

PEMANFAATAN ABU VULKANIK GUNUNG MERAPI SEBAGAI GEOPOLIMER (SUATU POLIMER ANORGANIK ALUMINOSILIKAT)

E. Kusumastuti ✉

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

Info Artikel

Sejarah Artikel:

Diterima 3 Januari 2012
Disetujui 19 Maret 2012
Dipublikasikan April 2012

Keywords:

Aluminosilicate inorganic polymer
Geopolymer
Merapi volcanic ash

Abstrak

Sintesis geopolimer telah dilakukan dengan memanfaatkan abu vulkanik Gunung Merapi. Geopolimer merupakan suatu polimer anorganik aluminosilikat dengan rantai Si-O-Al yang disintesis dari material yang kaya akan silika dan alumina dengan larutan pengaktif natrium hidroksida. Analisis kandungan kimia abu vulkanik Merapi menunjukkan bahwa material ini termasuk material *pozzolan* dengan kandungan silika dan alumina yang tinggi, yakni 45,7% berat SiO₂; 14,00% berat Al₂O₃; 16,1% berat CaO; 18,2% berat Fe₂O₃ dan 3,86% berat K₂O. Perbandingan mol SiO₂/Al₂O₃ dalam abu vulkanik Merapi tergolong tinggi yakni 5,55. Abu vulkanik Merapi dapat disintesis menjadi geopolimer meskipun mempunyai rasio mol SiO₂/Al₂O₃ yang tinggi dengan menggunakan larutan pengaktif NaOH 66,67% serta menambah waktu *curing* selama 3 hari pada suhu 70°C untuk membantu proses kondensasi (lepasnya molekul air) pada proses geopolimerisasinya. Geopolimerisasi abu vulkanik Merapi pada suhu kamar tidak dapat terjadi, ditandai dengan kekuatannya yang sangat rendah. Karakterisasi pada geopolimer berbahan dasar abu vulkanik menunjukkan bahwa kuat tekan optimum dicapai pada komposisi dengan perbandingan abu vulkanik/Na silikat/NaOH/H₂O sebesar 50/10/4/6 dengan kekuatan 61,16 MPa. Analisis kualitatif berupa fasa mineral dengan XRD dan ikatan kimia dengan FTIR menunjukkan bahwa telah terbentuk fasa amorf aluminosilikat geopolimer dengan ikatan Si-O-Si atau Si-O-Al.

Abstract

Synthesis of geopolimer has been done by using Merapi volcanic ash. Geopolymer is an aluminosilicate inorganic polymer with Si-O-Al chain that has been synthesized from silica-and alumina-rich materials by using activator solution natrium hydroxide. The analysis of Merapi volcanic ash content showed that it was a pozzolan material containing high-silica alumina, with 45,7% of SiO₂; 14,00% of Al₂O₃; 16,1% of CaO; 18,2% of Fe₂O₃ and 3,86% of K₂O. Mol ratio of SiO₂/Al₂O₃ was high, it is 5,55. Although it has high ratio of mol SiO₂/Al₂O₃, Merapi volcanic ash can be synthesized by using activator solution NaOH 66,67% by lengthening curing time in 3 days at 70°C to help condensation process (loss of water molecule) in its geopolimer process. Geopolymer of Merapi volcanic ash in the room temperature cannot occur because it has low strength. The characterization of geopolimer from Merapi volcanic ash showed that optimum compressive strength can be reached in the composition ratio of volcanic ash/Na silicate/ NaOH/H₂O of 50/10/4/6 with strength 61,16 MPa. Qualitative analysis of mineral phase of XRD and chemical bond with FTIR showed that amorphous phase of aluminosilicate has been formed with Si-O-Si or Si-O-Al chain.

