



**IMMOBILISASI ION LOGAM BERAT Cd^{2+} DAN Zn^{2+}
PADA GEOPOLIMER ABU LAYANG**

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

oleh
Cici Eliestia Rahayu
4311413039
UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

2017

PERNYATAAN

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

Semarang, 9 November 2017



Cici Eliestia Rahayu
4311413039



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PERSETUJUAN PEMBIMBING

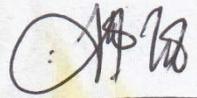
Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke Sidang Panitia Ujian Skripsi Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang.

Pembimbing Utama

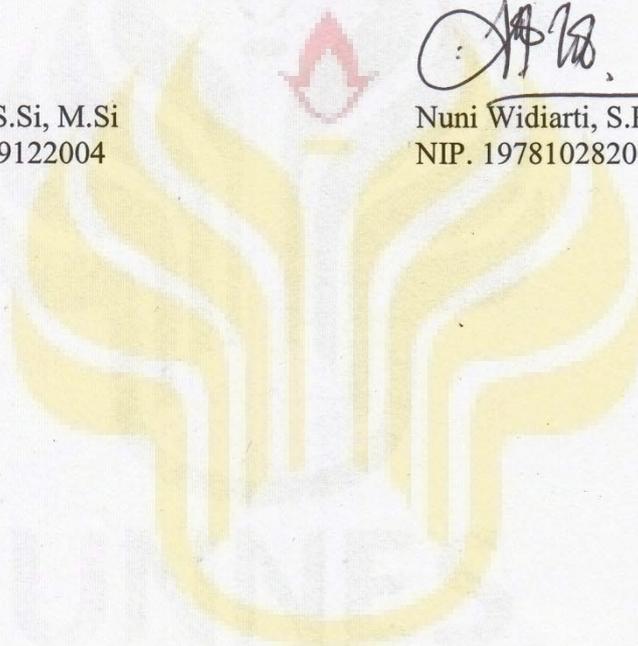


Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si
NIP. 198212142009122004

Semarang, Oktober 2017
Pembimbing Pendamping



Nuni Widiarti, S.Pd, M.Si
NIP. 197810282006042001



UNNES

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PENGESAHAN

Skripsi yang berjudul

Immobilisasi Ion Logam Berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} pada Geopolimer Abu Layang

disusun oleh

Cici Eliestia Rahayu

4311413039

telah dipertahankan di hadapan Sidang Panitia Ujian Skripsi FMIPA UNNES pada tanggal 9 November 2017.



Prof. Dr. Zaenuri, S.E., M.Si., Akt.
NIP. 196412231988031001

Sekretaris

Dr. Nanik Wijayati, M.Si
NIP. 196910231996032002

Ketua Penguji

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

Anggota Penguji/
Pembimbing Utama

Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si
NIP. 198212142009122004

Anggota Penguji/
Pembimbing Pendamping

Nuni Widiarti, S.Pd, M.Si
NIP. 197810282006042001

MOTTO

“Sesungguhnya Allah itu Maha Lembut dan mencintai kelembutan di dalam semua urusan” (H.R Muslim)

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan” (QS. Al Insyirah: 6)



PERSEMBAHAN

Untuk Bapak Dul Rahman, Ibu
Tarsinah, Mas, Mbak, Dosen, Sahabat,
dan Almamater

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah Yang Maha Esa atas nikmat dan karuniaNya, sehingga penulis mampu menyelesaikan Skripsi berjudul: Immobilisasi Ion Logam Berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} pada Geopolimer Abu Layang sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Program Studi Kimia.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Rektor Universitas Negeri Semarang
2. Dekan FMIPA Universitas Negeri Semarang
3. Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang
4. Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si dan Nuni Widiarti, S.Pd, M.Si yang telah memberikan arahan dan dukungannya
5. Dr. F. Widhi Mahatmanti, M.Si yang telah memberikan masukan dan arahnya
6. Kepala Laboratorium Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang
7. Dra. Ida Iryani Kristanti dan Martin Sulistyani, S.Pd yang memberikan dukungan dan masukan
8. Segenap Bapak dan Ibu Dosen di Jurusan Kimia yang telah memberikan dukungan dan ilmunya

Dalam penulisan skripsi ini tentunya masih banyak terdapat kekurangan. Sehingga penulis mengharap adanya kritik yang tentunya akan membuat skripsi ini menjadi lebih baik lagi.

Semarang, 9 November 2017

Penulis

ABSTRAK

Rahayu, C. E. 2017. *Immobilisasi Ion Logam Berat Cd²⁺ dan Zn²⁺ pada Geopolimer Abu Layang*. Skripsi, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si dan Nuni Widiarti, S.Pd, M.Si.

Kata kunci: immobilisasi, Cd²⁺, Zn²⁺, geopolimer, abu layang.

Ion logam berat Cd²⁺ dan Zn²⁺ di perairan merupakan jenis limbah B3. Salah satu upaya mengurangi limbah B3 adalah dengan immobilisasi. Geopolimer berbasis abu layang mempunyai kemampuan untuk mengimmobilisasi ion logam berat. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan ion logam berat Cd²⁺ dan Zn²⁺ terhadap kualitas geopolimer yang dihasilkan. Immobilisasi dalam sintesis geopolimer dilakukan dengan mencampurkan abu layang, NaOH, dan natrium silikat pada rasio *solid/liquid* (S/L) 1,6 serta ditambahkan ion logam berat Cd²⁺ dan Zn²⁺ dengan variasi 0 sampai 1000 ppm. Geopolimer dianalisis kuat tekannya dan diuji *leaching* menggunakan asam nitrat 0,1 M. Analisis kualitatif juga dilakukan pada geopolimer terbaik yaitu analisis fasa mineral dengan XRD, gugus fungsi dengan FTIR, dan morfologi permukaan dengan SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan maksimum diperoleh pada penambahan ion logam berat Cd²⁺ 250 ppm dengan kuat tekan 34,05 MPa dan Zn²⁺ 100 ppm dengan kuat tekan 35,48 MPa. Efektivitas immobilisasi terbaik ada pada penambahan ion logam berat Cd²⁺ 250 ppm dengan efektifitas mencapai 99,90%. Sedangkan untuk ion logam berat Zn²⁺ immobilisasi terbaik pada 100 ppm dengan efektifitas immobilisasi mencapai 99,78%. Hasil analisis fasa mineral menunjukkan bahwa sampel uji penambahan ion logam berat Cd²⁺ 250 ppm dan Zn²⁺ 100 ppm mempunyai fasa amorf lebih besar dibandingkan geopolimer tanpa penambahan ion logam berat serta tidak ditemukan fasa kristalin Cd(OH)₂ dan Zn(OH)₂. Analisis gugus fungsi geopolimer menunjukkan bergesernya pita serapan vibrasi ulur asimetri Si-O-Si atau Si-O-Al pada geopolimer immobilisasi ion logam berat Cd²⁺ dan Zn²⁺ yang menandakan fasa amorfnya lebih banyak yaitu pada 995,70 cm⁻¹, dan 999,53 cm⁻¹. Analisis morfologi menunjukkan bahwa matriks geopolimer dengan immobilisasi ion logam berat Cd²⁺ dan Zn²⁺ lebih padat daripada geopolimer tanpa penambahan ion logam berat karena ion logam berat mengisi pori geopolimer yang terbentuk.

ABSTRACT

Rahayu, C. E. 2017. *Immobilisasi Ion Logam Berat Cd²⁺ dan Zn²⁺ pada Geopolimer Abu Layang*. Skripsi, Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang. Pembimbing Ella Kusumastuti, S.Si, M.Si dan Nuni Widiarti, S.Pd, M.Si.

Keywords: immobilization, Cd²⁺, Zn²⁺, geopolimer, fly ash.

The heavy metal ions Cd²⁺ and Zn²⁺ in the waters are a type of B3 waste. One effort to reduce B3 waste is by immobilization. Geopolymer based on fly ash has the ability to immobilize heavy metal ions. The purpose of this research was to determine the effect of adding heavy metal ions Cd²⁺ and Zn²⁺ to the resulting geopolymer quality. Immobilization in synthesis geopolymer was done by mixing fly ash, NaOH, and sodium silicate in ratio solid/liquid (S/L) 1.6 and added heavy metal ions Cd²⁺ and Zn²⁺ with variation 0 to 1000 ppm. Geopolymer was analyzed by compressive strength and tested leaching using 0.1 M nitric acid. Qualitative analysis was also performed on best geopolymer, mineral phase analysis with XRD, functional group with FTIR, and surface morphology with SEM. The results showed that the maximum compressive strength was obtained on the addition of heavy metal ion Cd²⁺ 250 ppm with a compressive strength of 34.05 MPa and Zn²⁺ 100 ppm with a compressive strength of 35.48 MPa. The best immobilization effectiveness is in the addition of heavy metal ion Cd²⁺ 250 ppm with effectivity reach 99.90%. As for the greatest Zn²⁺ immobilized metal ions at 100 ppm with immobilization effectiveness reached 99.78%. The result of analysis mineral phase showed that the sample of heavy metal ion addition of Cd²⁺ 250 ppm and Zn²⁺ 100 ppm has an amorphous phase larger than geopolymer without adding heavy metal ion and no crystalline phase of Cd(OH)₂ and Zn(OH)₂. Analysis of functional groups geopolymer showed shifts in absorption bands vibration asymmetry Si-O-Si or Si-O-Al on immobilized heavy metal ion geopolymers Cd²⁺ and Zn²⁺ indicating more amorphous phases at 995.70 cm⁻¹ and 999,53 cm⁻¹. Morphological analysis showed that the geopolymer matrix with immobilized heavy metal ions Cd²⁺ and Zn²⁺ is denser than geopolymers without the addition of heavy metal ions because heavy metal ions fill the formed geopolymer pores.

DAFTAR ISI

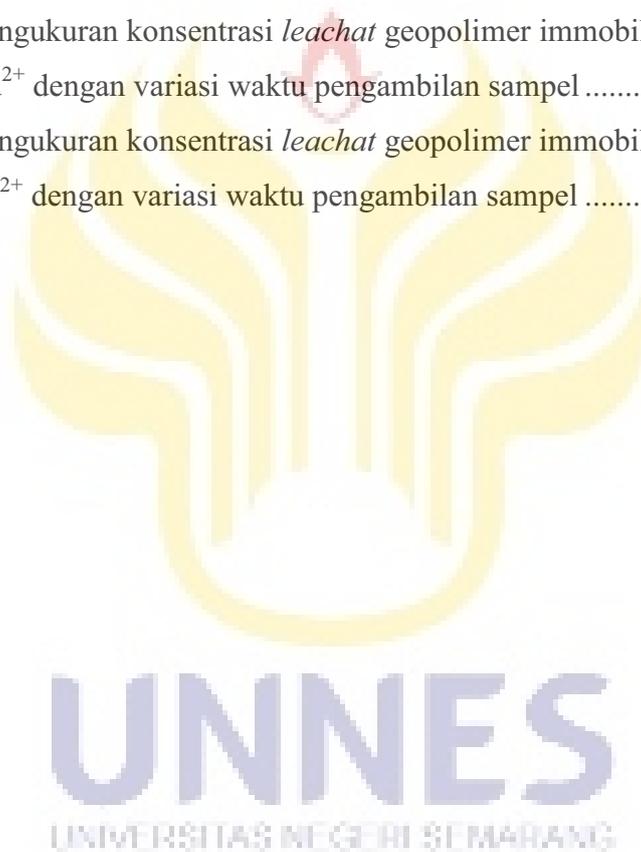
HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN.....	ii
PERSETUJUAN PEMBIMBING.....	iii
PENGESAHAN	iv
MOTTO	v
PRAKATA.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB	
1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
BAB	
2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Abu Layang (<i>Fly Ash</i>).....	7
2.2 Geopolimer.....	9
2.2.1 Pengertian Geopolimer.....	9
2.2.2 Prekursor Geopolimer.....	10
2.2.3 Aktivator dalam Sintesis Geopolimer.....	10
2.2.4 Sintesis Geopolimer.....	11
2.2.5 Sifat-Sifat Geopolimer.....	15
2.3 Logam Berat	16
2.3.1 Pengertian Logam Berat.....	16
2.3.2 Logam Berat Kadmium (Cd).....	17
2.3.3 Logam Berat Seng (Zn).....	18

