

AMOBILISASI KATION Cd^{2+} PADA GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG PT. IPMOMI

Pis Anisatun Mahmudah dan Hamzah Fansuri

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: h.fansuri@chem.its.ac.id

Abstrak— Pada penelitian ini telah dilakukan amobilisasi kation Cd^{2+} pada geopolimer dengan bahan dasar abu layang PT. IPMOMI. Penambahan $Al(OH)_3$ dilakukan untuk memvariasikan SiO_2/Al_2O_3 pada geopolimer Rasio SiO_2/Al_2O_3 sebesar 6,46 diketahui menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan tertinggi yaitu 25 MPa. Komposisi tersebut digunakan sebagai komposisi geopolimer untuk amobilisasi kation Cd^{2+} . Geopolimer dengan penambahan kation Cd^{2+} sebesar 4000 ppm (mg/kg abu layang) menghasilkan kuat tekan yang tertinggi yaitu 38,6 MPa. Sampel geopolimer Cd-1000 merupakan sampel yang terbaik untuk mengamobilisasi Cd^{2+} daripada sampel yang lainnya. Penambahan ion Cd^{2+} lebih dari 1000 ppm menyebabkan lebih banyak ion Cd^{2+} yang ter-leaching.

Kata Kunci— Abu layang, Amobilisasi Kation Cd^{2+} , Geopolimer, Leaching, Mikrostruktur

I. PENDAHULUAN

Geopolimer merupakan polimer anorganik yang terbentuk dari aluminosilikat yang teraktivasi oleh cairan alkali aktivator yang pertama kali diperkenalkan oleh Davitdovits pada tahun 1978. Aluminosilikat adalah prekursor utama dalam pembuatan geopolimer yang sumbernya bisa berasal dari kaolin, bentonit, ampas biji besi, dan abu layang. Penggunaan abu layang sebagai sumber aluminosilikat dapat mengoptimalkan kegunaannya yang selama ini masih dianggap limbah (Khale dan Chaudhary, 2006).

Salah satu aplikasi dari geopolimer adalah amobilisasi ion logam berat. Menurut Van Jaarveld dkk (1997), mekanisme yang terjadi pada amobilisasi logam berat oleh geopolimer masih belum dipahami dengan jelas. Terdapat beberapa kemungkinan yang terjadi pada peristiwa amobilisasi logam berat pada geopolimer, diantaranya adalah ion logam bereaksi dan membentuk jaringan geopolimer, ion logam berperan sebagai penyeimbang muatan, dan ion logam mengendap serta terenkapsulasi secara fisika.

Salah satu logam berat yang perlu diamobilisasi adalah kadmium. Kadmium merupakan logam yang berbahaya karena dapat meracuni paru-paru, ginjal, kanker, hipertensi, dan penyakit tulang.

Beberapa penelitian mengenai amobilisasi ion Cd^{2+} telah dilakukan. Minarikova dan Skavara (2006) menggunakan bahan baku abu layang untuk mengamobilisasi 0,5% Cd^{2+} dan suhu curing geopolimer

yaitu 80°C. Kuat tekan geopolimernya pada hari ke-7 adalah 20 MPa. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Zhang dkk. (2008) namun bahan bakunya dari campuran abu layang dan pasir dengan perbandingan 1:1 dan suhu curing geopolimer yaitu 40°C. Hasil kuat tekan geopolimernya pada hari ke-7 adalah 38,4 MPa. Walaupun kuat tekannya cukup tinggi, pada penelitian tersebut masih ditemukan permasalahan yaitu komposisi geopolimer yang sesuai untuk mengamobilisasi ion Cd^{2+} agar laju pelepasannya tinggi serta kadar ion Cd^{2+} yang sesuai saat diamobilisasi oleh geopolimer.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah peralatan dari plastik, labu ukur 1000 mL, pipet ukur, propipet, gelas ukur plastik 100 mL, beaker gelas 250 mL, pipet plastik, pengaduk, ayakan 120 mesh, sieve shaker, mixer, hot plate, magnetik stirer, neraca analitik, oven, dan cetakan berbentuk silinder dengan rasio diameter dan tinggi yaitu 1:2. Instrumentasi analisis yang digunakan untuk karakterisasi adalah mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*) di Laboratorium Beton D3 Teknik Sipil ITS, XRD (Pan Analytical) *Inductively Coupled Plasma-Optic Spectroscopy* (ICP – OES) merk Prodigy di Laboratorium Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS dan SEM-EDX merk Zeiss EVO tipe MA 10 di Laboratorium Studi Energi dan Rekayasa LPPM ITS. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain abu layang PT. IPMOMI, aqua terdemineralisasi (aqua DM), natrium hidroksida (NaOH) p.a, natrium silikat (Na_2SiO_3) teknis (*waterglass*), aluminium hidroksida ($Al(OH)_3$) SIGMA-ALDRICH, $Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ p.a dan asam asetat glasial p.a.

B. Prosedur Kerja

B.1 Preparasi Abu layang

Abu layang diayak menggunakan ayakan 120 mesh dan dikeringkan menggunakan oven bersuhu 105 °C selama 24 jam.

B.2 Pembuatan Larutan Pengaktif

Larutan pengaktif dibuat dengan cara mencampurkan larutan NaOH dan water glass. Larutan NaOH dibuat dengan cara melarutkan 42 g pelet NaOH dalam 80 g aqua DM. Selanjutnya, larutan NaOH didiamkan pada suhu ruang selama 6 jam. Setelah 6 jam, 120 g *waterglass* ditambahkan kepada larutan NaOH dan diaduk sehingga larut sempurna.

