{konsentrasi Pb}^{2+} \text{ (ppm)}}{\text{volume buffer (l)}}$$

$$\% \text{Pb}^{2+} \text{ ter-}leaching = \frac{\text{massa Pb}^{2+} \text{ terleaching (mg)}}{\text{massa Pb}^{2+} \text{ dalam spesimen uji (mg)}} \times 100$$

Hasil Perhitungan Pb^{2+} yang ter-leaching

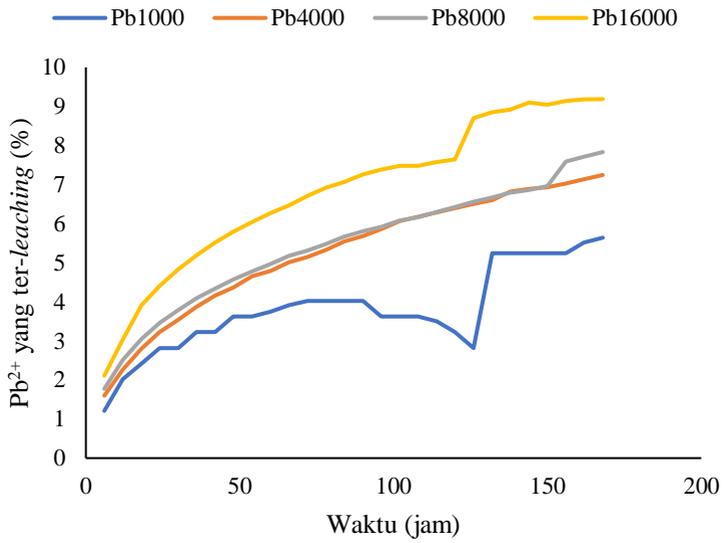
Pb 1000 ppm				
Jam ke-	Absorbansi	ppm	mg	%
6	0,003	0,411	0,822	1,209
12	0,005	0,685	1,370	2,014
18	0,006	0,822	1,644	2,417
24	0,007	0,959	1,918	2,820
30	0,007	0,959	1,918	2,820
36	0,008	1,096	2,192	3,223
42	0,008	1,096	2,192	3,223
48	0,009	1,233	2,466	3,626
54	0,009	1,233	2,466	3,626
60	0,009	1,274	2,548	3,747
66	0,009	1,329	2,658	3,908
72	0,010	1,370	2,740	4,029
78	0,010	1,370	2,740	4,029
84	0,010	1,370	2,740	4,029
90	0,010	1,370	2,740	4,029
96	0,009	1,233	2,466	3,626
102	0,009	1,233	2,466	3,626
108	0,009	1,233	2,466	3,626
114	0,009	1,192	2,384	3,505
120	0,008	1,096	2,192	3,223
126	0,007	0,959	1,918	2,820
132	0,013	1,781	3,562	5,237
138	0,013	1,781	3,562	5,237
144	0,013	1,781	3,562	5,237
150	0,013	1,781	3,562	5,237
156	0,013	1,781	3,562	5,237
162	0,014	1,877	3,753	5,519
168	0,014	1,918	3,836	5,640

Pb ²⁺ 4000 ppm				
Jam ke-	Absorbansi	ppm	mg	%
6	0,015	2,055	4,110	1,598
12	0,021	2,918	5,836	2,270
18	0,026	3,603	7,205	2,802
24	0,030	4,151	8,301	3,229
30	0,033	4,562	9,123	3,548
36	0,036	4,973	9,945	3,868
42	0,039	5,342	10,685	4,156
48	0,041	5,616	11,233	4,369
54	0,044	5,986	11,973	4,656
60	0,045	6,164	12,329	4,795
66	0,047	6,438	12,877	5,008
72	0,048	6,616	13,233	5,147
78	0,050	6,849	13,699	5,328
84	0,052	7,123	14,247	5,541
90	0,053	7,301	14,603	5,679
96	0,055	7,534	15,068	5,861
102	0,057	7,808	15,616	6,074
108	0,058	7,945	15,890	6,180
114	0,059	8,082	16,164	6,287
120	0,060	8,219	16,438	6,393
126	0,061	8,356	16,712	6,500
132	0,062	8,493	16,986	6,606
138	0,064	8,767	17,534	6,820
144	0,065	8,863	17,726	6,894
150	0,065	8,904	17,808	6,926
156	0,066	9,041	18,082	7,033
162	0,067	9,178	18,356	7,139
168	0,068	9,315	18,630	7,246