2.4 Immobilisasi Ion Logam Berat	19
2.5 Uji <i>Leaching</i> dengan Metode <i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i> (TCLP).....	21
2.6 Karakterisasi Geopolimer	22
2.6.1 Analisis Komposisi Kimia dengan XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>)	23
2.6.2 Uji Kuat Tekan dengan <i>Universal Testing Machine</i>	24
2.6.3 Analisis Fasa Mineral dengan XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	26
2.6.4 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR (<i>Fourier Transform Infra Red</i>)	28
2.6.5 Analisis Morfologi dengan SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	30
2.7 Analisis Kadar Ion Logam Berat Cd ²⁺ dan Zn ²⁺ dengan AAS (<i>Atomic Absorption Spectroscopy</i>)	31
BAB	
3. METODOLOGI	
3.1 Lokasi Penelitian	34
3.2 Sampel	34
3.3 Variabel Penelitian.....	35
3.3.1 Variabel Bebas	35
3.3.2 Variabel Terikat.....	35
3.3.3 Variabel Terkendali.....	35
3.4 Alat dan Bahan	36
3.5 Prosedur Kerja	36
3.5.1 Preparasi Abu Layang	36
3.5.2 Pembuatan Larutan Pengaktif	37
3.5.3 Sintesis Geopolimer tanpa Penambahan Ion Logam Berat	37
3.5.4 Immobilisasi Ion Logam Berat Cd ²⁺ dan Zn ²⁺	38
3.6 Karakterisasi Geopolimer	39
3.6.1 Uji Kuat Tekan	39
3.6.2 Analisis Fasa Mineral dengan XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	39
3.6.3 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR (<i>Fourier Transform Infra Red</i>)	40
3.6.4 Analisis Morfologi dengan SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	40

3.7 Uji <i>Leaching</i> dengan Variasi Waktu Pengambilan <i>Leachat</i> dan Ukuran Ayakan Material menggunakan Metode <i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i> (TCLP)	40
BAB	
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Preparasi dan Karakterisasi Abu Layang.....	42
4.2 Sintesis Geopolimer dengan Immobilisasi Ion Logam Berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} ...	44
4.3 Karakterisasi Geopolimer	45
4.3.1 Kuat Tekan	46
4.3.2 Analisis Fasa Mineral dengan XRD (<i>X-Ray Diffraction</i>)	50
4.3.3 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR (<i>Fourier Transfer Infra Red</i>)	54
4.3.4 Analisis Morfologi dengan SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	56
4.4 Uji <i>Leaching</i> dengan Variasi Waktu Pengambilan Sampel <i>Leachat</i> dan Ukuran Ayakan Material menggunakan Metode <i>Toxicity Characteristic Leaching Procedure</i> (TCLP)	58
BAB	
5. PENUTUPAN	
5.1 Simpulan.....	64
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN.....	72

DAFTAR TABEL

2.1. Komposisi kimia abu layang PLTU Karangandri Cilacap dengan XRF	8
2.2. Mutu beton dan penggunaannya	25
2.3. Interpretasi infra merah ($1/\lambda$)	29
3.1. Komposisi ion logam berat Cd^{2+} pada pembuatan geopolimer	38
3.2. Komposisi ion logam berat Zn^{2+} pada pembuatan geopolimer.....	38
4.1. Komposisi kimia abu layang PLTU Karangandri Cilacap dengan XRF	42
4.2. Hasil analisis FTIR geopolimer	56
4.3. Hasil pengukuran konsentrasi <i>leachat</i> geopolimer immobilisasi ion logam berat Cd^{2+} dengan variasi waktu pengambilan sampel	58
4.4. Hasil pengukuran konsentrasi <i>leachat</i> geopolimer immobilisasi ion logam berat Zn^{2+} dengan variasi waktu pengambilan sampel	59



DAFTAR GAMBAR

2.1. Tipe struktur poli(sialat).....	9
2.2. Skema proses pembentukan geopolimer.....	12
2.3. Skema interaksi <i>X-Ray</i> dan elektron pada XRF.....	24
2.4. Hamburan sinar-X pada kristal	27
2.5. Difaktogram (a) abu layang (FA) geopolimer dengan dan tanpa Pb^{2+} , (b) abu layang aktivasi mekanik (MFA) geopolimer dengan dan tanpa Pb^{2+}	28
2.6. Spektra FTIR abu layang PLTU Suralaya	30
2.7. Hasil analisis SEM (a) geopolimer sebelum immobilisasi dan (b) geopolimer dengan immobilisasi Cr^{3+}	31
4.1. Difraktogram abu layang PLTU Karangandri Cilacap ($Q = quartz$, $M = mullite$, dan $Ma = magnetite$).....	43
4.2. Hasil sintesis geopolimer dengan immobilisasi ion logam berat (a) geopolimer, (b) geopolimer/ Cd^{2+} , dan (c) geopolimer/ Zn^{2+}	45
4.3. Diagram kuat tekan geopolimer dengan variasi penambahan ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+}	46
4.4. Interaksi yang mungkin terjadi pada geopolimer immobilisasi ion logam berat Cd^{2+}	48
4.5. Difraktogram XRD (a) abu layang, (b) geopolimer, (c) geopolimer/ Cd^{2+} , dan (d) geopolimer/ Zn^{2+}	50
4.6. Spektrum infra merah (a) geopolimer, (b) geopolimer/ Cd^{2+} , dan (c) geopolimer/ Zn^{2+}	54
4.7. Mikograf SEM geopolimer dengan dan tanpa penambahan ion logam berat, (a) abu layang yang tidak bereaksi, (b) pori, dan (c) <i>microcrack</i>	57
4.8. Hasil pengukuran konsentrasi ion logam berat Cd^{2+} yang <i>terleaching</i> dengan variasi ukuran material	62
4.9. Hasil pengukuran konsentrasi ion logam berat Zn^{2+} yang <i>terleaching</i> dengan variasi ukuran material	62

DAFTAR LAMPIRAN

1. Diagram alir penelitian.....	72
2. Perhitungan	78
3. Hasil analisis XRF abu layang dan perhitungan mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	80
4. Perhitungan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	82
5. Hasil kuat tekan dan perhitungan.....	84
6. Perhitungan mol ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+}	86
7. Hasil analisis XRD	87
8. Hasil analisis FTIR.....	90
9. Hasil analisis AAS	91
10. Dokumentasi penelitian.....	92



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) merupakan sisa suatu kegiatan yang mengandung bahan berbahaya dan beracun yang dapat mencemari atau merusak lingkungan dan membahayakan kelangsungan makhluk hidup (PP No. 101 Tahun 2014). Ion logam berat Zn^{2+} di perairan merupakan salah satu jenis limbah B3 yang banyak terdapat di lingkungan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Susanti *et al.*, (2014), kadar ion logam berat Zn^{2+} dari berbagai sumber cemaran industri mencapai kadar 254,12 ppm. Seng bersifat racun dalam kadar tinggi, namun dalam kadar rendah dibutuhkan oleh organisme sebagai koenzim (Tangiran *et al.*, 2003). Selain logam berat seng yang banyak ditemukan di perairan terdapat logam lain yang juga termasuk limbah B3 yaitu ion logam berat Cd^{2+} . Susanti *et al.*, (2014) juga menyatakan bahwa kadar cemaran ion logam berat Cd^{2+} dari berbagai sumber industri dapat dikatakan tinggi, walaupun kadarnya kurang dari 0,39 ppm. Keracunan logam kadmium dapat menyebabkan sakit ginjal, liver, tulang rapuh, dan kerusakan sel-sel darah (Kamran & Ali, 2013). Berdasarkan PP No. 82 Tahun 2001, logam berat Zn di perairan untuk kelas II tidak boleh melebihi 0,05 mg/L dan logam berat Cd tidak boleh melebihi 0,01 mg/L. Oleh karena itu, limbah tersebut harus ditangani dengan baik agar tidak merusak maupun mencemari lingkungan.

Di sisi lain abu layang batubara merupakan limbah yang sangat melimpah keberadaannya. Abu layang merupakan limbah hasil pembakaran batubara dan mengandung bahan-bahan yang berpotensi mencemari lingkungan. Abu layang

telah digunakan sebagai adsorben dalam mengurangi kontaminan logam berat dalam air (Ahmaruzzaman, 2011). Abu layang juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar pembuatan geopolimer karena memiliki sifat *pozzolan* yang baik (Yadi *et al.*, 2015). Geopolimer berbasis abu layang mempunyai kapasitas lebih tinggi dalam mengurangi ion logam berat dibandingkan dengan abu layang (Kamel *et al.*, 2011).

Geopolimer dibentuk oleh material aluminosilikat yang diaktifkan oleh larutan alkali (Nikolic *et al.*, 2014). Pada perkembangannya, geopolimer telah banyak digunakan di bidang keramik, bahan tahan api, bahan bebas asbes, dan bahan-bahan berteknologi tinggi yang ramah lingkungan (Colangelo *et al.*, 2013). Selain itu, geopolimer juga dapat digunakan dalam proses solidifikasi/stabilisasi (S/S) dari limbah beracun dan radioaktif (Nikolic *et al.*, 2014). Ketahanan terhadap asam dan daya tahan yang ada pada geopolimer menjadikannya sebagai solusi yang ideal untuk *landfill* berbasis metode immobilisasi (Deventer *et al.*, 2007).

Immobilisasi ion logam berat pada abu layang diaktifkan oleh alkali dengan ion logam berat bertindak sebagai ion penyeimbang muatan dan sebagai endapan tidak larut yang dienkapsulasi dalam struktur geopolimer (Ogundiran *et al.*, 2013). Jaarsveld & Deventer (1999), menyatakan bahwa immobilisasi ion logam dalam geopolimer dipengaruhi oleh dua faktor yaitu valensi ion logam berat dan ukurannya. Logam berat yang diimmobilisasi dalam pembuatan geopolimer dapat memberikan efek yang besar terhadap sifat fisika dan kimia geopolimer yang dihasilkan.

Menurut Zheng *et al.*, (2014), kuat tekan geopolimer dipengaruhi oleh konsentrasi kation logam berat. Penambahan logam berat dapat meningkatkan kuat tekan, tetapi pada nilai tertentu akan menurunkan kuat tekan. Hal tersebut menunjukkan bahwa geopolimer memiliki batas toleransi untuk logam berat.

Julharmito *et al.*, (2015), menyatakan bahwa solidifikasi limbah abu layang sebagai campuran beton geopolimer memberikan hasil yang signifikan untuk mengimmobilisasi logam berat yang ada dalam abu layang. Kandungan logam Pb semula 8,954 mg/L berkurang menjadi 2,96 mg/L, logam Cr berkurang dari 6,978 mg/L menjadi 0,238 mg/L, dan logam Cu berkurang dari 12,355 mg/L menjadi 7,350 mg/L setelah dilakukan solidifikasi menjadi beton geopolimer. Namun dalam penelitian ini hanya diketahui konsentrasi sebelum dan sesudah solidifikasi, sehingga pengaruh adanya logam berat terhadap sifat fisik dan kimia geopolimer belum diketahui.

Anggoro & Atmaja (2010) meneliti immobilisasi ion logam berat Pb^{2+} pada geopolimer berbahan baku abu layang Semen Gresik. Geopolimer dibuat dengan variasi mol SiO_2/Al_2O_3 , penambahan $Al(OH)_3$, dan perbandingan *solid/liquid* yang digunakan adalah 1,75. Perilaku immobilisasi logam berat diamati pada geopolimer dengan rasio mol SiO_2/Al_2O_3 4,5 dan 5,0 karena pada rasio ini mempunyai kuat tekan terbaik dan kuat tekan terendah. Namun demikian, hasil immobilisasi ion logam berat Pb^{2+} pada geopolimer dengan variasi tersebut tidak dilakukan pengukuran kuat tekan sesudah dilakukan immobilisasi. Selain itu, pada uji *leaching* 25 jam konsentrasi ion logam berat Pb^{2+} masih tinggi yaitu 1,0797 ppm.