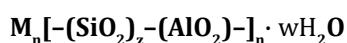
© 2012 Universitas Negeri Semarang

Pendahuluan

Letusan Gunung Merapi memberikan dampak positif maupun negatif terhadap masyarakat sekitarnya. Salah satu dampak negatif yakni abu vulkanik yang dikeluarkannya. Pada awal bulan November 2010 Merapi kembali meletus. Abu vulkanik Merapi menyebabkan ratusan warga yang menghirupnya menderita ISPA (Bernas Jogja. 2010) sehingga diperlukan upaya penanganan abu vulkanik secara serius baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

Dilihat dari sejarah geologi, abu vulkanik mengandung komponen utama silika dan alumina. Balai Teknik Kesehatan Lingkungan (BTKL) Yogyakarta pada tahun 1994 telah meneliti kandungan abu vulkanik Merapi ternyata mengandung silikon dioksida (SiO_2) 54,56%, aluminium oksida (Al_2O_3) 18,37%, ferri oksida (Fe_2O_3) 18,59%, dan kalsium oksida (CaO) 8,33% (Sudaryo & Sutjipto 2009). Abu vulkanik dikatakan bersifat *pozzolan*, yakni suatu material dengan kandungan utama silika dan alumina tinggi yang dapat bereaksi dengan kapur (*lime*) pada suhu rendah (suhu kamar) dan dengan kehadiran air untuk menghasilkan suatu hidrat yang mempunyai sifat mengikat (*binding*) atau sementasi (Adamiec *et al.* 2008).

Geopolimer merupakan suatu material berupa polimer anorganik aluminosilikat dengan rantai Si-O-Al yang disintesis dari material *pozzolan* yang kaya akan silika dan alumina dengan larutan pengaktif natrium hidroksida dan bahan pengikat Na silikat (Davidovits 1991). Untuk menggambarkan struktur geopolimer, Davidovits (1991) menggunakan istilah *poli(sialat)*. Monomer *sialat* menunjukkan SiO_4 dan AlO_4 tetrahedra yang bergabung dengan oksigen sebagai jembatan. Formula empiris *poli(sialat)* adalah sebagai berikut.



Dengan harga z antara 1–3, M adalah kation monovalen seperti Na^+ atau K^+ , dan n adalah derajat polimerisasi. Untuk $z = 1, 2$ atau 3 Davidovits memberikan nama berturut-turut *poli(sialat)* ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-$), *poli(sialat-siloxo)* ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$) dan *poli(sialat-disiloxo)* ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$) (Gambar 1). Istilah *siloxo* mewakili SiO_4 tetrahedra yang ditambahkan pada rantai untuk meningkatkan kandungan silikon. Karena Al^{3+} berada dalam koordinasi empat, maka harus ada kation yang hadir untuk menyeimbangkan muatan negatif. Kation

tersebut dapat berupa logam alkali atau alkali tanah seperti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} .

Pada awal perkembangannya, geopolimer disintesis dari material-material seperti kaolinit, lempung, metakaolinit dan mineral-mineral aluminosilikat murni sebagai prekursor (Xu & van Deventer 2000). Prekursor geopolimer kemudian lebih dikembangkan lagi dengan memanfaatkan limbah abu layang dan endapan yang menjadi kerak pada tungku pembakaran batubara (*blast furnace slag*). Reaktivitas material sebagai prekursor sangat menentukan kecepatan proses aktivasi dalam geopolimerisasi (Rowles 2004). Material-material yang terkalsinasi seperti abu layang dan metakaolin yang sebagian besar bersifat amorf, menunjukkan reaktivitas yang lebih tinggi selama geopolimerisasi dibandingkan dengan material yang tidak terkalsinasi (Palomo *et al.* 1999; Xu & van Deventer 2000).

Geopolimer telah dimanfaatkan dalam berbagai bidang antara lain sebagai bahan bangunan, komposit dan refraktori, insulator dan untuk penanganan limbah beracun (Phair 2003). Pada awal perkembangannya, geopolimer disintesis dari material-material seperti kaolinit, lempung, metakaolinit dan mineral-mineral aluminosilikat murni sebagai prekursor (Xu & van Deventer 2000), kemudian dikembangkan geopolimer dengan bahan dasar limbah industri seperti abu layang yang bersifat *pozzolan* (van Deventer *et al.* 2007).

Salah satu parameter penting dalam komposisi bahan awal adalah kuantitas senyawa-senyawa penting yang terlibat dalam pembentukan rantai geopolimer. Senyawa SiO_2 dan Al_2O_3 yang merupakan oksida utama disamping oksida-oksida lain, sangat berperan penting dalam pembentukan rantai polimer Si-O-Al. Dalam geopolimerisasi terjadi aktivasi oleh larutan alkali pada material yang kaya akan SiO_2 dan Al_2O_3 dengan mekanisme yang melibatkan pelarutan Si dan Al, transportasi (orientasi) spesies terlarut dan diikuti oleh polikondensasi membentuk aluminosilikat berstruktur tiga dimensi. Oleh karena itu komposisi bahan awal (perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) akan menghasilkan rantai polimer dengan tipe dan karakter yang berbeda pada produk geopolimer yang dihasilkan (Davidovits 1994).