Pb ²⁺ 8000 ppm				
Jam ke-	Absorbansi	ppm	mg	%
6	0,036	4,932	9,863	1,773
12	0,051	6,986	13,973	2,512
18	0,062	8,493	16,986	3,054
24	0,070	9,630	19,260	3,463
30	0,077	10,548	21,096	3,793
36	0,083	11,370	22,740	4,089
42	0,088	12,055	24,110	4,335
48	0,093	12,699	25,397	4,567
54	0,097	13,288	26,575	4,778
60	0,101	13,836	27,671	4,975
66	0,105	14,384	28,767	5,172
72	0,108	14,753	29,507	5,305
78	0,111	15,247	30,493	5,483
84	0,115	15,753	31,507	5,665
90	0,118	16,164	32,329	5,813
96	0,120	16,438	32,877	5,911
102	0,123	16,890	33,781	6,074
108	0,125	17,123	34,247	6,158
114	0,128	17,534	35,068	6,305
120	0,130	17,849	35,699	6,419
126	0,133	18,260	36,521	6,567
132	0,135	18,534	37,068	6,665
138	0,138	18,904	37,808	6,798
144	0,139	19,082	38,164	6,862
150	0,141	19,356	38,712	6,961
156	0,154	21,096	42,192	7,586
162	0,157	21,466	42,932	7,719
168	0,159	21,781	43,562	7,833

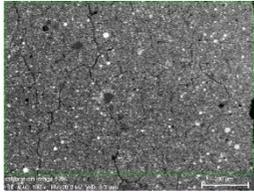
Pb ²⁺ 16000 ppm				
Jam ke-	Absorbansi	ppm	mg	%
6	0,081	11,096	22,192	2,110
12	0,116	15,932	31,863	3,029
18	0,150	20,548	41,096	3,907
24	0,169	23,192	46,384	4,410
30	0,186	25,438	50,877	4,837
36	0,199	27,301	54,603	5,191
42	0,212	29,000	58,000	5,514
48	0,222	30,452	60,904	5,790
54	0,232	31,781	63,562	6,043
60	0,241	33,014	66,027	6,277
66	0,248	34,014	68,027	6,468
72	0,258	35,301	70,603	6,712
78	0,266	36,397	72,795	6,921
84	0,271	37,164	74,329	7,067
90	0,279	38,178	76,356	7,259
96	0,283	38,808	77,616	7,379
102	0,287	39,315	78,630	7,476
108	0,287	39,356	78,712	7,483
114	0,291	39,863	79,726	7,580
120	0,294	40,233	80,466	7,650
126	0,334	45,753	91,507	8,700
132	0,340	46,534	93,068	8,848
138	0,343	46,945	93,890	8,926
144	0,349	47,849	95,699	9,098
150	0,347	47,534	95,068	9,038
156	0,351	48,041	96,082	9,135
162	0,352	48,260	96,521	9,177
168	0,353	48,315	96,630	9,187