B.3 Pembuatan Geopolimer dengan Variasi $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Pada pembuatan geopolimer, variasi $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dilakukan dengan penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Rasio *Solid/Liquid* (S/L) yang digunakan adalah 3,59. Fasa *solid* adalah abu layang, *water glass*, pellet NaOH, dan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Sedangkan fasa *liquid*-nya adalah aqua DM serta kandungan air pada *water glass* dan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Variasi penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dapat dilihat pada Tabel 2.1. Pada variasi tersebut, penambahan aqua DM sebagai pelarut dilakukan dalam komposisi yang berbeda agar didapat nilai S/L yang tetap. Pada geopolimer tersebut, variabel tetapnya adalah abu layang, *water glass*, dan pellet NaOH seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 3.2. Perbandingan *Solid/Liquid* (S/L) = 3,59 dan $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,65$.

Tabel 2.1. Variasi penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$

Nama Sampel	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}(\text{OH})_3$ (g)	Aqua DM (g)
Al-0	6,85	0,0	0,0
Al-1,7	6,46	5,1	37,9
Al-5	5,81	15	40,0
Al-9	5,18	27	43,9

Langkah pertama dalam pembuatan geopolimer adalah menimbang abu layang sesuai komposisi dan diletakkan dalam wadah plastik. Selanjutnya, abu layang tersebut ditambahi larutan pengaktif dan diaduk hingga homogen dan membentuk pasta selama 30 detik. Kemudian, campuran tersebut ditambahi larutan $\text{Al}(\text{OH})_3$ sambil diaduk dengan kecepatan dan arah pengadukan yang sama selama 150 detik. Pasta geopolimer yang terbentuk dimasukkan ke dalam cetakan silinder dengan dimensi: diameter = 2,7 dan tinggi = 5,4 cm.

Pasta geopolimer didiamkan di dalam cetakan selama 24 jam sehingga mengeras. Kemudian, pasta yang telah mengeras tersebut dilepaskan dari cetakannya. Pasta geopolimer yang telah dilepas dari cetakannya kemudian dimasukkan ke dalam kantong plastik kedap udara dan dipanaskan di dalam oven pada suhu 55°C selama 24 jam. Setelah itu, geopolimer yang dihasilkan didiamkan selama 7 hari pada suhu ruang sebelum diuji kekuatan tekannya. Resep yang menghasilkan geopolimer dengan kekuatan tekan tertinggi dijadikan sebagai resep pembuatan geopolimer untuk mengamobilisasi ion Cd^{2+} .

B.4 Sintesis Geopolimer dengan Penambahan Ion Cd^{2+}

Pada sintesis geopolimer dengan penambahan ion Cd^{2+} dilakukan perlakuan yang sama dengan sintesis geopolimer pada sub-bab B.3. Penambahan $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dilakukan setelah penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Pada sintesis ini, komposisi mol sebagai berikut $\text{S/L} = 3,59$; $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,66783$; $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,31297$; $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 3,334621$; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 6,4582$. Penambahan ion Cd^{2+} pada geopolimer dilakukan dengan 5 variasi konsentrasi logam Cd yang ditunjukkan oleh tabel 2.2. Komposisi bahan-bahan yang digunakan pada amobilisasi ion Cd^{2+} yaitu 260 g abu layang, 80 g *water glass*, 28 g NaOH yang dilarutkan dalam 50 g Aqua DM, dan 3,4 g $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang dilarutkan dalam 15 g Aqua DM.

Pada pembuatan geopolimer dengan penambahan ion Cd^{2+} dilakukan perlakuan yang sama dengan sintesis geopolimer pada sub-bab 3.2.3. Penambahan $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dilakukan setelah penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$. $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ berupa padatan berwarna putih sehingga perlu dilarutkan dalam 15 g aqua DM sebelum ditambahkan pada pasta. Penambahan ion Cd^{2+} pada geopolimer dilakukan dengan 5 variasi konsentrasi logam Cd yang ditunjukkan oleh Tabel 3.3.

Tabel 2.2. Variasi konsentrasi ion Cd^{2+} pada amobilisasi geopolimer

Kadar Cd^{2+} dalam 260 g abu layang (ppm)	Massa Cd^{2+} (g)	Massa $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (g)
1000	0,26	0,713
2000	0,52	1,427
4000	1,04	2,853
8000	2,08	5,707
16000	4,16	11,414

B.5. Leaching Ion Cd^{2+} pada Geopolimer

Uji *leaching* dilakukan pada pecahan sampel geopolimer setelah didiuji kuat tekannya dan berukuran antar 5 dan 6 mm. Proses *leaching* menggunakan larutan asam asetat 0,1 M. Asam asetat 0,1 M dibuat dengan mengencerkan 5,7 mL asam asetat glasial ke dalam 1000 mL aqua DM. Rasio sampel geopolimer dan larutan asam asetat pada uji *leaching* adalah 1:25. Sampel geopolimer diletakkan dalam jaring kasa dan ditempatkan melayang dalam larutan asam asetat. Larutan asam asetat diaduk menggunakan *magnetic stirer* selama 6,5 jam. Kemudian, sampel *leachant* diambil dan dianalisis dengan ICP-OES.

B.6. Karakterisasi Geopolimer

Geopolimer dilakukan uji kuat tekan Umur geopolimer yang diuji kuat tekan adalah 7 hari setelah dilepaskan dari cetakannya. Data yang diperoleh setelah diuji kuat tekan adalah massa beban geopolimer dengan satuan ton. Selanjutnya, data tersebut diolah untuk mengetahui kuat tekannya dalam satuan MPa.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot g}{A} \quad (3.1)$$

dimana g adalah gaya gravitasi yang besarnya 10 m/s, m adalah massa beban geopolimer yang tertera pada alat (kg), $\pi = 3,14$, r adalah jari-jari (m), P adalah kuat tekan (Pa) = 10^6 MPa.