Tampubolon *et al.*, (2015) juga meneliti immobilisasi Cu^{2+} dan Pb^{2+} pada geopolimer berbahan abu layang IPMOMI. Geopolimer abu layang IPMOMI dapat mengimmobilisasi ion Pb^{2+} lebih baik dari pada ion Cu^{2+} namun kuat tekan yang dihasilkan pada geopolimer yang mengimmobilisasi Cu^{2+} lebih besar yaitu mencapai 12,28 MPa. Faktor penentu kemampuan geopolimer untuk mengimmobilisasi logam berat tersebut diantaranya ukuran kation. Ukuran kation Pb^{2+} lebih besar dari Cu^{2+} sehingga dapat terenkapsulasi dengan baik dan laju pelindiannya rendah, selain itu kadar kation logam berat yang ditambahkan juga mempengaruhi kemampuan immobilisasi geopolimer.

Pada penelitian ini dilakukan immobilisasi ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} pada geopolimer berbahan baku limbah abu layang batubara. Geopolimer yang berasal dari limbah abu layang diharapkan mampu mengimmobilisasi ion logam berat dengan baik. Pada penelitian ini penulis juga akan mempelajari pengaruh immobilisasi terhadap kuat tekan geopolimer dan ketahanan ion logam berat dalam geopolimer. Ketahanan ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} dalam geopolimer ditentukan dengan proses *leaching*. Banyaknya konsentrasi logam yang *terleaching* dapat dipengaruhi oleh ukuran material. Menurut Utomo (2008), semakin kecil ukuran material semakin banyak jumlah ion logam berat yang *terleaching*. Semakin sedikit ion logam berat yang *terleaching* berarti geopolimer mengimmobilisasi ion logam berat dengan baik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh konsentrasi ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} terhadap kualitas geopolimer (kuat tekan) serta geopolimer kuat tekan terbaik terhadap fasa mineral, gugus fungsi, dan morfologi?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} terhadap kemampuan immobilisasi geopolimer dilihat dari konsentrasi ion logam yang *terleaching*?
3. Bagaimana pengaruh waktu pengambilan sampel *leachat* terhadap konsentrasi ion logam yang *terleaching*?
4. Bagaimana pengaruh ukuran ayakan material geopolimer yang telah ditambahkan ion logam berat terhadap konsentrasi *leachat*?

1.3 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah tersebut, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh konsentrasi ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} terhadap kualitas geopolimer (kuat tekan) serta geopolimer kuat tekan terbaik terhadap fasa mineral, gugus fungsi, dan morfologi.
2. Mengetahui pengaruh konsentrasi ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} terhadap kemampuan immobilisasi geopolimer dilihat dari konsentrasi ion logam yang *terleaching*.
3. Mengetahui pengaruh waktu pengambilan sampel *leachat* terhadap konsentrasi ion logam yang *terleaching*.

4. Mengetahui pengaruh ukuran ayakan material geopolimer yang telah ditambahkan ion logam berat terhadap konsentrasi *leachat*.

1.4 Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, antara lain:

1. Mengurangi limbah B3 yang mengandung logam berat.
2. Mengurangi dan memanfaatkan limbah abu layang untuk menghasilkan geopolimer yang ramah lingkungan.
3. Meningkatkan nilai ekonomi abu layang batubara dalam pemanfaatannya sebagai media immobilisasi logam berat.
4. Mengembangkan ilmu dan teknologi di lingkup bidang pengolahan limbah terkait pilar konservasi.
5. Hasil penelitian selain diharapkan mampu diaplikasikan juga mampu menjadi referensi untuk penelitian terhadap pengembangan pembuatan geopolimer selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Abu Layang (*Fly Ash*)

Fly ash atau abu layang adalah bagian dari sisa pembakaran batubara pada boiler pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berbentuk material halus dan bersifat *pozzolan*. *Pozzolan* artinya dapat bereaksi dengan kapur pada temperatur kamar (24-27°C) dengan adanya media air membentuk senyawa yang bersifat mengikat (Yadi *et al.*, 2015).

Abu layang mempunyai ukuran yang sangat kecil (0,5-100 μm). Abu layang terdiri dari butiran halus yang umumnya berbentuk bola padat atau berongga. Kerapatan abu layang berkisar antara 2100 sampai 3000 kg/m³ dan luas area spesifiknya (diukur berdasarkan metode permeabilitas udara *Blaine*) antara 170 sampai 1000 m²/kg (Putranto, 2007). Menurut *American Standart Test Methode C618 (ASTM)*, abu layang dibedakan menjadi 2 kelas berdasarkan kandungan kalsium oksidanya (CaO) yaitu abu layang kelas C dan kelas F. Abu layang kelas C mengandung CaO lebih dari 10% dari beratnya. Senyawa lain yang terkandung di dalamnya adalah SiO₂ sebanyak 30-50%. Al₂O₃ sebanyak 17-20%, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, dan sedikit K₂O. Abu layang tipe C biasanya didapat dari pembakaran *lignite* atau *sub-bitumenous* batubara. Sedangkan abu layang kelas F mengandung CaO kurang dari 10% dari beratnya. Senyawa yang terkandung di dalamnya adalah SiO₂ sebanyak 45-60%, Al₂O₃ sebanyak 20-28%, Fe₂O₃, MgO, K₂O, dan sedikit Na₂O. Abu layang kelas F didapat dari pembakaran *anthracite* atau *bitumenous* batubara.

Abu layang sebagai limbah hasil pembakaran batubara merupakan bahan *pozzolan* yang baik sehingga sangat berpotensi untuk dimanfaatkan menjadi bahan dasar geopolimer. Jaarsveld *et al.*, (2003) melaporkan bahwa ukuran material, kandungan kalsium, kandungan logam alkali, kandungan amorf, dan asal abu layang mempengaruhi sifat-sifat geopolimer. Mereka juga membuktikan bahwa kandungan kalsium dalam abu layang memainkan peranan penting terhadap kuat tekan geopolimer. Semakin tinggi kandungan kalsium maka semakin tinggi pula kuat tekan geopolimer yang dihasilkan. Kuat tekan geopolimer yang menggunakan abu layang kelas C ternyata lebih tinggi daripada abu layang kelas F, baik menggunakan *curing* dengan oven maupun pada temperatur kamar. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan abu layang kelas C dari PLTU Karangandri Cilacap. Contoh komposisi abu layang PLTU Karangandri Cilacap dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Komposisi kimia abu layang PLTU Karangandri Cilacap dengan XRF

Senyawa oksida	% Massa	Senyawa oksida	% Massa
SiO ₂	39,439	SO ₃	0,686
Al ₂ O ₃	15,496	Ti	0,952
CaO	13,655	MnO	0,227
Fe ₂ O ₃	26,232	K ₂ O	1,579
Na ₂ O	0,478	Cl	0,091
MgO	0,807	Rb	0,006
Y	0,004	Zr	0,022
Sr	0,051	P ₂ O ₅	0,000

Sumber: Hisan, 2016

Menurut ASTM C618, abu layang kelas C selain mempunyai sifat *pozzolan* juga mempunyai sifat *self-menting* yaitu mempunyai kemampuan untuk mengeras dan menambah kekuatan apabila bereaksi dengan air dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur.

2.2 Geopolimer

2.2.1 Pengertian Geopolimer

Davidovits memperkenalkan suatu jenis material pada tahun 1978 untuk menggambarkan jenis mineral yang memiliki komposisi mirip zeolit namun mempunyai mikrostruktur amorf. Davidovits memberikan nama material temuannya tersebut geopolimer, karena merupakan hasil sintesis bahan-bahan alam anorganik melalui proses polimerisasi (Yadi *et al.*, 2015). Pada geopolimer, terjadi polimer jaringan silikon-oksigen-aluminium dengan mengubah tetrahedral silikon dan aluminium sehingga bergabung bersama secara tiga arah dengan pemakaian bersama seluruh atom O. Polimer silikon-okso-aluminat dapat disebut sialat sehingga geopolimer dapat disebut poli(sialat). Bentuknya amorf sampai semi-kristalin (Davidovits, 1991).

Rumus empiris dari poli(sialat) yaitu $M_n(-(\text{SiO}_2)_z-\text{AlO}_2)_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$. M adalah kation monovalen seperti kalium atau natrium, n merupakan derajat polikondensasi, dan z merupakan suatu bilangan sebagai jumlah atau banyak. Poli(sialat) ini dibagi menjadi tiga tipe yaitu tipe poli(sialat), tipe poli(sialat-silokso), dan tipe poli(sialat-disilokso). Gambar struktur poli(sialat) dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Poly(sialate)

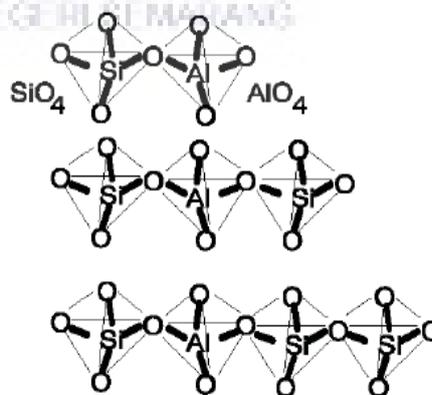
(-Si-O-Al-O-)

Poly(sialate-siloxo)

(-Si-O-Al-O-Si-O-)

Poly(sialate-disiloxo)

(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



Gambar 2.1. Tipe struktur poli(sialat) (Davidovits, 1994).

2.2.2 Prekursor Geopolimer

Geopolimer disintesis dari prekursor yang mengandung alumina dan silika berkonsentrasi tinggi. Prekursor adalah bahan utama dalam membentuk polimer. Prekursor dapat berupa kaolin, lempung, metakaolin, atau limbah industri. Tanah lempung perlu dikalsinasi pada temperatur sekitar 650°C sebagai pengolahan awal untuk sintesis geopolimer. Limbah industri yang banyak mengandung alumina dan silika adalah *blast furnace slag*, abu layang (*fly ash*), serbuk granit, dan lumpur merah (*red mud*). Jika dibandingkan dengan *bottom ash* yang merupakan hasil dari pembakaran batubara, *fly ash* (abu layang) memiliki ukuran material yang lebih kecil dan kandungan Si (silikon) dan Al (aluminium) lebih reaktif daripada *bottom ash*. Reaktivitas material sebagai prekursor sangat menentukan kecepatan proses aktivasi dalam geopolimerisasi. Unsur-unsur kimia di dalam prekursor apabila dicampur dengan larutan alkali sebagai aktivator akan menghasilkan material pasta geopolimer dengan kekuatan mengikat seperti semen (Putra *et al.*, 2014). Produk utama reaksi adalah aluminosilikat struktur tiga dimensi dengan kedua Al dan Si yang terkoordinasi secara tetrahedral (Nikolic *et al.*, 2014).

2.2.3 Aktivator dalam Sintesis Geopolimer

Dalam pembuatan geopolimer dibutuhkan larutan alkali. Umumnya larutan natrium silikat dengan natrium hidroksida (Yadi *et al.*, 2015) atau larutan kalium hidroksida dengan kalium silikat yang digunakan sebagai aktivator (Lloyd & Rangan, 2010). Aktivator dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi monomer alumina dan silika. Alkali mengaktifkan prekursor dengan mendisolusikan mereka ke dalam monomer $^-\text{OSi}(\text{OH})_3$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Selama proses *curing*, monomer-

monomer terkondensasi dan membentuk jaringan polimer tiga dimensi yang berikatan silang. Ion alkali bertindak sebagai penetral muatan (*charge balancer*) (Putra *et al.*, 2014).

2.2.4 Sintesis Geopolimer

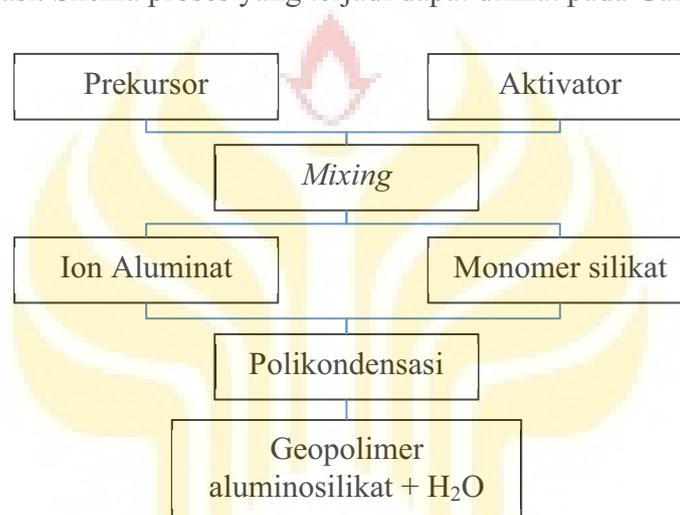
Sampel abu layang sebelum dianalisis dan digunakan perlu dikeringkan pada temperatur 105°C selama 24 untuk menghilangkan kandungan air. Sintesis geopolimer dilakukan dengan cara mencampurkan abu layang dengan larutan pangaktif dan natrium silikat (Kusumastuti & Widiarti, 2014).