Hasil *Leaching* Pb²⁺

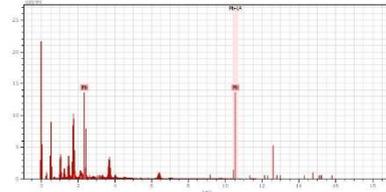


Lampiran F: Morfologi dan Persebaran Pb^{2+} F1. Geopolimer Pb^{2+} 1000 ppm

Pb 1000 ppm
Sebelum Leaching

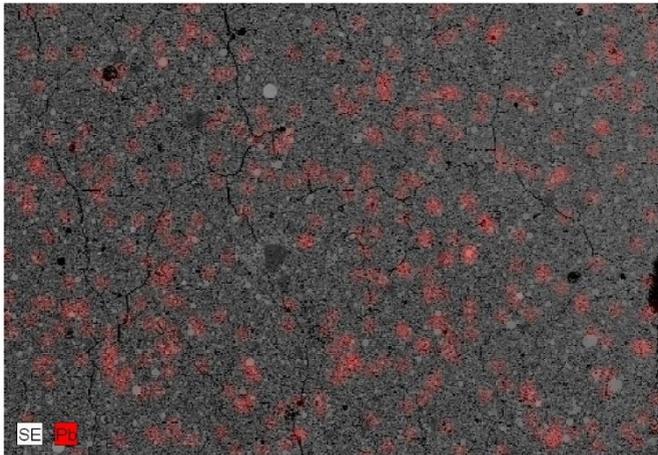


calibration image 5396 Date: 6/29/2018 4:32:39
PM Image size: 512 x 384 Mag: 100x HV: 20.0kV



Map Date: 6/29/2018 4:34:25 PM HV: 20.0kV
Puls th.: 4.94kcps

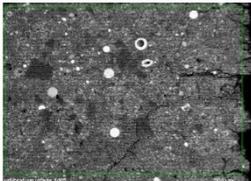
calibration image 21 4268 Date: 6/29/2018 4:34:25 PM Image size: 507 x 348 Mag: 100x HV: 20.0kV



6/29/2018

2. Page

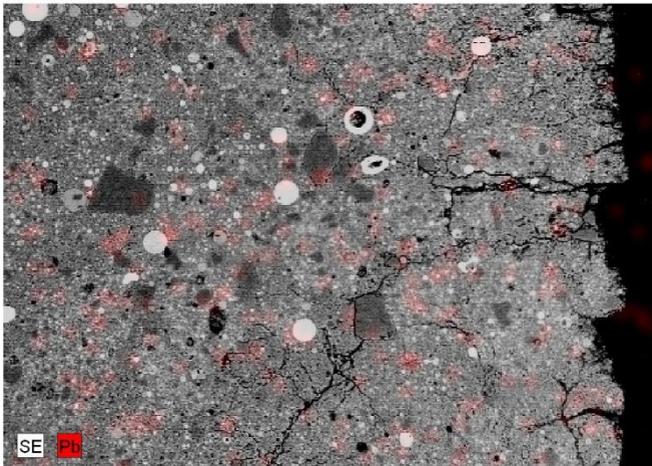
Pb 1000 ppm Setelah Leaching



calibration image 5403 Date:7/5/2018 4:46:30
PMImage size:512 x 384 Mag:100x HV:20.0kV

Map Date:7/5/2018 4:49:40 PM HV:20.0kV
Puls. th.:3.78kcpes

calibration image 21 4275 Date:7/5/2018 4:49:40 PM Image size:481 x
340 Mag:95.92641x HV:20.0kV

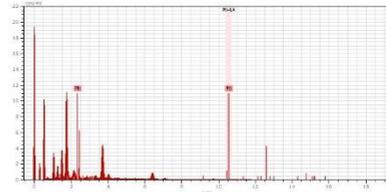
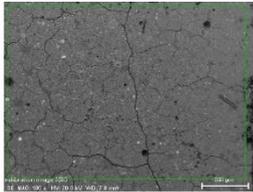


7/5/2018

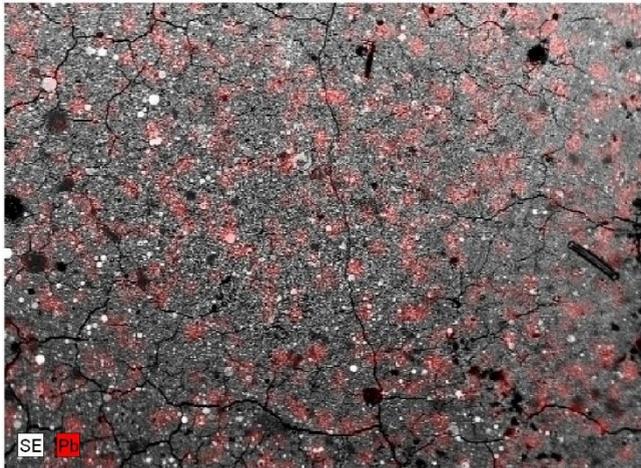
2. Page

F2. Geopolymer Pb²⁺ 4000 ppm

Pb 4000 ppm
Sebelum Leaching



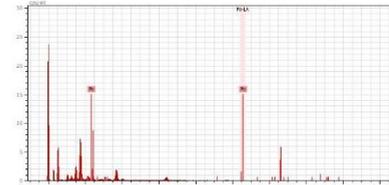
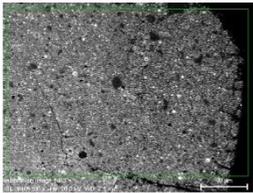
calibration image 21 4254 Date: 6/28/2018 4:58:47 PM Image size: 484 x 350 Mag: 100x HV: 20.0kV