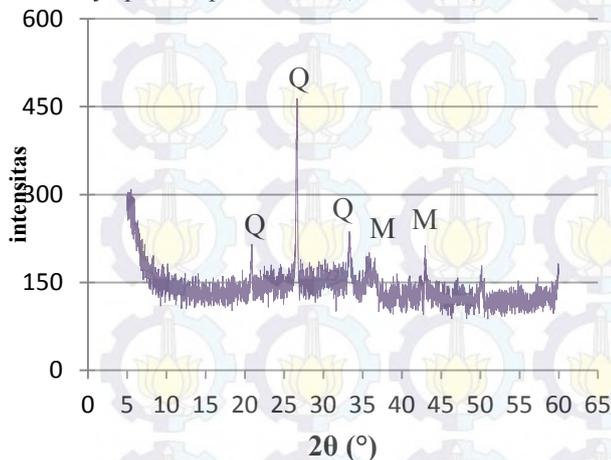
Mikrostruktur dan sebaran ion Cd^{2+} geopolimer juga dipelajari dengan menggunakan SEM-EDX. Pada layang dan sampel geopolimer Al-1,7 dan Al-5 dikarakterisasi dengan teknik difraksi sinar-X (Pan Analytical) untuk mengetahui fasa kristal dan amorfnya. Difraktogram sinar X, sudut 2θ yang dipilih yaitu antara $0-60^\circ$ dengan sumber radiasi $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Persiapan Penelitian

Abu layang PT. IPMOMI juga dianalisis dengan XRD yang bertujuan untuk mengetahui fasa kristalnya. Gambar 3.1 menampilkan difraktogram sinar X dari abu

layang PT. IPMOMI. Difraktogram tersebut menunjukkan beberapa puncak yang tajam yang dimiliki oleh abu layang. Akan tetapi, puncak tajam dengan intensitas yang lebih tinggi daripada puncak yang lainnya muncul pada 2θ sekitar $26,67^\circ$. Puncak-puncak pada sudut tersebut merupakan puncak khas dari mineral kuarsa (*quartz*). Adanya *quartz* (Q) pada abu layang bisa berasal dari sumber batu baranya maupun saat batu baranya mengalami pembakaran (Williams dan Riessen, 2010). Selain kristal *quartz*, pada abu layang juga terdapat *mullite* (M) yang ditandai dengan munculnya puncak pada $2\theta = 36,48^\circ$ dan $42,96^\circ$.



Gambar 3.1. Hasil difraktogram abu layang PT.

Ukuran partikel dan luas permukaan mempengaruhi laju dan banyaknya spesi yang dapat terlarut selama geopolimerisasi (Duxson dkk., 2005). Oleh karena itu sebelum melakukan sintesis geopolimer, abu layang diayak dengan ayakan 120 mesh untuk menyeragamkan ukuran partikelnya sehingga perbedaan ukuran partikel yang mungkin terjadi pada sintesis geopolimer dapat diminimalkan. Selanjutnya abu layang dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam. Kandungan air di dalam abu layang yang telah dikeringkan ini dapat diabaikan sehingga tidak diperhitungkan dalam penentuan jumlah air yang perlu ditambahkan dalam proses pembuatan geopolimer.

Larutan pengaktif dibuat dengan cara mencampurkan larutan NaOH dan *water glass*. Larutan NaOH dibuat dengan melarutkan NaOH pellet dengan aqua DM. Selanjutnya larutan NaOH didiamkan dalam suhu ruang selama 6 jam. Setelah itu, larutan NaOH dicampurkan dengan *water glass*. Pencampuran *water glass* dengan NaOH menghasilkan larutan pengaktif yang lebih baik daripada jika hanya menggunakan larutan NaOH sebagai aktivator. Ketika larutan aktivator hanya berisi NaOH reaksi yang terjadi didominasi oleh pelarutan ion-ion spesi Si^{4+} dan Al^{3+} dari dalam abu layang, namun tidak disertai dengan proses pengerasan. Akan tetapi, jika pada larutan alkalin tersebut ditambah dengan larutan silikat, maka akan terjadi pengerasan yang disebabkan oleh terbentuknya ikatan silang oleh spesies Si seperti yang dilaporkan oleh Lee dan van Deventer (2007).

Penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ perlu dilakukan karena jumlah ion Al pada abu layang tidak mencukupi untuk menghasilkan gel sesuai dengan komposisi yang diinginkan (Xu and van Deventer, 2000). Dalam suasana basa kuat, Al berada dalam bentuk $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.

C. Pembuatan Geopolimer dengan Variasi $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Tahapan pertama dalam pembuatan geopolimer adalah mereaksikan abu layang dengan larutan pengaktif. Reaksi yang terjadi pada tahapan ini adalah terlepasnya spesi Si dan Al dari abu layang sehingga membentuk $\text{OSi}(\text{OH})_3$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Selanjutnya, pasta ditambah $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan diaduk kembali. Penambahan Al pada pH yang sangat tinggi menyebabkan terbentuknya spesi tetrahedral $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Atom Al lebih mampu berikatan dengan gugus OH^- (Weng dkk, 2005). Selanjutnya terjadi pembentukan monomer-monomer $\text{Na}^+ \text{Al}(\text{OH})_4^-$, silikat, dimer, dan seterusnya. Tahapan berikutnya adalah proses polikondensasi dengan melepaskan molekul air.

Pengadukan dilakukan selama 3 menit yang terhitung saat pertama kali mereaksikan larutan pengaktif dan abu layang hingga akan mencetak geopolimer. Pasta diaduk searah untuk memperkecil terbentuknya gelembung udara. Pasta dicetak dalam cetakan silinder dengan perbandingan diameter dan tinggi yaitu 1:2 (Zheng dkk., 2014).

Gambar 3.2 menunjukkan foto geopolimer dengan variasi mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Sampel Al-0 dan Al-1,7 memiliki penampakan fisik yang terlihat sama yaitu berwarna kecoklatan (Gambar 4.2 (a) dan (b)). Penampakan fisik tersebut berbeda dengan sampel Al-5 dan Al-9. Gambar 4.2 (c) dan (d) merupakan penampakan fisik dari sampel Al-5 dan Al-9. Sampel Al-5 dan Al-9 memperlihatkan bahwa di dalam geopolimer memiliki warna kecoklatan dengan didominasi oleh warna putih. Warna putih tersebut dimungkinkan merupakan $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang menggumpal. Penampakan fisik pada sampel Al-9 menunjukkan warna putih yang tersebar menyeluruh di dalam geopolimer daripada sampel Al-5. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyaknya $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang ditambahkan pada pasta geopolimer, semakin banyak juga gumpalan $\text{Al}(\text{OH})_3$.