Dari analisis kandungan kimia abu vulkanik Merapi tahun 1994 yang dilakukan oleh BTKL Yogyakarta (Sudaryo & Sutjipto 2009), ternyata abu vulkanik Merapi mempunyai kemiripan dengan komposisi kimia abu layang batubara (*fly ash*) dari berbagai PLTU

dan industri semen yang diteliti oleh Rizain (2008). Abu layang yang dihasilkan dari sisa pembakaran batubara PLTU dan industri semen ini merupakan material *pozzolan* buatan sedangkan abu vulkanik merupakan material *pozzolan* alami. Abu layang sendiri telah banyak diteliti, salah satunya dimanfaatkan sebagai bahan dasar dalam pembuatan geopolimer (Kusumastuti 2009). Dengan melihat kesamaan antara abu layang dan abu vulkanik serta sifat *pozzolannya*, maka diharapkan abu vulkanik dapat juga dimanfaatkan untuk bahan dasar sintesis geopolimer. Dengan demikian sekaligus diperoleh cara penanganan abu vulkanik yang terakumulasi di sekitar daerah Gunung Merapi sehingga dampak buruk abu vulkanik dapat dicegah, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

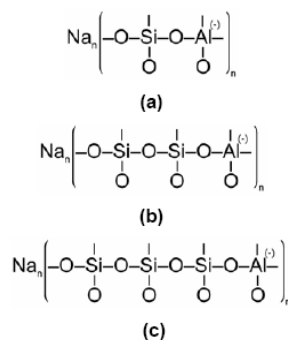
Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kandungan kimia abu vulkanik Gunung Merapi yang meletus pada bulan November 2010, mensintesis geopolimer dari bahan dasar abu vulkanik, serta menganalisis karakter (mengkarakterisasi) geopolimer berbahan dasar abu vulkanik yang telah dihasilkan. Penelitian yang akan dilakukan ini diharapkan memberi kontribusi dalam pengembangan material anorganik, khususnya dalam bidang polimer anorganik dengan memanfaatkan abu vulkanik Gunung Merapi. Dengan mensintesis abu vulkanik gunung berapi menjadi geopolimer akan memberikan sumbangan cara untuk menangani abu vulkanik di daerah bencana gunung berapi sehingga efek buruk yang ditimbulkannya terhadap masyarakat sekitarnya dapat dicegah.

Metode

Hal yang pertama dilakukan dalam penelitian ini adalah menganalisis karakter sampel abu vulkanik Merapi. Abu vulkanik yang

diambil dari daerah Sleman Yogyakarta dianalisis sifat kimianya dengan XRF (*X-Ray Fluorescence*) dan analisis fasa mineral dengan XRD (*X-Ray Diffraction*). Na silikat (Na_2SiO_3) yang digunakan juga perlu diketahui komposisi awalnya, yakni dengan menggunakan metode XRF.

Sintesis geopolimer dilakukan dengan cara mencampurkan abu vulkanik dengan larutan pengaktif (NaOH dan H_2O). Pencampuran dilakukan dengan menggunakan tangan selama 2 menit kemudian dengan *mixer* selama 5 menit sampai benar-benar homogen (Xu & van Deventer 2000; van Jaarsveld *et al.* 2003). Campuran ini dituang dalam cetakan silinder plastik dengan diameter 1,5 cm dan tinggi 3 cm (perbandingan diameter dan tinggi silinder 1: 2) (Bakharev 2005a; Andini *et al.* 2008). Penuangan dilakukan secara bertahap dan divibrasi selama 15 menit agar lebih padat dan untuk mengurangi gelembung udara (Duxson *et al.* 2005). Hasil pencetakan ini disebut pelet benda uji atau monolit. Pelet benda uji didiamkan pada suhu ruang selama minimal 1 jam sampai dapat dilepaskan dari cetakannya (Chindaprasirt *et al.* 2007). Pelet yang sudah dapat dilepaskan dari cetakan ditata ke dalam loyang dan ditutup dengan plastik untuk mencegah penguapan air secara tiba-tiba yang dapat menyebabkan benda uji menjadi retak-retak (De Silva *et al.* 2007). Dalam penelitian ini dilakukan empat deret variasi, berturut-turut memvariasi jumlah abu vulkanik, jumlah Na Silikat, jumlah NaOH baru kemudian terakhir dengan memvariasi jumlah H_2O . Produk geopolimer yang terbentuk dikarakterisasi sifat-sifatnya berupa kuat tekan dengan menggunakan mesin pengujian kuat, kandungan fasa mineral dengan XRD (merk Philips tipe X'Pert MPD dilengkapi dengan data base *Software Expert Graphic and Identify*) dan ikatan kimia dengan menggunakan FTIR (merk Shimadzu 8201 PC).