Geopolimer dibuat tanpa menggunakan semen sebagai bahan pengikat, dan sebagai pengganti digunakan abu layang yang banyak mengandung silika dan alumina yang dapat bereaksi dengan larutan alkali untuk menghasilkan bahan pengikat (*binder*). Si dan Al yang terdapat dalam abu layang akan bereaksi dengan bantuan natrium hidroksida dan natrium silikat untuk mengikat agregat menjadi geopolimer (Putra *et al.*, 2014).

Larutan alkali yang digunakan dan menghasilkan kuat tekan optimum adalah larutan alkali aktivator campuran antara natrium silikat dan natrium hidroksida atau campuran antara kalium hidroksida dengan kalium silikat. Penggunaan natrium hidroksida dengan natrium silikat menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi (Sidik, 2012). Natrium silikat akan larut dalam air dan selanjutnya akan menghasikan kation Na^+ yang berperan sebagai penyeimbang muatan dalam struktur *crosslink* aluminosilikat (Hardjito & Rangan, 2005). Penambahan natrium hidroksida bertujuan untuk menambah kation Na^+ saat proses polimerisasi, serta berperan dalam memutuskan ikatan pada silika dan alumina pada prekursor untuk membentuk $^-\text{OSi}(\text{OH})_3$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ atau yang

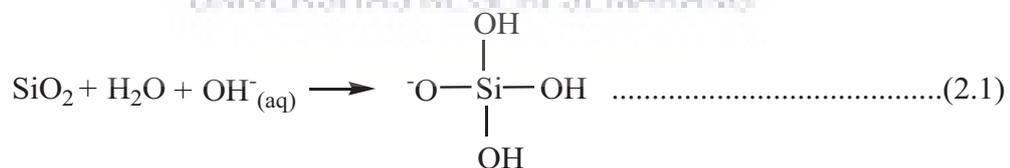
disebut proses disolusi. Selain itu semakin tinggi kadar NaOH yang digunakan akan menghasilkan kuat tekan geopolimer yang lebih tinggi (Hardjito *et al.*, 2004).

Davidovits menyimpulkan bahwa pencampuran prekursor dengan aktivator akan membentuk ion aluminat dan monomer silikat dan mengalami ikatan jaring silang polimer ketika kondensasi dimana H₂O sebagai hasil dari reaksi dehidrasi. Skema proses yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.2.

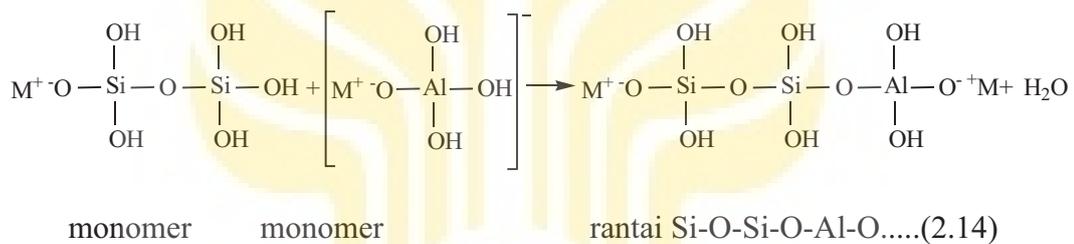
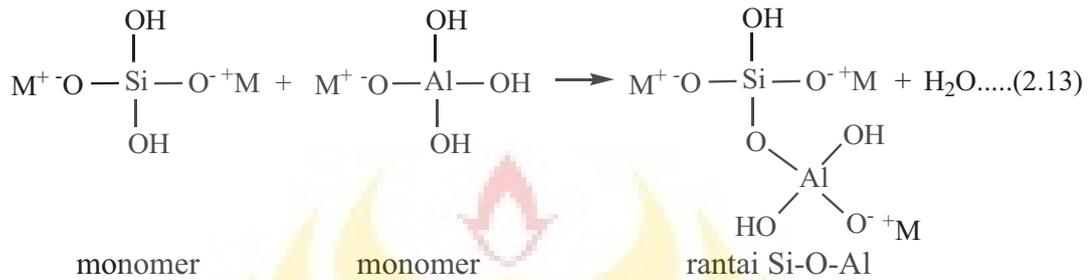
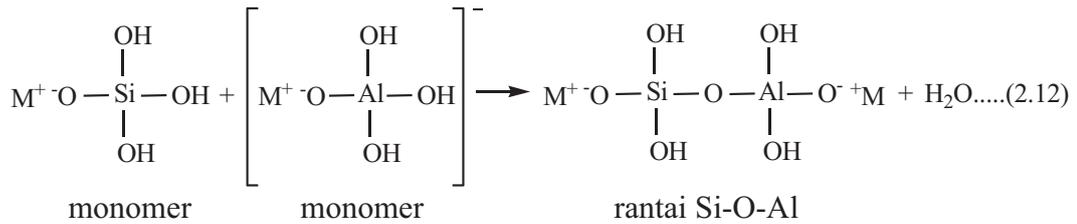


Gambar 2.2. Skema proses pembentukan geopolimer (Yadi *et al.*, 2015)

Menurut Silva *et al.*, (2007), reaksi kimia yang terjadi pada proses polimerisasi dimulai dari pelarutan mineral Si-Al sebagaimana digambarkan pada persamaan reaksi (2.1) dan (2.2).



monomer



Pada proses geopolimerisasi, abu layang mengalami proses aktivasi sedemikian rupa sehingga lebih reaktif dan dapat mengikuti tahap-tahap dalam proses geopolimerisasi.

2.2.5 Sifat-Sifat Geopolimer

Geopolimer mempunyai sifat kimia dan fisika yang baik, seperti tahan api dan tahan terhadap asam (Xu & Deventer, 2000). Davidovits juga menyatakan bahwa geopolimer dapat mengeras secara cepat pada temperatur ruang dan memiliki kuat tekan sekitar 20 MPa hanya setelah 4 jam, pada temperatur 20°C mempunyai kuat tekan sekitar 70-100 MPa setelah 28 hari. Geopolimer juga tahan asam sebagaimana ditunjukkan oleh pengujian terhadap asam dengan cara sampel direndam di dalam asam sulfat dan asam klorida, geopolimer relatif stabil dengan

kehilangan berat hanya sekitar 5-8%. Namun, kuat tekan geopolimer mengalami penurunan setelah kontak dengan asam tergantung jangka waktu kontakannya.

2.3 Logam Berat

2.3.1 Pengertian Logam Berat

Logam berat merupakan unsur kimia dengan massa jenis lebih dari 5,0 g/cm³ (Furini, 2012). Menurut Palar, 1994 bahwa yang tergolong logam berat memiliki karakteristik sebagai berikut:

- a. memiliki spesifikasi gravitasi yang sangat besar,
- b. mempunyai nomor atom 22-34 dan 40-50 serta unsur lantanida dan aktinida,
- c. mempunyai respon biokimia khas pada organisme hidup.

Berdasarkan sudut pandang toksikologi logam berat dibagi dalam dua jenis. Jenis pertama adalah logam berat esensial, keberadaannya dalam jumlah tertentu sangat dibutuhkan oleh organisme hidup, namun dalam jumlah yang berlebihan dapat menimbulkan efek racun. Contoh logam berat ini adalah Zn, Cu, Fe, Co, Mn, dan lain sebagainya. Sedangkan jenis kedua adalah logam berat tidak esensial atau beracun, keberadaannya dalam tubuh masih belum diketahui manfaatnya atau bahkan bersifat racun, seperti Hg, Cd, Pb, Cr, dan lain-lain. Logam berat ini dapat menimbulkan efek kesehatan bagi manusia tergantung pada bagaian mana logam berat tersebut terikat dalam tubuh. Daya racun yang dimiliki akan bekerja sebagai penghalang kerja enzim, sehingga proses metabolisme tubuh terputus. Logam berat masuk ke dalam tubuh manusia melalui kulit, pernafasan, dan pencernaan.

Logam berat secara umum masuk ke lingkungan dengan dua cara yakni secara natural dan antropogenik (terlepas ke lingkungan dengan campur tangan

manusia atau tidak alami). Kondisi alami terlepasnya logam berat di lingkungan akibat pelapukan sedimen karena cuaca, erosi, serta aktivitas vulkanik. Sedangkan, terlepasnya logam berat secara antropogenik akibat aktivitas manusia diantaranya *electroplating*/pelapisan logam, pertambangan, peleburan, penggunaan pestisida, pupuk penyubur tanah, dan lain sebagainya (Ali *et al.*,2013).

Logam berat yang sering mencemari lingkungan perairan adalah Hg, Zn, Cd, As, dan Pb (Furini, 2012). Sumber dari logam berat timbal, kadmium, dan merkuri dalam air, baik yang berupa larutan ataupun padatan sering ditemukan di balik batu, ditemukan dalam bentuk sulfida yang berasal dari limbah/buangan industri yang terkontaminasi, lindi dari *secure landfill* yang tidak terkendali, kegiatan pertambangan yang buruk, dan kebocoran pada kolom penampungan limbah (Istarani & Pandebesie, 2014).

2.3.2 Logam Berat Kadmium (Cd)

Kadmium adalah logam berwarna putih perak, lunak, mengkilap, tidak larut dalam basa, mudah bereaksi, serta menghasilkan kadmium oksida bila dipanaskan. Kadmium umumnya terdapat dalam kombinasi dengan klor (kadmium klorida) atau dengan belerang (kadmium sulfida). Kadmium membentuk Cd^{2+} yang bersifat tidak stabil. Kadmium memiliki nomor atom 48, berat atom 112,4 g/mol, titik leleh 321°C, titik didih 767°C, dan memiliki massa jenis 8,65 g/cm³ (Widiowati, 2008).

Logam kadmium mempunyai karakteristik berwarna putih keperakan seperti logam aluminium, tahan panas, dan tahan terhadap korosi. Kadmium digunakan untuk elektrolisis, bahan pigmen untuk industri cat, enamel, dan plastik.

Logam kadmium biasanya dalam bentuk campuran dengan logam lain terutama timbal dan seng (Said, 2008).

Kadmium mempunyai efek yang tidak baik untuk manusia dewasa, diantaranya menaikkan resiko terjadinya kanker payudara, penyakit kardiovaskular atau paru-paru, dan penyakit jantung. Efek lain yang menunjukkan toksisitas kadmium adalah kegagalan fungsi ginjal, encok, pembentukan arthritis, juga kerusakan tulang (Chen, 2009). Logam kadmium akan mengalami proses biotransformasi atau bioakumulasi dalam organisme hidup (tumbuhan, hewan, dan manusia). Dalam tubuh biota perairan jumlah logam yang terakumulasi akan terus mengalami peningkatan (biomagnifikasi) dan dalam rantai makanan biota yang tertinggi akan mengalami akumulasi kadmium yang lebih banyak. Kadmium dapat terakumulasi dalam tubuh manusia serta baru dapat keluar dari dalam tubuh, tetapi dengan waktu tunggu sekitar antara 20-30 tahun lamanya. Efek dalam tubuh beragam, mulai dari hipertensi sampai kanker (Watts, 1997).

2.3.3 Logam Berat Seng (Zn)

Seng adalah unsur dengan nomor atom 30 dan memiliki berat atom 65,4 g/mol. Memiliki karakter warna biru keabuan dengan warna nyala api biru kehijauan yang terang. Tingkat oksidasi seng umumnya +2, bentuk senyawa logamnya mudah dibentuk dan bersifat nonmagnetik. Seng mempunyai titik leleh 420°C, titik didih 910°C, dan massa jenis 7,1 g/cm³.

Distribusi seng dalam air, sedimen, dan tanah tergantung pada senyawaan seng yang ada pada media dan karakteristik lingkungan tersebut. Kelarutan seng tergantung pada pH. Pada keadaan asam seng akan berada keadaan terlarut dan terion (Bahri, 2010).