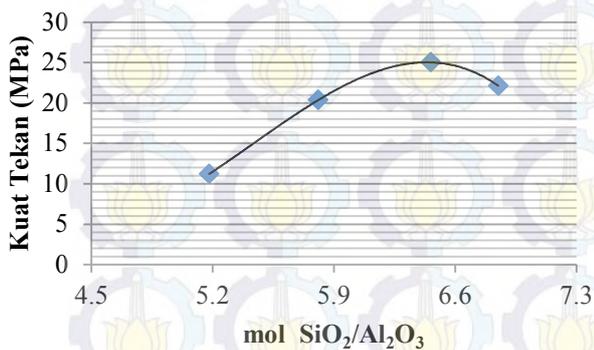
Gambar 3.2. Sampel geopolimer (a) Al-0; (b) Al-1,7; (c) Al-5; dan (d) Al-9

Tabel 3.1 menunjukkan pengaruh kuat tekan geopolimer yang berumur 7 hari dengan variasi $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Pada rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 6,85 (sampel Al-0) dilakukan dengan tidak menambahkan $\text{Al}(\text{OH})_3$ pada campuran sehingga sumber Al yang digunakan untuk geopolimerisasi hanya berasal dari abu layang saja. Tidak adanya penambahan $\text{Al}(\text{OH})_3$ pada saat geopolimerisasi berdampak pada rendahnya nilai kuat tekan yang dihasilkan yaitu 22,11 MPa. Kuat tekan yang rendah dikarenakan Al yang bereaksi kurang mencukupi untuk membentuk geopolimer. Penambahan Al pada sampel Al-1,7 memiliki kuat tekan paling tinggi yaitu 25,02 MPa.

Tabel 3.1. Kuat tekan geopolimer hari ke-7 dengan variasi rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

Nama sampel	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/Al ₂ O ₃	Kuat Tekan hari ke-7 (MPa)
Al-0	6,8514	4,4358	22,11
Al-1,7	6,4582	4,1812	25,02
Al-5	5,8107	3,7620	20,39
Al-9	5,1811	3,3544	11,22

Kandungan ion Al³⁺ sangat mempengaruhi waktu pengerasan pada saat proses geopolimerisasi. Semakin banyak Al yang ditambahkan, semakin kecil rasio SiO₂/Al₂O₃ yang dapat mengakibatkan meningkatnya kecepatan pengerasan pada geopolimer. Pengerasan yang cepat mengakibatkan proses geopolimerisasi tidak selesai secara sempurna karena geopolimer sudah berubah menjadi fasa padat di mana transfer ion-ion penyusun geopolimer menjadi jauh lebih sulit terjadi. Hubungan antara rasio SiO₂/Al₂O₃ terhadap kuat tekan geopolimer disajikan pada Gambar 3.3. Pada gambar tersebut terlihat bahwa penambahan Al dengan rasio SiO₂/Al₂O₃ kurang dari 6,46 (sampel Al-5 dan Al-9) awalnya menaikkan nilai kuat tekan (Gambar 3.3). Ketika rasio SiO₂/Al₂O₃ melebihi 6,46, kekuatan geopolimer menjadi berkurang yang disebabkan oleh waktu pengerasannya yang terlalu cepat.



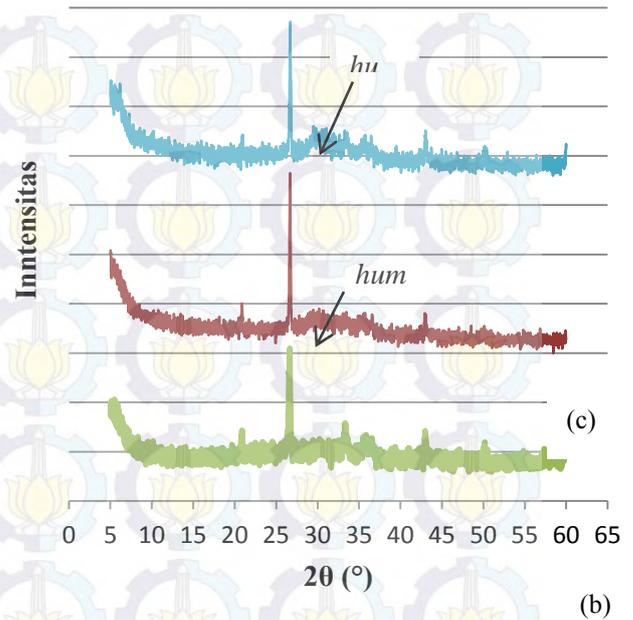
Gambar 3.3. Grafik rasio mol SiO₂/Al₂O₃ geopolimer terhadap kuat tekannya

D. Fasa dan Mikrostruktur Geopolimer Dengan Variasi SiO₂/Al₂O₃

Difraktogram sinar-X abu layang dan geopolimer ditampilkan pada Gambar 4.4. Perbedaan difraktogram abu layang PT. IPMOMI menunjukkan adanya perbedaan fasa yang terkandung di dalam abu layang. Difraktogram sinar-X abu layang (Gambar 3.4 (a)) menunjukkan bahwa kandungan fasa amorf tidak terdeteksi pada abu layang PT. IPMOMI

Kandungan fasa amorf ditunjukkan oleh keberadaan *hump*/gundukan pada 2θ antara 28 sampai dengan 35°. Di lain pihak, pada sampel geopolimer Al-1,7 dan Al-5 (Gambar 3.4 (b) dan (c)) terdeteksi adanya fasa amorf berupa *hump*/gundukan pada 2θ 28-35° yang menunjukkan produk geopolimer. Namun demikian, kristal *quartz* yang terdapat di abu layang masih terdapat di geopolimer baik sampel Al-1,7 maupun Al-5. Keadaan tersebut dikarenakan geopolimerisasi hanya akan terjadi pada Si dan Al dengan fasa amorf. Menurut Williams dan Riessen (2010), bagian abu layang yang amorf akan menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan lebih kuat. Autef dkk (2013) juga telah menjelaskan bahwa fasa amorf dari Si dan Al memiliki kereaktifan yang tinggi dalam medium alkalin (larutan

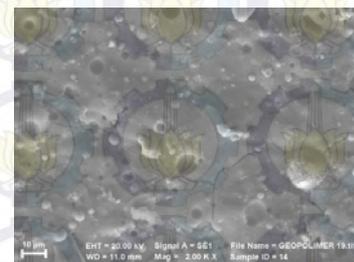
pengaktif).