Gambar 1. Jenis-jenis *poli(sialat)* geopolimer, (a) PS: *Poli(sialat)*, (b) PSS: *Poli(sialat-silikso)*, (c) PSDS: *Poli(sialat-disilikso)* (Davidovits 1991)

Hasil dan Pembahasan

Sampel abu vulkanik diperoleh dari daerah Sleman Yogyakarta. Sebelum digunakan dalam sintesis geopolimer, abu vulkanik dijemur di bawah terik matahari selama 2 hari agar kering, lalu diayak dengan saringan 100 mesh untuk menghilangkan kotoran (pasir atau kerikil) yang mungkin ada saat proses pengambilan. Abu vulkanik kemudian dioven pada suhu 105°C selama 24 jam untuk menghilangkan kelebihan kadar air, kemudian didinginkan pada suhu kamar dan siap untuk dikarakterisasi.

Tabel 1. Komposisi kimia abu vulkanik merapi

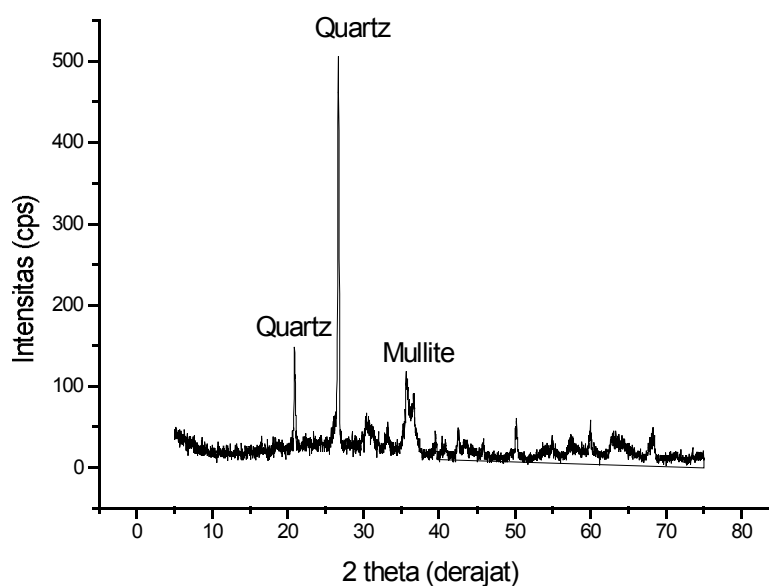
Kandungan Oksida Abu Vulkanik	Jumlah (%)
SiO ₂	45,70
Al ₂ O ₃	14,00
K ₂ O	3,86
CaO	16,10
Fe ₂ O ₃	18,20
TiO ₂	1,40
V ₂ O ₅	0,07
MnO	0,47
CuO	0,05
BaO	0,24

Karakterisasi abu vulkanik yang meliputi analisis kandungan bahan kimia dan kandungan fasa mineral penting dilakukan karena sifat fisik dan kimia abu vulkanik sangat berpengaruh pada proses sintesis maupun sifat geopolimer yang dihasilkan. Kandungan kimia abu vulkanik dapat diketahui dengan menggunakan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*) dan komponen fasa mineral dapat diketahui dengan metode XRD (*X-Ray Diffraction*).

Secara fisik, kenampakan abu vulkanik Merapi berupa serbuk sangat halus dengan warna abu-abu (seperti warna semen). Hasil analisis komposisi kimia abu vulkanik Merapi dengan metode XRF (Tabel 1) menyatakan bahwa abu ini mengandung komponen yang heterogen dengan komponen utama (mayor) yakni 45,7% berat SiO₂; 14,00% berat Al₂O₃; 16,1% berat CaO; 18,2% berat Fe₂O₃ dan 3,86% berat K₂O. Hasil analisis kandungan abu vulkanik ini menunjukkan bahwa material ini termasuk material *pozzolan* yakni mempunyai kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ yang tinggi.