Absorpsi seng dalam makhluk hidup cenderung berasal dari cairan daripada makanan. Hanya seng terlarut yang cenderung diserap oleh biota (*bioavailable*). Bioavailabilitas ini tergantung pada sifat fisika dan kimia dari lingkungan dan proses biologi. Pada manusia seng merupakan unsur yang terlibat dalam sejumlah besar enzim yang mengkatalisis reaksi metabolik yang vital (Sony, 2009). Tetapi, keracunan dengan gejala radang gastrointensial dan diare dapat disebabkan dari paparan seng dalam konsentrasi tinggi (Bahri, 2010).

2.4 Immobilisasi Ion Logam Berat

Pada perkembangannya, geopolimer telah digunakan sebagai media immobilisasi ion logam berat (Kamel *et al.*, 2011). Material geopolimer berpotensi untuk immobilisasi ion logam berat karena geopolimer berperilaku seperti zeolit yang dikenal baik kemampuannya untuk menyerap limbah kimia beracun. Mekanisme berikut diperkirakan akan terlibat dalam immobilisasi yaitu ion logam berat diambil ke dalam jaringan geopolimer dan ion logam berat terikat pada struktur sebagai penyeimbang muatan selanjutnya endapan yang mengandung logam berat dienkapsulasi secara fisik (Deventer *et al.*, 2007). Teknologi geopolimerisasi mengimmobilisasi ion logam berat selama proses sintesis geopolimer. Diasumsikan bahwa jenis dan sifat aktivator akan memberikan efek langsung yang akan mempengaruhi sifat fisik dan kimia geopolimer dan juga mempengaruhi perilaku immobilisasi ion logam berat (Zheng *et al.*, 2014).

Kation logam berat seolah terikat dalam struktur geopolimer meskipun ikatan ini tidak mengakibatkan perubahan pada struktur dasar tetrahedral Si dan Al yang merupakan bagian terbesar dalam susunan geopolimer. Immobilisasi

dapat dilakukan melalui kombinasi dua hal, yaitu dengan terjadinya ikatan kimia dan dengan mengenkapsulasi secara fisik logam dalam matriks geopolimer. Enkapsulasi ialah terikatnya kation logam berat pada rongga geopolimer ketika proses sintesis berlangsung (Chen *et al.*, 2009).

Menurut Ogundiran *et al.*, (2013), immobilisasi Pb pada geopolimer diaktifkan oleh alkali dengan Pb bertindak sebagai ion penyeimbang muatan dan sebagai endapan tidak larut yang dienkapsulasi dalam struktur. Pengendapan hidroksida adalah hal yang diharapkan dari immobilisasi Pb dalam geopolimer sesuai dengan sistem semen Portland (Pandey *et al.*, 2012). Pb juga dapat membentuk endapan timbal-silikat. Banyak peneliti menganggap bahwa Pb dienkapsulasi dalam fasa amorf pada struktur aluminosilikat. Untuk beberapa hal, timbal dapat berkontribusi sebagai penyeimbang muatan geopolimer dengan mengganti Na^+ dalam strukturnya (Ogundiran *et al.*, 2013). Cheng *et al.*, (2012), meneliti adsorpsi Pb^{2+} pada geopolimer dan menyimpulkan bahwa, ketika penyebaran dalam geopolimer Pb^{2+} tetap terjebak dalam pori-pori sehingga mengurangi kemungkinan pelindian.

Telah diteliti bahwa adanya logam berat dalam geopolimer dapat mempengaruhi sifat kimia dan fisika geopolimer. Zheng *et al.*, (2014), menyatakan bahwa kuat tekan geopolimer dipengaruhi oleh konsentrasi kation logam berat. Penelitian yang dilakukan oleh Zheng memberikan hasil kuat tekan maksimum pada penambahan Cu^{2+} $0,3 \text{ mol.kg}^{-1}$ pada metakaolin melebihi kuat tekan pada geopolimer tanpa logam berat dengan kuat tekan sebesar 62,5 MPa. Pada penambahan Cu^{2+} $0,0 \text{ mol.kg}^{-1}$ (tanpa penambahan Cu^{2+}) kuat tekan sebesar 42,5 MPa dan penambahan Cu^{2+} $0,5 \text{ mol.kg}^{-1}$ kuat tekan kembali turun yaitu

hanya 40 MPa. Hal tersebut membuktikan bahwa geopolimer mempunyai batas toleransi terhadap logam berat.

2.5 Uji *Leaching* dengan Metode *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP)

Menurut *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), ada empat karakteristik limbah berbahaya yaitu mudah terbakar, korosif, reaktif, dan toksik. Salah satu uji yang dilakukan untuk mengetahui adanya kontaminan toksik adalah menggunakan metode *Toxicity Characteristic Leaching Procedure* (TCLP). Uji TCLP merupakan uji pelindian (*leaching*) yang digunakan sebagai penentuan salah satu sifat bahaya atau beracun suatu limbah dan juga dapat digunakan dalam mengevaluasi produk *pretreatment* limbah sebelum dilandfill dalam proses S/S (Dewi *et al.*, 2016). Uji TCLP di laboratorium dilakukan sesuai dengan USEPA metode 1311. Uji TCLP saat ini digunakan sebagai uji resmi dalam PP No. 101 Tahun 2014.

Prinsip TCLP adalah melarutkan kandungan logam dalam tanah atau padatan sedimen dengan cara ekstraksi. Lamanya pemutaran sampel diharapkan material-material yang berada dalam sampel padat dapat larut dan bercampur secara homogen dengan pelarut yang telah dicampurkan. Larutan ekstraksi untuk prosedur pengujian yang dinyatakan dalam USEPA metode 1311 adalah larutan asam asetat glasial.

Uji TCLP dirancang untuk mensimulasi potensi kebocoran pencemar dari suatu limbah padat. Lokasi yang terdapat limbah padat dapat mengeluarkan air lindi yang mengandung asam-asam organik. Asam asetat dianggap dapat mewakili asam-asam organik maupun air hujan sehingga asam asetat ini dipilih sebagai ekstraktan sedangkan pengaturan pH ekstraktan ditentukan oleh

alkalinitas sampel. Sampel dengan $\text{pH} > 5$ diekstrak dengan larutan asam asetat $\text{pH} 2,88 \pm 0,05$, sedangkan sampel dengan pH rendah ($\text{pH} < 5$) diekstrak dengan larutan asam asetat $\text{pH} 4,93 \pm 0,05$ (USEPA, 1992).

Uji TCLP merupakan metode yang tepat untuk menentukan efisiensi immobilisasi logam berat yang ditambahkan dalam geopolimer. Uji *leaching* bertujuan untuk menentukan konsentrasi ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} yang *terleaching*. Selain itu, proses ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan immobilisasi geopolimer pada penambahan ion logam berat dalam suasana asam yang diharapkan dapat mendekati kondisi alam menggunakan metode TCLP (Supriadi, 2010). Banyaknya konsentrasi logam yang *terleaching* dapat dipengaruhi oleh ukuran material. Menurut Utomo (2008), semakin kecil ukuran material semakin banyak jumlah ion logam berat yang *terleaching*.

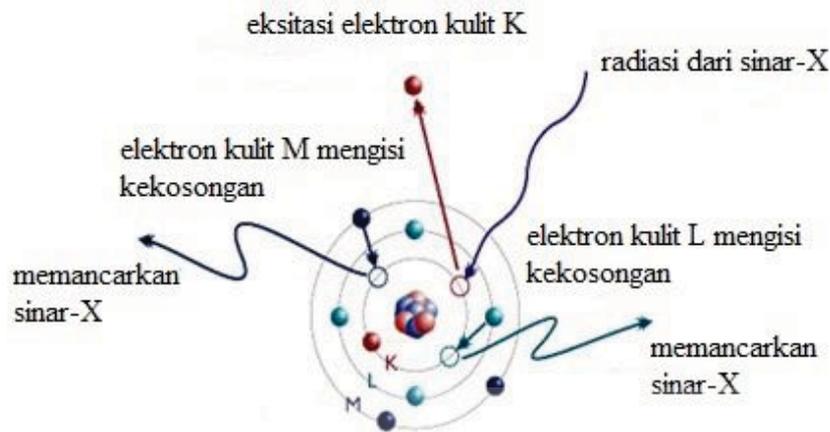
Penelitian yang dilakukan oleh Tampubolon *et al.*, (2014), geopolimer yang telah diimmobilisasi kation logam berat *dileaching* menggunakan asam asetat $\text{pH} = 2,88 \pm 0,05$. Pada penelitiannya kation logam berat Pb^{2+} dan Cu^{2+} divariasi dengan konsentrasi yaitu 1000, 2000, 4000, 8000, dan 16000 (mg/kg) abu layang. Waktu pengambilan sampel telah ditentukan yaitu 1, 2, 4, 8, 16, dan 32 jam. Hasil *leaching* geopolimer yang telah diimmobilisasi dengan kation logam berat Pb^{2+} menunjukkan hasil konsentrasi negatif. Sedangkan hasil *leaching* geopolimer yang diimmobilisasi dengan kation logam berat Cu^{2+} dengan konsentrasi yang tidak dapat terdeteksi. Sehingga dalam penelitian ini digunakan larutan asam nitrat $\text{pH} 1$ agar hasil *leaching* dapat diketahui. Dari hasil *leaching* dapat ditentukan kemampuan immobilisasi ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} pada geopolimer.

2.6 Karakterisasi Geopolimer

2.6.1 Analisis Komposisi Kimia dengan XRF (*X-Ray Fluorescence*)

XRF adalah alat uji yang digunakan untuk analisis unsur yang terkandung dalam bahan secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan yang dianalisis, yang ditunjukkan oleh adanya spektrum unsur pada energi sinar-X. Analisis kuantitatif memberikan informasi jumlah unsur yang terkandung dalam bahan yang ditunjukkan oleh ketinggian puncak spektrum (Munasir *et al.*, 2012). Data yang diperoleh dari analisis ini merupakan data yang akan digunakan untuk perhitungan campuran bahan.

Analisis menggunakan XRF dilakukan berdasarkan identifikasi sinar-X yang terjadi dari peristiwa efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi karena elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar berenergi tinggi. Bila energi sinar tersebut lebih tinggi daripada energi ikat elektron dalam orbital K, L, atau M atom target, maka elektron atom target akan keluar dari orbitnya. Atom target akan mengalami kekosongan elektron. Kekosongan elektron ini akan diisi oleh elektron dari orbital yang lebih luar diikuti pelepasan energi yang berupa sinar-X. Sinar-X yang dihasilkan merupakan suatu gabungan spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu yang berasal dari bahan yang tertumbuk elektron. Jenis spektrum yang terjadi tergantung pada perpindahan elektron yang terjadi dalam atom bahan (Munasir *et al.*, 2012). Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Skema interaksi *X-Ray* dan elektron pada XRF

2.6.2 Uji Kuat Tekan dengan *Universal Testing Machine*

Salah satu sifat mekanik yang digunakan sebagai parameter geopolimer adalah kuat tekan (*compressive strength*). Kuat tekan merupakan tingkat atau derajat kekuatan suatu material terhadap gaya tekan dari luar yang memberikan beban. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nominal kuat tekan geopolimer sehingga dapat diperoleh nilai nominal perbandingan kuat tekan. Pembebanan dilakukan mulai dari beban yang rendah hingga beban maksimum yang dapat diterima hingga sampel tersebut retak.

Data yang diperoleh dari pengujian ini adalah beban maksimum (F_{max}) yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami keretakan. Kuat tekan dipengaruhi oleh luas permukaan yang dikenai oleh beban. Nilai kuat tekan (P) didapatkan dengan memasukkan nilai beban yang terbaca dan luas permukaan kontak sampel ke dalam persamaan 2.15 (Tjokrodinuljo, 2007):

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{\pi \cdot r^2} \dots \dots \dots (2.15)$$

keterangan: P = kuat tekan (MPa)

m = massa beban (kg)

g = gaya gravitasi (m/s^2)

r = jari-jari (m)

F = beban maksimum (N)

A = luas penampang silinder (m^2)

Spesifikasi beton siap pakai dibagi menjadi 3 kelas yaitu beton mutu tinggi, sedang, dan rendah (SNI 03-4433-1997). Tabel 2.2 merupakan spesifikasi beton berdasarkan kuat tekannya.