Gambar 3.4. Difraktogram sinar X (a) abu layang, sampel (b) Al-1,7, dan (c) Al-5

Proses geopolimerisasi belum sepenuhnya selesai membentuk produk geopolimer. Pada sampel geopolimer Al-1,7 (Gambar 3.5), terlihat masih terdapatnya bentuk bola yang merupakan aluminosilikat (ditunjukkan oleh panah biru). Hal ini membuktikan bahwa tidak semua aluminosilikat pada abu layang bereaksi dengan larutan pengaktif. Permukaan abu layang yang teraktivasi larutan pengaktif ditunjukkan oleh panah *orange*.

Sampel geopolimer Al-1,7 menunjukkan masih banyaknya pori (Gambar 3.5). Terbentuknya pori dalam geopolimer bisa diakibatkan oleh rasio mol SiO₂/Al₂O₃ ataupun Si/Al. Duxson dkk. (2005) mengungkapkan bahwa jika rasio Si/Al kecil maka cenderung menghasilkan mikrostruktur dengan ukuran pori yang besar. Selain itu, pori tersebut bisa dipengaruhi oleh rasio H₂O/Na₂O. Semakin banyak Al(OH)₃ yang ditambahkan, semakin tinggi nilai H₂O/Na₂O. Hal ini mengakibatkan terjadinya kelebihan molekul H₂O yang berpengaruh pada produk. Kelebihan molekul H₂O yang tidak bisa menguap di permukaan, menyebabkannya terbentuknya pori di dalam geopolimer.



Gambar 3.5 Foto SEM Sampel Al-1,7

Sampel Al-5 dan Al-9 memiliki kuat tekan yang rendah. Hal ini bisa jadi dikarenakan rasio SiO₂/Al₂O₃ yang lebih rendah daripada sampel Al-1,7. De Silva dkk (2007) menjelaskan bahwa rasio SiO₂/Al₂O₃ yang tinggi akan

menghasilkan fasa geopolimer yang amorf. Sedangkan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang rendah cenderung menghasilkan butiran-butiran yang mengandung Na-Al-Si pada geopolimer dan menyebabkan rendahnya nilai kuat tekannya.

Kuat tekan pada sampel Al-1,7 merupakan kuat tekan yang terbaik sehingga komposisi sampelnya digunakan sebagai komposisi geopolimer untuk mengamobilisasi ion Cd^{2+} .

D. Amobilisasi Kation Cd^{2+} pada Geopolimer

Penambahan kation Cd^{2+} pada geopolimer memberikan pengaruh pada kuat tekannya. Geopolimer tanpa penambahan kation Cd^{2+} menghasilkan kuat tekan sebesar 25 MPa. Penambahan sedikit logam menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan geopolimer ion Cd^{2+} . Kuat tekan tertinggi yaitu 38,6 MPa didapat pada sampel Cd-4000. Selanjutnya, penambahan $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ lebih dari 4000 ppm mengalami penurunan kuat tekan.

Beberapa ilmuwan telah mempelajari pengaruh amobilisasi logam berat terhadap geopolimer dan mekanisme reaksi yang terjadi. Amobilisasi logam berat pada saat geopolimerisasi bisa menyebabkan terbentuknya ikatan secara kimia yang membentuk struktur geopolimer maupun terjadi enkapsulasi secara fisika (Terzano dkk., 2004). Selain itu, ion logam berat juga dapat berperan sebagai penyeimbang muatan (Van Jaarveld dkk., 1997). Mekanisme tersebut dapat mempengaruhi produk geopolimer.

Penambahan kation Cd^{2+} pada geopolimer memberikan pengaruh pada kuat tekannya. Tabel 3.3 memperlihatkan kuat tekan dari variasi penambahan Cd^{2+} pada geopolimer. Geopolimer tanpa penambahan kation Cd^{2+} menghasilkan kuat tekan sebesar 25,02 MPa. Penambahan ion Cd^{2+} berpengaruh pada nilai kuat tekannya. Pada Cd-1000, Cd-2000, dan Cd-4000 terjadi peningkatan kuat tekan. Namun terjadi penurunan kuat tekan pada Cd-8000 dan Cd-16000. Sampel Cd-4000 dengan penambahan Cd^{2+} 4000 ppm menghasilkan kuat tekan tertinggi yaitu 38,60 MPa.