6/28/2018

6. Page

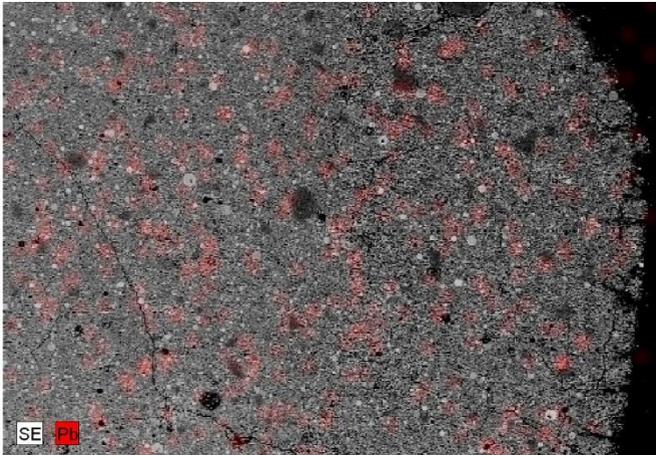
Pb 4000 ppm Setelah Leaching



calibration image 5413 Date: 7/9/2018 5:16:39
PM Image size: 512 x 384 Mag: 100x HV: 20.0kV

Map Date: 7/9/2018 5:18:40 PM HV: 20.0kV
Puls. th.: 3.39kcpse

calibration image 21 4283 Date: 7/9/2019 5:18:40 PM Image size: 491 x 336 Mag: 100x HV: 20.0kV

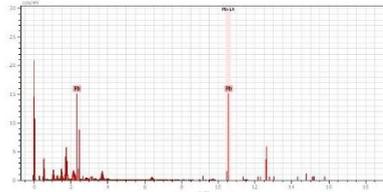
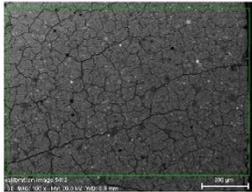


7/9/2018

14. Page

F3. Geopolimer Pb²⁺ 8000 ppm

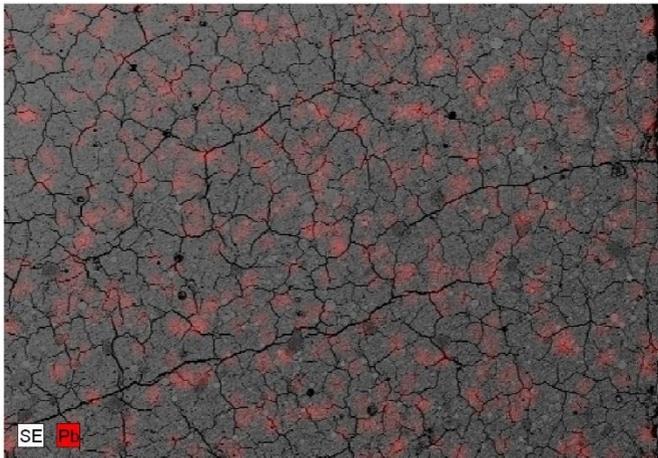
Pb 8000 ppm
Sebelum Leaching



calibration image 5412 Date: 7/9/2018 5:00:05
PM Image size: 512 x 384 Mag: 100x HV: 20.0kV

Map Date: 7/9/2018 5:02:07 PM HV: 20.0kV
Pulse th.: 3.35kcp/s

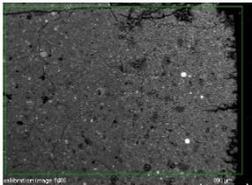
calibration image 21 4282 Date: 7/9/2018 5:02:07 PM Image size: 491 x 338 Mag: 100x HV: 20.0kV