Tabel 2.2. Mutu beton dan penggunaannya

Jenis beton	Kuat tekan (x) MPa	Manfaat
Mutu tinggi	$x \geq 45$	Umumnya digunakan untuk beton prategang seperti tiang pancang beton, gelagar beton prategang, dan pelat beton prategang
Mutu sedang	$25 \leq x \leq 45$	Umumnya digunakan untuk beton bertulang seperti jembatan, jalan, gorong-gorong, bangunan bawah jembatan
Mutu rendah	$10 \leq x \leq 20$	Umumnya untuk trotoar, beton siklop, dan paving

Sumber: SNI 03-4433-1997

Pengukuran kuat tekan dilakukan pada saat umur sampel 28 hari, karena setelah umur tersebut reaksi geopolimerisasi tidak menunjukkan peningkatan kekuatan yang signifikan (Hardjito *et al.*, 2004). Nikolic *et al.*, (2014) telah melakukan sintesis geopolimer dari abu layang yang diaktifkan secara mekanik kemudian digunakan sebagai media immobilisasi ion logam berat Pb^{2+} . Hasil penelitian menunjukkan bahwa geopolimer berbasis pengaktifan abu layang secara mekanik lebih efektif dalam mengimmobilisasi Pb^{2+} dibandingkan dengan geopolimer abu layang. Aktivasi mekanik dari abu layang menyebabkan peningkatan yang signifikan pada kuat tekan dan mengurangi *leaching* Pb^{2+} . Kuat tekan geopolimer berbasis abu layang teraktivasi secara mekanik memberikan

kuat tekan hampir 30 kali lebih besar daripada kuat tekan geopolimer abu layang yaitu sebesar $30,92 \text{ N/mm}^2$ pada umur 1 hari dan mencapai $57,85 \text{ N/mm}^2$ pada umur 28 hari.

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

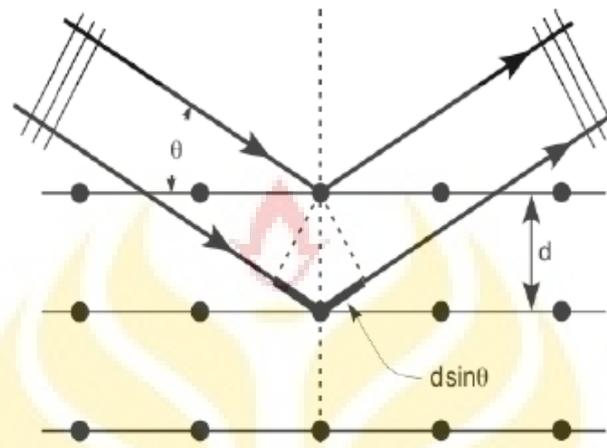
Bahan baku abu layang, geopolimer sebelum diimmobilisasi, dan geopolimer yang telah diimmobilisasi logam berat dilakukan uji XRD yang bertujuan untuk mengetahui hasil polimerisasi yang diinterpretasikan melalui kristalinitas hasil uji XRD. Dengan demikian, hasil kekuatan sampel geopolimer mampu dikaitkan dengan hasil polimerisasi melalui data XRD.

XRD merupakan alat untuk mengetahui karakteristik struktur kristal dengan memanfaatkan sinar-X. Sinar-X terjadi apabila suatu berkas elektron bebas berenergi kinetik tinggi menumbuk logam yang merupakan sumber sinar dengan daya tembus yang besar. Elektron ini yang menimbulkan sinar-X, sehingga puncak-puncak akan muncul atau terlihat (Rahman & Toifur, 2016).

Seberkas sinar-X dipantulkan dari suatu bidang kristal yang berjarak antara d berkas sinar yang dipantulkan dari bidang yang kedua menempuh jarak $2d \sin \theta$ lebih panjang dari pada berkas yang dipantulkan dari bidang pertama, dengan θ adalah sudut datang yang diukur terhadap permukaan kristal. Sinar-sinar pantul yang sefase berbeda lintasan kelipatan bulat dari panjang gelombang akan menimbulkan interferensi saling menguatkan. Pemantulan dan interferensi bergabung menjadi difraksi. Difraksi akan saling menguatkan jika terpenuhi persamaan Bragg sebagai berikut (Rahman & Toifur, 2016):

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

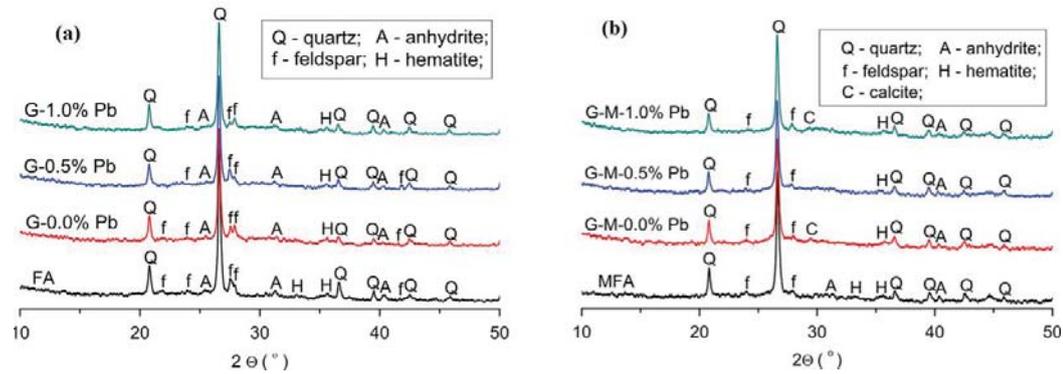
Hasil tersebut dikenal dengan hukum Bragg bagi difraksi sinar-X. Dengan d merupakan jarak antara bidang (hkl) untuk sebuah kristal, θ adalah sudut Bragg, λ adalah panjang gelombang radiasi, dan bilangan bulat $n = 1, 2, 3,$ dan seterusnya. Hamburan sinar-X pada kristal ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Hamburan sinar-X pada kristal (Rahman & Toifur, 2016).

Terbentuknya geopolimer ditandai dengan adanya gundukan 2θ antara 20° sampai 30° dan puncak pada 2θ sekitar 28° (Silva *et al.*, 2007). Saat abu layang digunakan sebagai material awal, fase kristal *quartz* dan *mullite* akan muncul dalam pola XRD sampel abu layang dan akan tetap dalam produk geopolimer yang dihasilkan. Banyak kasus tidak ada fase kristal baru yang terbentuk selama proses geopolimerisasi (Song, 2007).

Nikolic *et al.*, (2014) melakukan sintesis geopolimer dari abu layang dan abu layang teraktivasi secara mekanik. Hasil analisis fasa mineral diperoleh difraktogram seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Difaktogram (a) abu layang (FA) geopolimer dengan dan tanpa Pb^{2+} , (b) abu layang aktivasi mekanik (MFA) geopolimer dengan dan tanpa Pb^{2+}

Fase kristal yang terdeteksi yaitu *quartz* sebagai fasa yang paling dominan, *anhydrite*, *feldspar*, dan *hematite*. Fase kristal yang ada di abu layang (FA) juga terdapat di abu layang aktivasi mekanik (MFA). Namun, pada abu layang teraktivasi secara mekanik terjadi pengurangan intensitas puncak berupa fase kristal terutama *feldspar* dan *anhydrite*. Pengurangan intensitas juga terjadi pada *quartz* yang menunjukkan bahwa terbentuknya matriks geopolimer yang berfasa amorf. Dalam sampel geopolimer dengan penambahan Pb^{2+} , fasa kristal timbal seperti timbal hidroksida atau timbal silikat tidak terdeteksi. Fakta ini dapat menunjukkan bahwa Pb^{2+} tidak membentuk ikatan kimia dengan fasa aluminosilikat geopolimer. Namun, perlu diketahui bahwa jumlah Pb^{2+} yang ditambahkan relatif kecil yaitu 1% Pb^{2+} dalam massa abu layang yang digunakan. Penambahan lebih dari 3% Pb^{2+} dalam bentuk $Pb(NO_3)_2$ dengan geopolimer berbasis abu layang menyebabkan pembentukan fasa timbal silikat (Pb_3SiO_5) yang terdeteksi dengan analisis *X-Ray*.

2.6.4 Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR (*Fourier Transform Infra Red*)

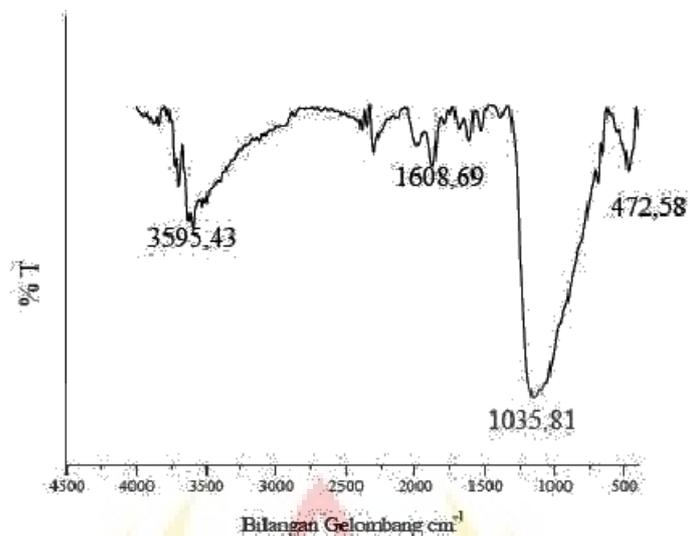
Spektroskopi FTIR (*Fourier Transform Infra Red*) merupakan salah satu instrumen yang dapat digunakan untuk identifikasi mineral secara kualitatif dan

mulai dikembangkan untuk identifikasi secara kuantitatif. Analisis pada FTIR bergantung pada getaran molekul sehingga dapat digunakan untuk identifikasi mineral, karena mineral memiliki karakteristik spektra penyerapan dalam *midrange* pada infra merah (4000-400 cm^{-1}). Selain itu, FTIR memiliki kemampuan yang cepat dalam menganalisis, bersifat tidak merusak dan hanya dibutuhkan preparasi sampel yang sederhana (Ritz *et al.*, 2011).

Energi radiasi IR digunakan terbatas hanya pada transisi molekul melibatkan vibrasi. Efek dari vibrasi ini menyebabkan perubahan momen dipol. Radiasi medan listrik yang berubah-ubah akan berinteraksi dengan molekul. Interaksi tersebut menghasilkan serapan yang khas dari setiap komponen atau struktur molekul. Serapan grup fungsional berada pada kisaran 4000-1500 cm^{-1} sedangkan fenomena intramolekular yang bersifat sangat spesifik untuk setiap materi antara 1500-400 cm^{-1} (daerah sidik jari) (Khopkar, 2002). Spektra yang mungkin muncul pada analisis gugus fungsi geopolimer disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Interpretasi infra merah ($1/\lambda$)

No	Frek $1/\lambda$ (cm^{-1})	Interpretasi	Referensi
1.	3500-3200	Vibrasi rentang -OH	Panias & Giaonnopoulou, 2006
2.	1700-1600	Vibrasi tekuk H-O-H	Panias & Giaonnopoulou, 2006
3.	1420	Vibrasi ulur O-C-O	Kusumastuti, 2009
4.	1200-950	Vibrasi ulur asimetri Si-O-Si atau Si-O-Al	Bakharev, 2005
5.	500-420	Vibrasi tekuk Si-O-Si atau Si-O-Al	Panias <i>et al.</i> , 2007



Gambar 2.6. Spektra FTIR abu layang PLTU Suralaya (Puspitasari & Atmaja, 2010).

Gambar 2.6 merupakan contoh spektra abu layang yang diambil dari PLTU Suralaya. Puncak-puncak hasil analisis menjelaskan adanya vibrasi gugus fungsi yang terkandung dalam abu layang. Pada puncak $472,58 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi ulur simetri Al-O-Si, sedangkan puncak pada bilangan gelombang $1035,81 \text{ cm}^{-1}$ merupakan vibrasi ulur asimetri T-O-Si (T=Si dan Al). Puncak pada bilangan gelombang $1608,69 \text{ cm}^{-1}$ merupakan vibrasi tekuk H-O-H dan puncak pada bilangan gelombang $3593,5 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya vibrasi ulur -OH dan H-O-H (Bakharev, 2005).