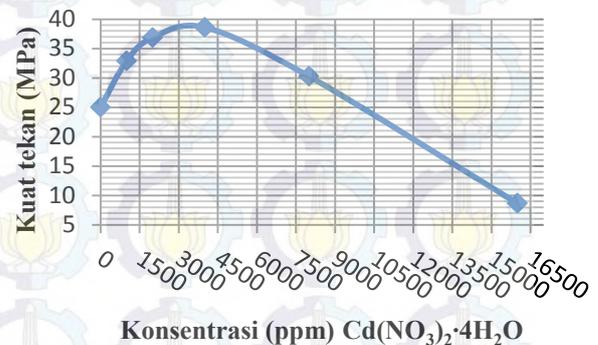
Tabel 3.2 Hasil kuat tekan geopolimer dengan maupun tanpa penambahan kation Cd^{2+}

Nama Sampel	Konsentrasi $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (ppm)	Kuat Tekan (MPa)
Cd-1000	1000	32,8999
Cd-2000	2000	36,8479
Cd-4000	4000	38,6025
Cd-8000	8000	30,2679
Cd-16000	16000	8,64798

Pada Gambar 3.6 ditampilkan grafik pengaruh kuat tekan geopolimer terhadap penambahan Cd^{2+} . Pada grafik terlihat bahwa penambahan Cd^{2+} dapat menaikkan kuat tekan hingga kadar Cd^{2+} 4000 ppm. Kuat tekan tertinggi diperoleh geopolimer dengan penambahan Cd^{2+} 4000 ppm yaitu sebesar 38,60 MPa. Namun, pada konsentrasi yang lebih besar dari 4000 ppm, terjadi penurunan kuat tekan setelah penambahan kation Cd^{2+} lebih dari 4000 ppm.

Penambahan $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ pada geopolimerisasi, akan menyebabkan terbentuknya $\text{Cd}(\text{OH})_2$ karena berada dalam kondisi sangat basa (Zhang dkk, 2008). Menurut

Zhang dkk (2008) bahwa adanya $\text{Cd}(\text{OH})_2$ dapat memberikan pengaruh pada matriks geopolimer dan difrakrogram geopolimer menunjukkan adanya puncak yang sangat kecil pada 2θ sekitar 19° .



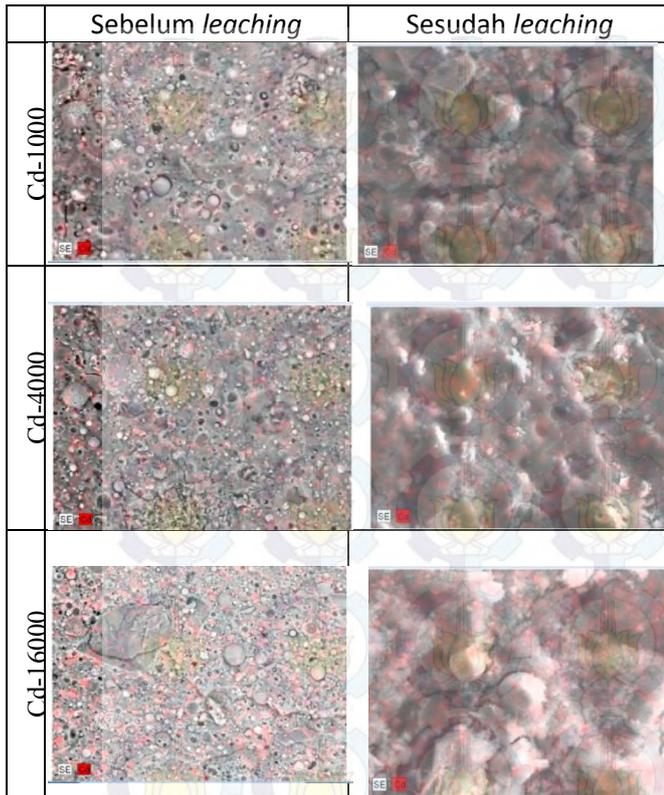
Gambar 3.6. Grafik kuat tekan geopolimer terhadap penambahan Cd^{2+}

4.1. Distribusi Sebaran ion Cd^{2+} Pada Geopolimer

Pengujian SEM-EDX dilakukan dengan tujuan mengetahui persebaran kation Cd^{2+} di dalamnya. Pada penelitian ini dilakukan uji SEM-EDX pada sampel dari pecahan geopolimernya. Terhadap sampel-sampel tersebut diamati distribusi Cd^{2+} pada geopolimer sebelum maupun setelah di-leaching.

Foto SEM-EDX pada Gambar 3.7 merupakan EDX dari sampel Cd-1000, Cd-4000, dan Cd-16000 sebelum dan sesudah di-leaching. Pada foto tersebut dapat dilihat bahwa distribusi ion Cd^{2+} telah merata hampir diseluruh bagian geopolimer baik pada sampel sebelum dan sesudah di-leaching. Sebaran ion Cd^{2+} pada sampel Cd-16000 lebih merata daripada yang lainnya dikarenakan penambahan Cd^{2+} yang lebih banyak daripada sampel lainnya. Sehingga ion Cd^{2+} tersebar merata di seluruh geopolimer dan juga dapat dilihat bahwa Cd^{2+} terkonsentrasi di beberapa bagian sampel. Hal ini berbeda dengan sampel Cd-1000 dan Cd-4000 yang distribusi Cd^{2+} cukup merata pada geopolimer namun jumlah Cd^{2+} tidak terkonsentrasi seperti pada Cd-16000.

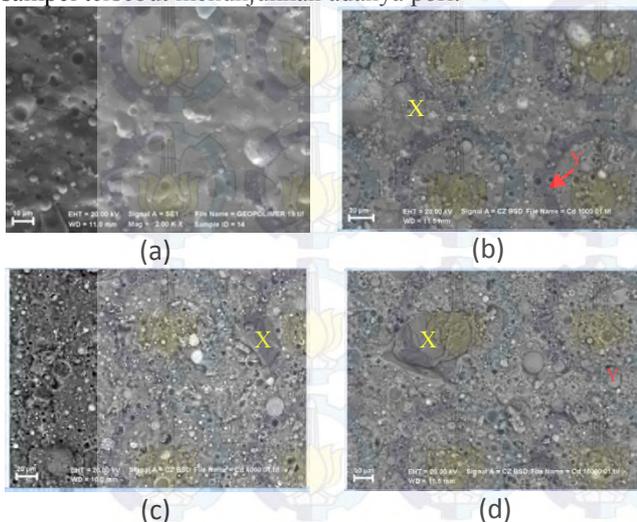
Hasil analisis SEM-EDX yang serupa juga diperoleh pada sampel yang setelah di-leaching. Pada sampel Cd-1000 dan Cd-4000 dapat dilihat bahwa distribusi Cd^{2+} telah merata, sedangkan sampel Cd-16000 menunjukkan distribusi Cd^{2+} yang signifikan daripada sampel lainnya. Hal ini dapat dilihat dari sebaran Cd^{2+} yang hampir menyeluruh di semua bagian sampel dan lebih terkonsentrasi di beberapa bagian sampel.