7/9/2018

10. Page

Pb 8000 ppm Setelah Leaching

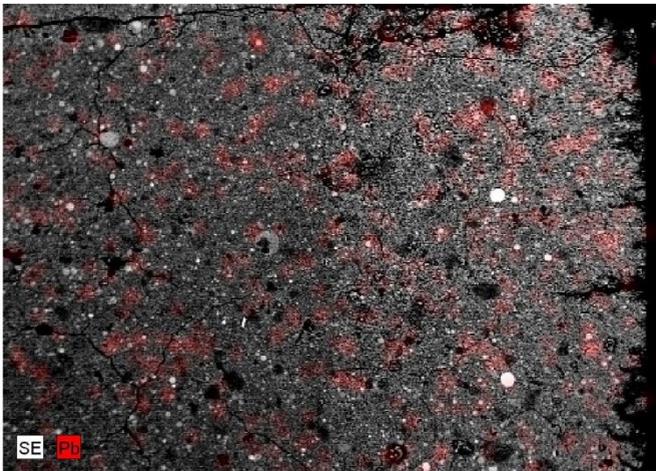


calibration image 5406 Date: 7/5/2018 5:02:50
PMImage size: 512 x 384 Mag: 100x HV: 20.0kV



Map Date: 7/5/2018 5:05:00 PM HV: 20.0kV
Puls. th.: 2.95keVps

calibration image 21 4276 Date: 7/5/2019 5:05:00 PM Image size: 481 x 340 Mag: 100x HV: 20.0kV

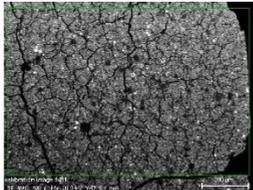


7/5/2018

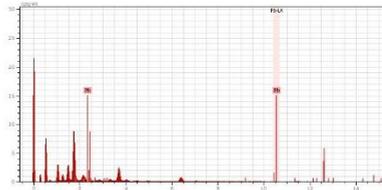
6. Page

F4. Geopolimer Pb²⁺ 16000 ppm

Pb 16000 ppm
Sebelum Leaching

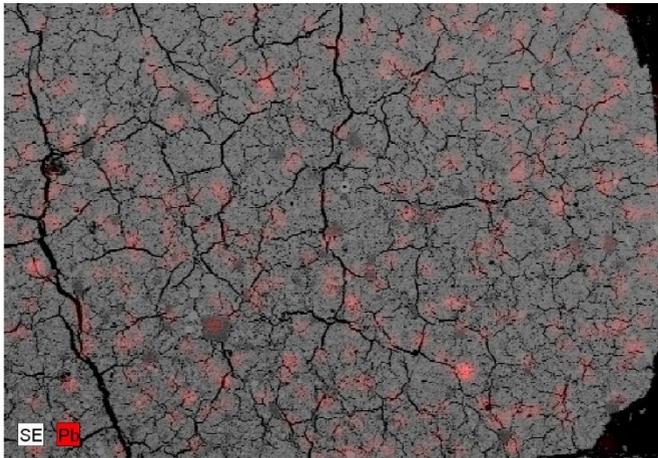


calibration image 5411 Date:7/9/2018 4:49:02
PMImage size:512 x 384 Mag:100x HV:20.0kV



Map Date:7/9/2018 4:51:19 PM HV:20.0kV
Puls. th.:4.20keps

calibration image 21 4261 Date:7/9/2018 4:51:19 PM Image size:491 x 338 Mag:100x HV:20.0kV

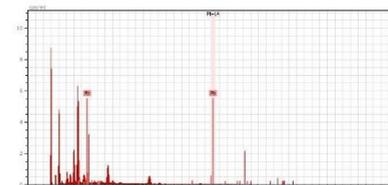
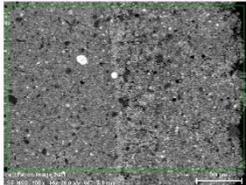