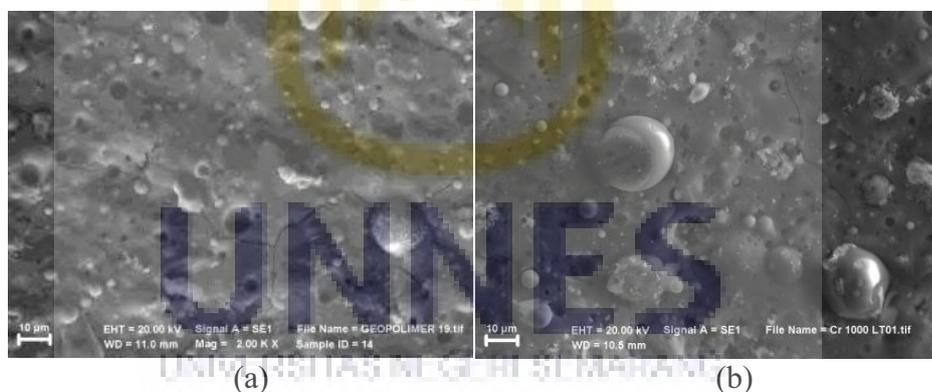
2.6.5 Analisis Morfologi dengan SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

SEM merupakan suatu metode yang digunakan untuk melihat morfologi material dengan perbesaran berkisar antara 20-500.000 kali. SEM terdiri dari sebuah senapan elektron yang memproduksi berkas elektron pada tegangan yang dipercepat sebesar 2-30 kV (Desi, 2008).

Prinsip SEM adalah berkas elektron berinteraksi dengan sampel yang menghasilkan *secondary electron* (SE) di dalam detektor. SE tersebut diubah

menjadi sinar listrik seterusnya akan menghasilkan gambar pada monitor. Sinyal yang keluar dari detektor akan berpengaruh terhadap intensitas cahaya di dalam tabung monitor karena jumlah cahaya yang dipancarkan oleh monitor sebanding dengan jumlah elektron yang berinteraksi dengan sampel (Masrukan *et al.*, 1999).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Fatmawati & Fansuri (2014), diperoleh mikrograf dari geopolimer abu layang dan geopolimer yang telah diimmobilisasi oleh ion logam berat Cr^{3+} . Mikrograf ini menunjukkan kurang kompaknya matriks geopolimer yang mengimmobilisasi ion logam berat menyebabkan kuat tekan melemah. Penambahan larutan $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ menyebabkan waktu pengerasan awal geopolimer menjadi lebih cepat sehingga pelarutan abu layang berkurang dan terdispersinya ion logam berat Cr^{3+} dalam abu layang tidak maksimal sehingga terkonsentrasi menjadi gumpalan-gumpalan yang diduga $\text{Cr}(\text{OH})_3$.



Gambar 2.7 Hasil analisis SEM (a) geopolimer sebelum immobilisasi dan (b) geopolimer dengan immobilisasi Cr^{3+} (Fatmawati & Fansuri, 2014)

2.7 Analisis Kadar Ion Logam Berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} dengan AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*)

AAS merupakan metode analisis unsur secara kuantitatif yang pengukurannya berdasarkan penyerapan cahaya dengan panjang gelombang tertentu oleh atom dalam keadaan bebas (Skoog & West, 1980). Atom dalam

keadaan gas akan menyerap sejumlah energi sinar tertentu. Dengan demikian molekul-molekul akan mengalami disosiasi dan direduksi menjadi atom-atom bebas (Khopkar, 1990).

Apabila cahaya dengan panjang gelombang tertentu dilewatkan pada suatu sel yang mengandung atom-atom bebas maka sebagian cahaya akan diserap dan intensitas penyerapan akan berbanding lurus dengan banyaknya atom bebas logam. Hubungan antara absorbansi dengan konsentrasi diturunkan dari hukum Lambert menyatakan bila suatu sumber sinar monokromatik melewati medium transparan, maka intensitas sinar yang diteruskan akan berkurang dengan bertambahnya ketebalan medium yang mengabsorpsi, dan hukum Beer menyatakan bahwa intensitas sinar yang diteruskan berkurang secara eksponensial dengan bertambahnya konsentrasi spesi yang menyerap sinar tersebut (Day & Underwood, 1989).

Syarat penggunaan Hukum Beer:

1. Baik untuk larutan encer.
2. Hanya berlaku pada cahaya yang benar-benar monokromatik.
3. Zat pengabsorpsi tidak boleh berdisosiasi, berasosiasi, atau berinteraksi dengan pelarut yang menghasilkan suatu produk pengabsorpsi spektrum yang berbeda dari zat yang dianalisis.
4. Larutan yang diukur harus jernih.

Dari kedua hukum tersebut diperoleh suatu persamaan:

$$I_t = I_0 \cdot e^{-(\epsilon bc)} \text{ atau}$$

$$A = -\log I_t/I_0 = \epsilon b c$$

keterangan I_0 = intensitas sumber sinar

I_t = intensitas sinar yang diteruskan

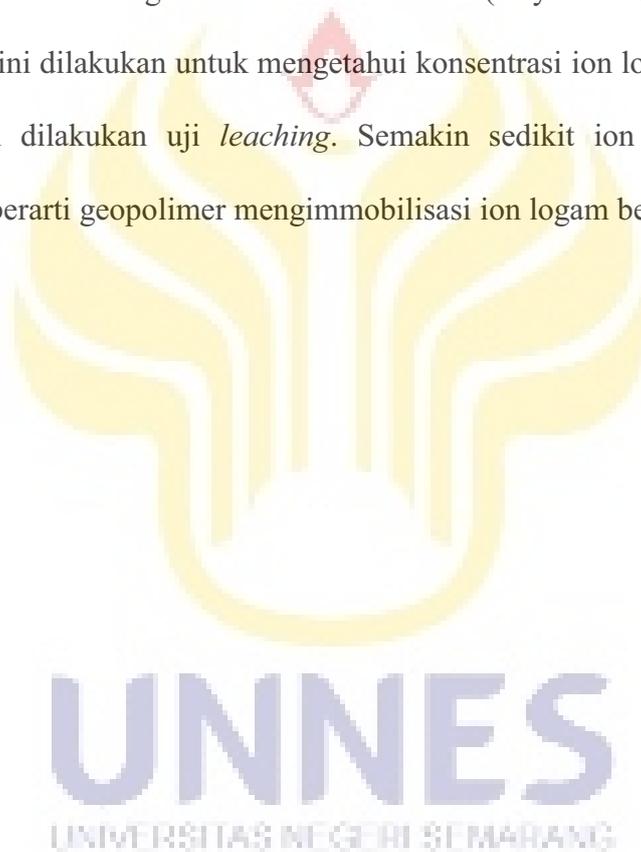
ε = absorptivitas molar

b = panjang medium

c = konsentrasi atom-atom yang menyerap sinar

A = absorbansi

Dari persamaan di atas, dapat disimpulkan bahwa absorbansi cahaya berbanding lurus dengan konsentrasi atom (Day & Underwood, 1989). Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui konsentrasi ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} setelah dilakukan uji *leaching*. Semakin sedikit ion logam berat yang *terleaching* berarti geopolimer mengimmobilisasi ion logam berat dengan baik.



BAB 5

PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Penambahan ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} dapat mempengaruhi kualitas geopolimer yang dihasilkan. Kuat tekan optimum dihasilkan pada penambahan Cd^{2+} 250 ppm dengan kuat tekan sebesar 34,05 MPa dan Zn^{2+} 100 ppm sebesar 35,48 MPa. Karakteristik geopolimer dengan penambahan ion logam berat Cd^{2+} 250 ppm dan Zn^{2+} 100 ppm mempunyai fasa amorf yang relatif lebih besar, analisis gugus fungsi menunjukkan terbentuknya geopolimer dengan vibrasi ulur asimetri Si-O-Si atau Si-O-Al, dan matriks geopolimer terlihat lebih padat.
2. Semakin banyak ion logam berat yang ditambahkan semakin banyak ion logam berat yang *terleaching*. Geopolimer lebih baik dalam mengimmobilisasi ion logam berat Cd^{2+} daripada Zn^{2+} , dilihat dari *leachat* yang dihasilkan Cd^{2+} 250 ppm 24 jam lebih sedikit daripada Zn^{2+} 250 ppm yaitu sebesar 0,23 ppm dan 0,66 ppm.
3. Semakin lama waktu pengambilan sampel *leachat* maka semakin banyak ion logam berat yang *terleaching*. Ion logam dengan kemampuan immobilisasi terbaik ada pada penambahan Cd^{2+} 250 ppm 24 jam *terleaching* sebanyak 0,23 ppm dan Zn^{2+} 100 ppm yang *terleaching* sebanyak 0,22 ppm.
4. Semakin kecil ukuran ayakan material geopolimer maka semakin banyak ion logam yang *terleaching*. Pengukuran *leachat* geopolimer pada penambahan

Cd^{2+} 250 ppm (kuat tekan tertinggi), ion logam yang *terleaching* sebanyak 0,044 ppm (50 mesh), 0,070 ppm (100 mesh), dan 0,23 ppm (170 mesh). Geopolimer dengan penambahan Zn^{2+} 100 ppm (kuat tekan tertinggi) ion logam yang *terleaching* sebanyak 0,077 ppm (50 mesh), 0,179 ppm (100 mesh), dan 0,22 ppm (170 mesh).

5.2 Saran

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

1. Perlu dilakukan pengukuran terhadap larutan $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ dan $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ yang digunakan untuk immobilisasi agar konsentrasi ion yang terimmobilisasi dapat dibandingkan dengan ion logam yang *terleaching*.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan mencampurkan ion logam berat Cd^{2+} dan Zn^{2+} dalam satu sintesis geopolimer agar dapat diketahui kemampuan immobilisasi geopolimer.
3. Perlu dilakukan penelitian dengan menggunakan limbah pabrik atau limbah lainnya yang mengandung ion logam berat agar dapat dibandingkan dengan immobilisasi limbah buatan.
4. Perlu dilakukan pengecekan pH pada pembuatan larutan $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, larutan HNO_3 yang digunakan untuk *leaching*, dan pH setiap pengambilan sampel *leachat*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmaruzzaman, M. 2011. Industrial Wastes as Low-cost Potential Adsorbents for the Treatment of Wastewater Laden with Heavy Metals. *Advances in Collid and Interface Science*, 166: 36-59.
- Ali, H., Khan E., & Sajad M.A. 2013. Phytoremediation of Heavy Metals- Concepts and Applications. *Chemosphere*, 91: 869-881.
- Anggoro, W. & L. Atmaja. 2010. Amobilisasi Logam Berat Pb pada Sintesis Geopolimer dari Abu Layang Semen Gresik. *Prosiding Skripsi Semester Gasal 2010/2011*. Surabaya: Jurusan Kimia FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Anwar, S. 2015. *Pemanfaatan Serat Batang Pohon Pisang dalam Sintesis Material Hibrida Berbasis Geopolimer Abu Layang Batubara*. Skripsi. Semarang: Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- ASTM C 618. 1994. Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. *American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, Pennsylv Vania*, 4(2).
- Badan Standarisasi Nasional. 1997. *SNI 03-4433-1997. Spesifikasi Beton Siap Pakai*. Bandung: ICS.
- Bahri, W.S. 2010. *Spesiasi Logam Berat Cu dan Zn dengan Metode Ekstraksi dan Migrasinya dengan Diffusive Gradient in Thin Film (DGT) dari Sedimen Perairan Teluk Jakarta*. Tesis. Depok: FMIPA Pascasarjana Universitas Indonesia.
- Barkharev, T. 2005. Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solution. *Cement and Concrete Research*, 36(6): 1134-1147.
- Chen, Dr., Klassen C.D. 2009. Cadmium Toxicity. *Environmental Health Perspective Dec*.
- Chen, Q.Y.M. Tyrer, C.D Hills, X.M Yang, & P. Carey. 2009. Immobilisation of Heavy Metal in Cement-Based Solidification/Stabilization: A Review. *Waste Management*, 29: 390-403.
- Cheng T.W., M.L. Lee, M.S. Ko, T.H. Ueng & S.F. Yang. 2012. The heavy Metal Adsorption Characteristics on Metakaolin-based Geopolymer. *Applied Clay Science*, 56: 90-96.
- Colangelo, F., Roviello, G., Ricciotti L., Ferone, C., & Cioffi, R. 2013. Preparation and Characterization of New Geopolymer-Epoxy Resin Hybrid Mortars. Department of Engineering University of Naples Parthenope. *Journal of Material Science*, 6: 3943-3962.