Gambar 3.7. Foto distribusi sebaran kation Cd^{2+} pada sampel Cd-1000, Cd-4000, dan Cd-16000 sebelum dan sesudah dilakukan leaching

E. Mikrostruktur Geopolimer dengan Variasi Penambahan Cd^{2+}

Gambar 3.8 menunjukkan foto SEM dari sampel Al-1,7 tanpa penambahan Cd^{2+} dan dengan penambahan Cd^{2+} (sampel Cd-1000, Cd-4000, dan Cd-16000). Keempat sampel tersebut menunjukkan adanya pori.



Gambar 3. 8. Foto SEM (a) Al-1,7 dan sampel (b) Cd-1000, (c) Cd-4000, dan (d) Cd-16000

Sampel-sampel tersebut juga masih memperlihatkan adanya gumpalan silika yang tidak bereaksi (ditunjukkan oleh simbol X). Mikrostruktur sampel Cd-16000 menunjukkan lebih banyak gumpalan silika yang tidak bereaksi daripada sampel Cd-4000. Hal inilah yang

menyebabkan kuat tekan pada Cd-16000 paling rendah daripada Cd-4000.

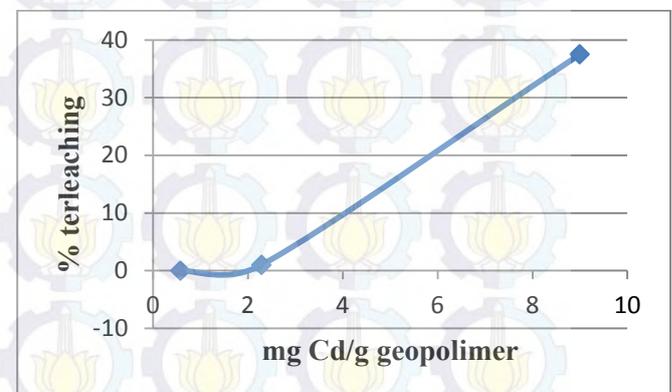
F. Leaching Kation Cd^{2+} pada Geopolimer

Uji *leaching* dalam asam asetat bertujuan untuk mengetahui kekuatan ion Cd^{2+} dalam asam. Asam asetat adalah asam organik lemah yang dapat dihasilkan di alam sebagai akibat dari pembusukan. Hasil *leaching* pada Tabel 3.3. menunjukkan bahwa pada sampel Cd-4000 dan Cd-16000 mengalami *leaching*, sedangkan sampel Cd-1000 tidak mengalami *leaching*.

Tabel 3. 3. Persentase Cd^{2+} dalam geopolimer yang ter-leaching

Nama Sampel	Kandungan Cd^{2+} (mg Cd^{2+} / 6 g geopolimer)	Cd^{2+} yang ter-leaching (mg)	% ter-leaching
Cd-1000	3,450	-	0
Cd-4000	13,737	0,023	0,167
Cd -16000	53,931	3,771	6,264

Gambar 3.9 menunjukkan hubungan antara prosentasi kandungan ion Cd^{2+} terhadap jumlah ion Cd^{2+} yang ter-leaching oleh larutan asam asetat. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa geopolimer yang ditambah Cd^{2+} sebesar 3,450 mg dalam 6 gram geopolimer tidak menunjukkan terjadinya proses *leaching*. *Leaching* Cd^{2+} mulai terlihat secara lebih jelas ketika penambahan Cd^{2+} ditingkatkan menjadi 13,737 mg dalam 6 gram geopolimer. Prosentase *leaching* Cd^{2+} semakin meningkat ketika terjadi penambahan Cd^{2+} lebih dari 3,450 mg.



Gambar 3.9. Jumlah (mg) ion Cd^{2+} dalam g geopolimer terhadap logam yang terleaching (%)

Hasil *leaching* pada sampel tersebut mengungkapkan bahwa geopolimer pada abu layang PT. IPMOMI dapat digunakan untuk mengambobilisasi ion Cd^{2+} . Sampel geopolimer Cd-1000 merupakan sampel yang terbaik untuk mengambobilisasi Cd^{2+} daripada sampel yang lainnya.

IV. KESIMPULAN

Geopolimer telah berhasil dibuat dari abu layang PT. IPMOMI. Variasi penambahan $Al(OH)_3$ mempengaruhi nilai rasio SiO_2/Al_2O_3 dan berpengaruh pada kuat tekan geopolimer. Rasio SiO_2/Al_2O_3 yang terbaik adalah 6,46 karena menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan tertinggi yaitu 25 MPa. Geopolimer dengan penambahan