SE Pb

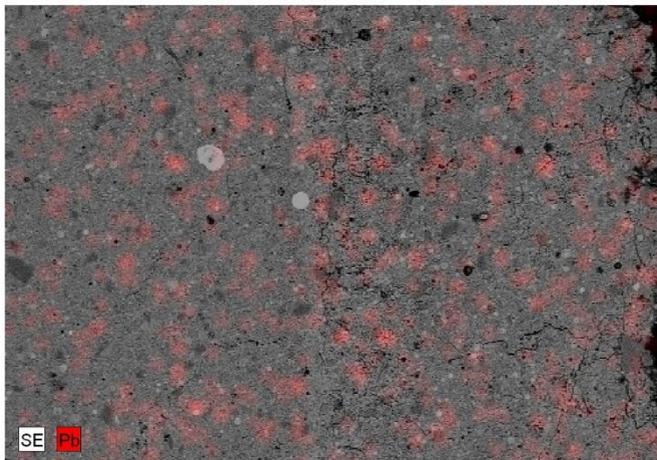
7/9/2018

6. Page

Pb 16000 ppm Setelah Leaching



calibration image
5401Date:7/4/2018 4:48:47 PMImage size:512 x 384Mag:100xHV:20.0kV
Map Date:7/4/2018 4:52:33 PM HV:20.0kV
Puls th.:2.38keps
calibration image 21 4274Date:7/4/2018 4:52:33 PMImage size:494 x 342Mag:100xHV:20.0kV



7/4/2018

2. Page

Lampiran G: Penentuan Model Kinetika *Leaching*

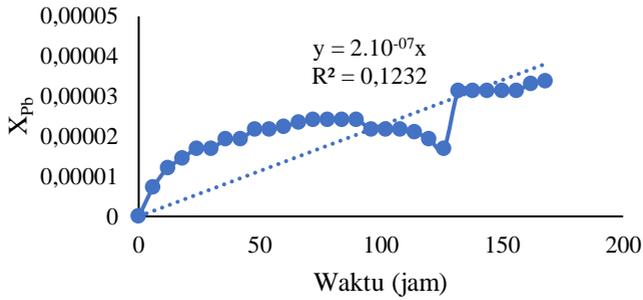
Rumus perhitungan fraksional Pb^{2+} yang ter-*leaching*

$$X_{\text{produk}} = X_{Pb} = \frac{\text{berat Pb ter-}leaching \text{ (mg)}}{\text{berat spesimen uji geopolimer (mg)}}$$

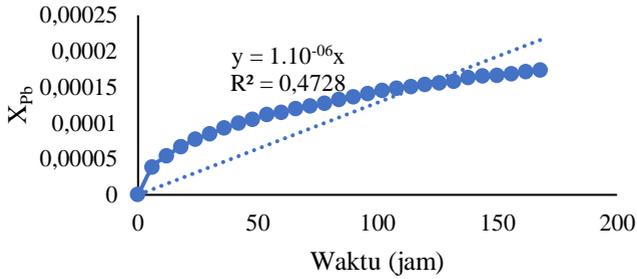
jam	$X_{Pb} (.10^{-5})$			
	1000 ppm	4000 ppm	8000 ppm	16000 ppm
0	0	0	0	0
6	0,725	3,826	8,459	19,975
12	1,209	5,434	11,983	28,680
18	1,451	6,709	14,568	36,990
24	1,693	7,729	16,518	41,749
30	1,693	8,495	18,093	45,794
36	1,934	9,260	19,502	49,147
42	1,934	9,949	20,677	52,205
48	2,176	10,459	21,782	54,819
54	2,176	11,148	22,792	57,211
60	2,249	11,479	23,732	59,431
66	2,346	11,989	24,672	61,231
72	2,418	12,321	25,306	63,549
78	2,418	12,755	26,152	65,522
84	2,418	13,265	27,021	66,903
90	2,418	13,597	27,726	68,727
96	2,176	14,030	28,196	69,862
102	2,176	14,540	28,972	70,774
108	2,176	14,796	29,371	70,848
114	2,104	15,051	30,076	71,761
120	1,934	15,306	30,616	72,426
126	1,693	15,561	31,321	82,364
132	3,144	15,816	31,791	83,770
138	3,144	16,326	32,426	84,510
144	3,144	16,505	32,731	86,137
150	3,144	16,581	33,201	85,570
156	3,144	16,836	36,185	86,483
162	3,313	17,091	36,819	86,877
168	3,385	17,346	37,360	86,976