- Davidovits, J. 1991. Geopolymers: Inorganicpolymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37: 633-1656.
- Davidovits, J. 1994. Gepolymers: Man-made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *Journals of Materials and Education*, 16: 91-137.
- Day, Jr,R.A. & A.L. Underwood. 1989. Analisis Kimia Kuantitatif. Jakarta: Erlangga.
- Desi, N.A. 2008. Analisa SEM (Scaning Electron Microscopy) dalam Pemantauan Proses Oksidasi Magnetite menjadi Hematite. *Seminar Nasional-VII*. Bandung: Fakultas Teknologi Industri ITN.
- Deventer V.J.S.J., J.L. Provis, P. Duxon, & G.C. Lukey. 2007. Reaction Mechanisms in the Geopolymeric Conversion of Inorganic Waste to Useful Products. *Journal of Hazardous Materials*, 139(3): 506-513.
- Dewi, N.R., D. Dermawan, & M.L. Ashari. 2016. Studi Pemanfaatan Limbah B3 Karbit dan Fly Ash sebagai Bahan Campuran Beton Siap Pakai (BSP). *Jurnal Presipitasi*, 13(2): 34-43.
- Duxon, P., Jhon L., P., Grand, C., & Janie S.,J. 2007. The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of Green Concrete. *Cement and Concrete Research*, 37: 1590-1597.
- Fatmawati, A. & H. Fansuri. 2014. Amobilisasi Kation Logam Berat Cr³⁺ pada Geopolimer Berbahan Baku Abu Layang PT. IPMOMI. *Jurnal Sains Pomits*, 1(1): 1-8.
- Furini, A. 2012. Plants and Heavy Metals. *Springer*, 1-3.
- Hardjito, D. & B.V. Rangan. 2005. *Development and properties of low-calcium Fly Ash-based geopolymer Concrete*. Research Report GC 1. Australia: Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth.
- Hardjito, D., S.E. Wallah, D.M.J. Sumajouw, & B.V. Rangan. 2004. Factors Influencing The Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Dimensi Teknik Sipil*, 6(2): 88-93.
- Hisan, A.K. 2016. *Pemanfaatan Serat Daun Nanas dalam Sintesis Geopolimer Berbasis Abu Layang Batubara*. Skripsi. Semarang: Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Semarang.
- Istarani, F. & Pendebesie E.S. 2014. Studi Dampak Arsen (As) dan Kadmium (Cd) terhadap Penurunan Kualitas Lingkungan. *Jurnal Teknik Pomits*, 3(1): 2337-3539.
- Jaarsveld, J.G.S., & V. Deventer, J.S.J. 1999. The effect of metal contaminant on the formation and properties of waste-based geopolymers. *Cement and Concrete Reserach*, 29: 1189-1200.

- Jaarsveld, V.J.G.S., J.S.J.V. Deventer, & G.C. Lukey. 2003. The Characterization of Source Materials in Fly Ash Based Geopolymers. *Material Letter*, 57: 1272-1280.
- Julharmito, A. Fadli, & Drastinawati. 2015. Pemanfaatan Limbah Abu Terbang (Fly Ash) Batubara sebagai Bahan Campuran Beton Geopolimer. *Jom Fteknik*, 2(2): 1-7.
- Kakali, G., Perraki, T., Tsivilis, S., & Bodagiannis, E. 2001. Thermal Treatment of Kaolin: the Effect of Mineralogy and Pozzolanic Activity. *Applied Clay Science*, 20: 73-80.
- Kamel A.Z., M.S. Al-Harashsheh, & B.H. Falah. 2011. Fly Ash-based Geopolymer for Pb Removal from Aqueous Solution. *Journal of Hazardous Materials*, 188(1-3): 414-421.
- Kamran, K. & Ali, S. 2013. Heavy Metals Contamination and What are the Impact on Living Organism. *Greener Journal of Environmental Management and Public Safety*, 2(4): 172-179.
- Khopkar, S. M. 1990. Konsep Dasar Kimia Analitik. Jakarta: Universitas Indonesia Press.
- Khopkar, S. M. 2002. Konsep Dasar Kimia Analitik. Jakarta: Universitas Indonesia Press.
- Kusumastuti, E. 2009. *Geopolimer Abu Layang Batubara: Studi Rasio Mol SiO₂/Al₂O₃ dan Sifat-sifat Geopolimer yang Dihasilkan*. Tesis. Surabaya: Program Magister FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kusumastuti, E., & N. Widiarti. 2014. Sintesis Geopolimer Berbusa Berbahan Dasar Abu Layang Batubara dengan Hidrogen Peroksida sebagai Foaming Agent. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 12(2): 119-128.
- Lee, W.K.W & Deventer, V.J.S.J. 2002. The Effect of Ionic Contaminants on the Early-Age of Alkali-Activated Fly Ash Cement. *Cement and Concrete Research*, 32: 577-584.
- Masrukan, Wagiyo, & Aditoyanto. 1999. Pemeriksaan Mikrostruktur dan Analisis Unsur Al, Mg, Si, Menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM)-EDS. *Prosiding Seminar Nasional Hamburan Neutron dan Sinar X Ke-2*. Bandung: Puslitbang Iptek Bahan-Batan.
- Munasir, Triwikantoro, M. Zainuri, & Darminto. 2012. Uji XRD dan XRF pada Bahan Mineral (Batuan dan Pasir) sebagai Sumber Material Cerdas (CaCO₃ dan SiO₂). *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya*, 2(1): 20-29.
- Nikolic V., M. Komljenovic, & N. Marjanovic. 2014. Lead Immobilization by Geopolymers Based on Mechanically Activated Fly Ash. *Ceramics International*, 40: 8479-8488.

- Ogundiran M.B., H.W. Nugteren, & G.J. Witkamp. 2013. Immobilisation of Lead Smelting Slag Within Spent Aluminate-fly Ash Based Geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 248-249: 29–36.
- Palar, H. 1994. *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Pandey B., S.D. Kinrade, & L.J.J. Catalan. 2012. Effects of Carbonation on the Leachability and Compressive Strength of Cement-solidified and Geopolymer-solidified Synthetic Metal Wastes. *Journal Environmental*, 101: 59–67.
- Panias, D., & Giannopoulou, I. 2006. Development of Inorganic Polymeric Materials Based on Fired Coal Fly Ash. *Acta Metallurgica Slovaca*, 12: 321-327.
- Panias, D., Ioanna, P., Giannopoulou, I., & Theodara, P. 2007. Effect of Synthesis Parameters on the Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymers. *Physicochem Engineering Aspects*, 301: 246-254.
- Pemerintah RI. 2001. Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Jakarta: Menteri Negara Sekretaris Negara RI.
- Pemerintah RI. 2014. Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 tentang Perubahan Peraturan Pemerintah Nomor 18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Jakarta: Menteri Negara Sekretaris Negara RI.
- Phair, J.W. & Deventer, J.S.J. 2002. Effect of the Silicate Activator pH on the Microstructura Characteristics of Waste-Based Geopolymers. 66: 121-143.
- Puspitasari, Y., & Atamaja, L. 2010. Sintesis dan Karakterisasi Geopolimer Berdasarkan Variasi Rasio Mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dari Abu Layang PLTU Suralaya. *Prosiding Skripsi*. Surabaya: Jurusan Kimia FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Putra A.K., S.E. Wallah, & S.O. Dapas. 2014. Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 2(7): 330-336.
- Putranto, H.T. 2007. Coal Fly Ash Conversion to Zeolite for Removal of Chromium and Nickel from Waste Waters. *Chemical Engineering*. Indonesia: ITB.
- Rahman, S. & M. Toifur. 2016. Rancangan Eksperimen Analisis Struktur Mikro Sampel dengan Prinsip XRD Menggunakan Metode Kristal Berputar. *JRKPF UAD*, 3(1): 5-9.
- Rees, C.A., Provis, J.L., Deventer, J.S.J. & Luckey, G.C. 2007. The Mechanism of Geopolymer Gel Formation Investigated Through Seeded Nucleation.

- Colloids and Surface A: Physicochemistry Engineering Aspects*, 318: 97-105.
- Ritz, M., Vaculikova, L., & Plevova, E. 2011. Application of Infrared Spectroscopy and Chemometric Methods to Identification of Selected Minerals. *Acta Geodyn Geomater*, 8(161): 47-58.
- Sidik, U. 2012. *Sintesis Metakaolin dan Abu Terbang sebagai Prekursor Geopolimer*. Skripsi. Depok: Teknik Metalurgi dan Material FT Universitas Indonesia.
- Silva, P.D., K.S. Crenstil, & V. Sirivivatnanon. 2007. Kinetics of Geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cement and Concrete Research*, 37: 512-518.
- Skoog D.A., & D.M. West. 1980. Principles of Instrumental Analysis. *Sounders College*, Philadelphia.
- Song X. 2007. *Development and Performance of Class F Fly Ash Based Geopolymer Concrets Against Sulphuric Acid Attack*. Tesis. Australia: School of Civil and Environmental Engineering The Unniversity of New South Wales Sydney.
- Sony. 2009. *Penentuan Kadar Logam Seng (Zn) dan Tembaga (Cu) dalam Air Pam Hasil Penyaringan Yamaha Water Purifier Tipe Drinking Stand*. Skripsi. Medan: Kimia FMIPA Universitas Sumatera Utara.
- Stiasari A., L. Atmaja, & Y.L. Ni'mah. 2011. Amobilisasi Kation Logam Berat Cd^{2+} pada Geopolimer dengan Variasi Konsentrasi NaOH dari Abu Layang PT. IPMOMI. *Prosiding Skripsi Semester Ganjil 2011/2012*. Surabaya: Jurusan Kimia FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Supriadi W. 2010. *Amobilisasi Logam Berat Cd^{2+} dan Pb^{2+} dengan Geopolimer*. Tesis. Surabaya: Jurusan Kimia FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Supriadi, W., Subaer, Bayuaji, R., Burhan, R.Y.P., & Fansuri, H. 2016. The Effect of Pb^{2+} and Cd^{2+} Addition to Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Paste. *Materials Science Forum*, 841: 178-185.
- Susanti, R., D. Mustikaningtyas, F.A. Sasi. 2014. Analisis Kadar Logam Berat pada Sungai di Jawa Tengah. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 12(1): 35-40.
- Tampubolon F.F., E. Purwanti, & H. Fansuri. 2015. Pengaruh Amobilisasi Kation Cu^{2+} dan Pb^{2+} terhadap Kuat Tekan dan Ketahanan Asam pada Geopolimer Abu Layang. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 4(2): 147-152.
- Tangiran, Z., Edward, & Rozak, A. 2003. Kandungan Logam Berat Pb, Cd, Cu, Zn, dan Ni dalam Air Laut dan Sedimen di Muara Sungai Membramo, Papua dalam Kaitannya dengan Kepentingan Budidaya Perikanan. *Makara Sains*, 7(3): 119-127.

- Tjokrodinuljo, K. 2007. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: KMTS FT UGM.
- U. S. Environmental Protection Agency. 1992. *Toxicity Characteristic Leaching Procedure Method 1311*. Washington: DC.
- U. S. Environmental Protection Agency. 1993. *Solidification/Stabilization and Its Application to Waste Materials*. Washington: DC.
- Utomo, M.P. 2008. Efek Logam Berat terhadap Sifat Semen pada Proses Solidifikasi/Stabilisasi Limbah Berbahaya. *Seminar Nasional Kimia*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta.
- Warih. 2009. *Amobilisasi Logam Berat Cd dan Pb pada Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang Cilacap*. Tesis. Surabaya: Jurusan Kimia FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Watts, R.J.1997. *Hazardous Waste: Sources, Pathways, Receptors*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Widiowati. 2008. *Efek Toksik Logam*. Yogyakarta: Andi.
- Xu, H. & Deventer V.J.S.J. 2000. The Geopolymerisation of Alumino-silicate Minerals. *International Journal Mineral Processing*, 59: 247-266.
- Yadi, M. 2015. *Kuat Tekan Mortar Beton Geopolimer Berdasarkan Keahlian Fly Ash dengan Menggunakan Aktivator Sodium Hydroxide (NaOH) dan Sodium Silicate (Na₂SiO₃)*. Palembang: Teknik Sipil Fakultas Teknik.
- Zheng L., W. Wang, W. Qiao, Y. Shi, & X. Liu. 2014. Immobilization of Cu²⁺, Zn²⁺, Pb²⁺, and Cd²⁺ During Geopolymerization. *Research Article*. China: School of Environment.