ion Cd^{2+} memberikan pengaruh baik pada kuat tekan maupun mikrostrukturnya. Penambahan ion Cd^{2+} sebesar 4000 ppm (mg Cd^{2+} /kg abu layang) menghasilkan kuat tekan geopolimer tertinggi yaitu 38,6 MPa. Sampel geopolimer Cd-1000 merupakan sampel yang terbaik untuk mengamobilisasi Cd^{2+} daripada sampel yang lainnya karena tahan dalam asam. Penambahan ion Cd^{2+} lebih dari 1000 ppm menyebabkan lebih banyak ion Cd^{2+} yang ter-leaching dalam asam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] 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 materials, annual book of ASTM standards*, west Conshohocken, Pennsylvania, Vol. 04.02.
- [2] Autef, A., Joussein E., Gasgnier G., Pronier S., Sobrodas I., Sanz J. and Slvie Rossignol (2013) "Role of metakaolin dehydroxylation in geopolimer synthesis". *Powder Technology*, Vol. 250, hal. 33–39.
- [3] Bayuaji, Ridho (2013) "Teknologi Beton Geopolimer: Perkembangan dan Peluang Aplikasi Pada Elemen Struktur Pracetak", Simposium Nasional Geopolimer. Makassar.
- [4] Brundle, C. R., Jr C. A. E. dan Shaun Wilson (1992) "*Encyclopedia of Materials Characterization*", Manning Publications Co, Greenwich.
- [5] Davidovits, J. (1991) "Geopolymers: inorganic polymeric new materials". *Therm. Anal Vol 37*, hal. 1633–1656.
- [6] Davidovits, J. (1994) "Properties Of Geopolymer Cements", In *Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*. pp. 131–149.
- [7] Davidovits, J. (1988) "Geopolymer chemistry and properties". In *Proceedings of the 1st International Conference on Geopolymer Cpmpeigne, France*. pp. 22–48.
- [8] Deventer, J. S. J. V., J. L. Provis, Duxson P. dan G. C. Lukey, (2007), "Reaction Mechanisms in The Geopolymeric Conversion of Inorganic Waste To Useful Products". *Journal of Hazardous Materials*, hal. 506–513.
- [9] Duxson P., John L. Provis, Lukey G. C., Seth W. Mallicoat, Kriven W. M. dan Jannie S.J. van Deventer (2005) "Understanding the relationship between geopolimer composition, microstructure and mechanical properties". *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspect*, Vol. 269, hal. 47–58.
- [10] Jaarsveld J. G. S. V., Deventer J. S. J. V. dan Lorenzen L. (1998) "Factors affecting the immobilisation of metals in geopolimerised fly ash". *Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science*, Vol 29, hal. 283–291.
- [11] Jaarsveld J. G. S. V., J. S. J. Van Deventer dan L. Lorenzen. (1997) "The Potential Use Of Geopolymeric Materials To Immobilise Toxic Metals: Part I. Theory And Applications". *Minerals Engineering*, Vol. 10, hal. 659–669.
- [12] Jimenez A. F., A. Palomo dan D. Revuelta (2009) "Alkali Activation Of Industrial By Products To Develop New Earth-Friendly Cements". In 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technology. UK.
- [13] Khale D. dan Chaudhary R. (2006) "Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing Its Development: a Review", hal. 729–746.
- [14] Komnitsas K., Zaharaki D. and Bartzas G. (2012) "Effect of sulphate and nitrate anions on heavy metal immobilisation in ferronickel slag geopolymers", *Applied Clay Science*, hal. 1–7.
- [15] Lee, W.K.W. dan J.S.J. van Deventer (2002) "The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements", *Cement and Concrete Research* Vol. 32, hal. 577–584.
- [16] Lee W. K. W. and Deventer J. S. J. van, (2007), "Chemical interaction between siliceous aggregates and low Ca alkali-activated cements". *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, hal. 844–855.
- [17] Leofanti G. and Zecchina (1997) "Alumina-Supported Copper Chloride : 2 Effect of Aging and Thermal Treatments", hal. 307–327.
- [18] Minarikova, M., and Frantisek Skavara (2006) "Fixation of Heavy Metals in Geopolymeric Materials Based on Brown Coal Fly Ash", *Ceramics-Silikaty*, vol. 4, hal. 200–207.
- [19] Pacheco-Torgal F., Castro-Gomes J. dan Jalali S. (2008) "Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products". *Construction and Building Materials*, Vol 22, hal. 1305–1314.
- [20] Ross, A. Fletcher., MacKenzie, K., J. D. and Chaterine, L. Nicholson (2005) "The composition range of aluminosilicate geopolymers", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 25, hal. 1471–1477.
- [21] Silva, P., De, Sagoe-Crenstil. K., dan V. Sirivivatnanon (2007) "Kinetics of geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 ", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, hal. 512–518
- [22] Stiasari, A. (2011) "Amobilisasi Kation Logam Berat Cd^{2+} Pada Geopolimer dengan Variasi Konsentrasi NaOH dari Abu Layang PT.IPMOMI", Skripsi. Jurusan Kimia FMIPA ITS, Surabaya.
- [23] Terzano R., Spagnuolo M., Medici L. and Ruggiero P. (2004) "Stabilization of Cu and Cd in the presence of montmorillonite by means of coal fly ash", *Fresenius Environmental Bulletin*, Vol. 13, hal. 1–5.
- [24] Weng L., Sagoe-Crentsil K., Trevor Brown and Song S. (2005) "Effect of aluminates on the formation of geopolymers", *Materials Science & Engineering B*, Vol. 117, hal. 163–168.
- [25] Williams R. P. and Riessen A. van (2010) "Determination of the reactive component fly ashes for geopolimer production using XRF and XRD", *Fuel*, Vol. 89, hal. 3683–3692.
- [26] Xu, Hua dan van Deventer, J. S. J. (2000) "Geopolimerisation of aluminosilicate minerals", *Int J. Miner. Process*, Vol. 59, hal. 247–266.
- [27] Xu J. Z., Zhou Y. L., Chang Q. and Qu H. Q. (2006) "Study on the factors of affecting the immobilization of heavy metals in fly ash-based geopolymers", *Materials Letters* Vol. 60, hal. 820–822.
- [28] Zhang J., Provis J. L., Feng D. dan Deventer J. S. J. van (2008) "Geopolymers for immobilization of Cr^{6+} , Cd^{2+} , dan Pb^{2+} ", *Journal of Hazardous Materials* Vol. 157, hal. 587–598.
- [29] Zheng L., Wei Wang dan Yunchun Shi (2010) "The Effects of alkaline dosage and Si/Al ratio on immobilization of heavy metals in municipal solid waste incineration fly ash-based geopolimer", *Chemosphere*, Vol. 79, hal. 665–671.
- [30] Zheng L., Wei Wang, Qiao W., Shi Y. and Xiao Liu (2014) "Immobilization of Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , and Cd^{2+} during geopolymerization", *Front. Environ. Sci. Eng*, hal. 1–7.