G1. Kontrol difusi lapisan antarmuka

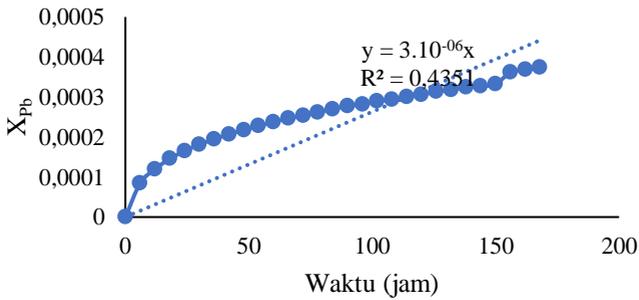
Pb^{2+} 1000 ppm



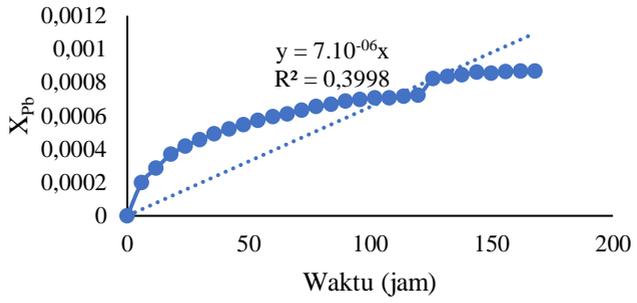
Pb^{2+} 4000 ppm



Pb^{2+} 8000 ppm

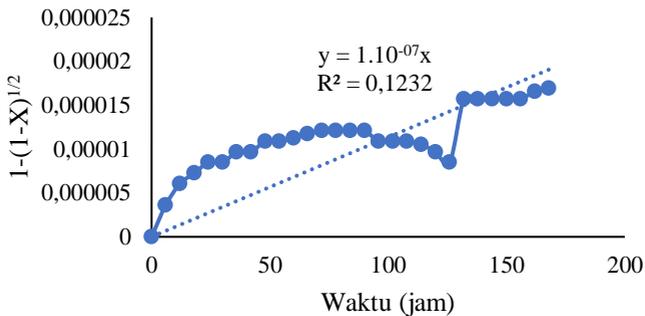


Pb²⁺ 16000 ppm

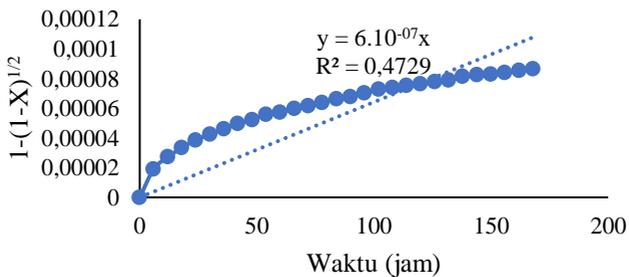


G2. Kontrol Reaksi Kimia Pada Permukaan

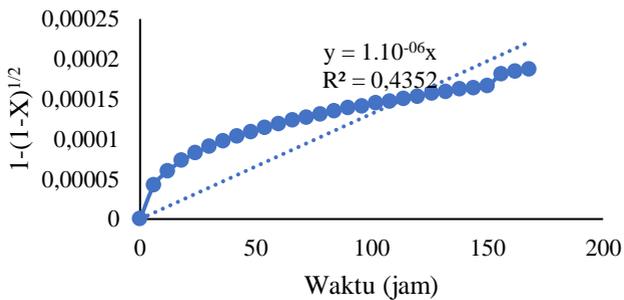
Pb^{2+} 1000 ppm



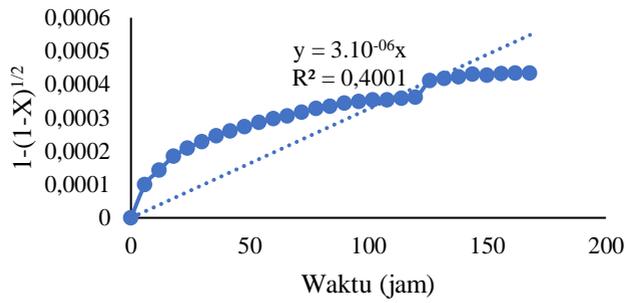
Pb^{2+} 4000 ppm



Pb^{2+} 8000 ppm

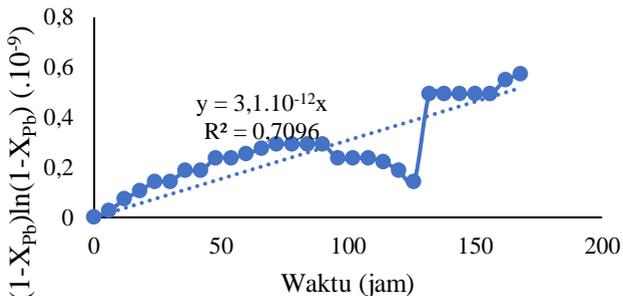


Pb²⁺ 16000 ppm

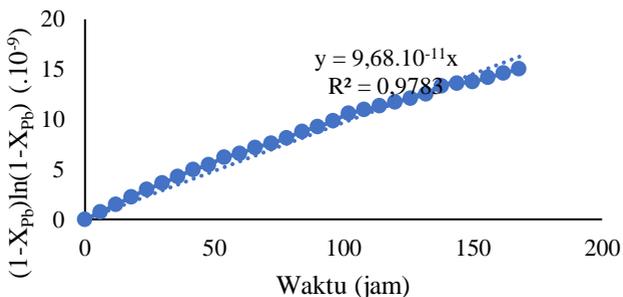


G3. Kontrol Difusi Lapisan Padatan

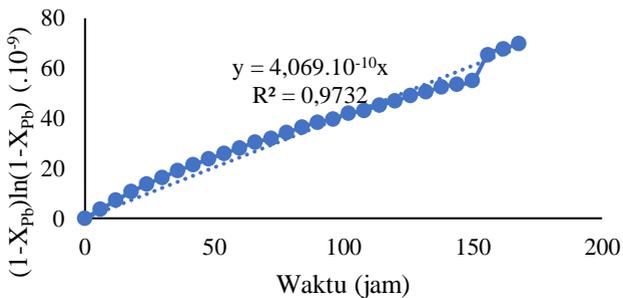
Pb^{2+} 1000 ppm



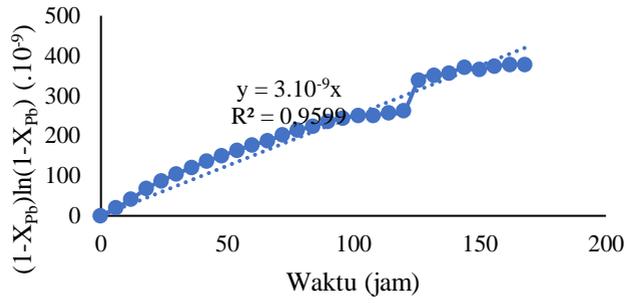
Pb^{2+} 4000 ppm



Pb^{2+} 8000 ppm



Pb²⁺ 16000 ppm



“Halaman Sengaja Dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Priono Nugroho yang dilahirkan di Surabaya pada tanggal 5 Mei 1996. Penulis merupakan anak pertama dari dua besaudara. Penulis pernah menempuh pendidikan di SDN Ploso V Surabaya, SMPN 9 Surabaya, dan SMAN 6 Surabaya. Penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Kimia Fakultas Ilmu Alam (FIA) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) melalui jalur SNPMTN pada tahun 2014 dan terdaftar sebagai mahasiswa Kimia ITS dengan NRP 1414100051. Penulis pernah melakukan kerja praktik di Laboratorium Kimia PT. Petrosida Gresik. Penulis menyelesaikan pendidikannya di Departemen Kimia FMIPA ITS dengan mengambil tugas akhir yang berjudul “Kinetika *Leaching* Ion Logam Berat Pb^{2+} Pada Geopolimer Berbasis Abu Layang PT. IPMOMI”. yang dibimbing oleh Bapak Hamzah Fansuri, M.Si., Ph.D. Penulis dapat diajak berdiskusi mengenai tugas akhir maupun topik lainnya dan dapat dihubungi melalui email priono.nugroho.051@gmail.com