Analisis kandungan fasa mineral pada abu vulkanik dengan menggunakan metode XRD menunjukkan bahwa abu vulkanik merupakan material amorf dengan kandungan utama mineral *quartz* dan *mullite* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Informasi kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ pada abu vulkanik diperlukan karena pembentukan rantai Si-O-Al pada geopolimer sangat ditentukan oleh rasio SiO₂/Al₂O₃ bahan awal.



Gambar 2. Difraktogram abu vulkanik merapi

Tabel 2. Konversi berat ke jumlah mol komponen dalam tiap 1 gram abu vulkanik

Komponen Abu Vulkanik	Berat Komponen dalam Tiap 1 Gram Abu Vulkanik (gram)	Jumlah Mol Komponen dalam Tiap 1 Gram Abu Vulkanik (mol)
SiO ₂ (45,70%)	0,46	0,007617
Al ₂ O ₃ (14,00%)	0,14	0,001373
CaO (16,10%)	0,16	0,002875
Fe ₂ O ₃ (18,20%)	0,18	0,001138
K ₂ O (3,86%)	0,04	0,000515

Tabel 3. Komposisi kimia dalam tiap gram natrium silikat

Komponen Na ₂ SiO ₃	Persen Berat (%)	Banyak Mol dalam Tiap Gram (mol)
Na ₂ O	3,00	0,04000
Al ₂ O ₃	0,60	0,00006
SiO ₂	86,40	1,44000
CaO	2,40	0,04286
Komponen Minor Lain	7,60	-

Tabel 4. Data hasil pengukuran kuat tekan pada produk geopolimer dengan variasi berat abu vulkanik yang ditambahkan

Abu Vulkanik (g)	Na Silikat (g)	NaOH (g)	H ₂ O (g)	Mol SiO ₂ /Al ₂ O ₃	S/L	Kuat Tekan (MPa)
30	10	4	8	8,91	1,36	0,00
40	10	4	8	8,08	1,82	3,89
50	10	4	8	7,58	2,27	26,16
60	10	4	8	7,24	2,73	0,00
70	10	4	8	7,00	3,18	0,00

Selain itu rasio SiO₂/Al₂O₃ dalam abu vulkanik akan mempengaruhi kondisi yang diperlukan untuk pembentukan geopolimer. Rasio berat SiO₂/Al₂O₃ dalam abu vulkanik Merapi adalah 3,26 atau bila dikonversi ke dalam rasio mol SiO₂/Al₂O₃ sebesar 5,55. Hasil konversi dari komposisi persen berat menjadi komposisi mol tiap gram abu vulkanik ditampilkan pada Tabel 2.

Binder yang dikenal juga dengan sebutan *alkali activator* yang digunakan dalam geopolimerisasi adalah natrium silikat atau Na₂SiO₃. Penambahan natrium silikat ini bertujuan untuk memperbesar spesies Si yang terlarut sehingga akan terdapat cukup silikat oligomerik yang memperpanjang struktur

rantainya. Analisis komposisi Na₂SiO₃ yang digunakan pada penelitian ini dilakukan dengan metode XRF dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4.3. Komposisi kimia dalam persen berat dan mol dalam tiap gram natrium silikat ditampilkan pada Tabel 3.

Larutan pengaktif dibuat dengan melarutkan NaOH pelet ke dalam akuades. NaOH pelet yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kemurnian 99% dan setiap gram NaOH (Mr = 40 gram/mol) akan menyumbangkan 0,025 mol spesies Na⁺ dan 0,025 mol spesies OH⁻.

Pada sintesis yang dilakukan, geopolimer disiapkan dari bahan awal berupa abu vulkanik, natrium silikat, NaOH dan air. Ada beberapa

Tabel 5. Data hasil pengukuran kuat tekan pada produk geopolimer dengan variasi berat Na silikat

Abu Vulkanik (g)	Na Silikat (g)	NaOH (g)	H ₂ O (g)	Mol SiO ₂ /Al ₂ O ₃	S/L	Kuat Tekan (MPa)
50	6	4	8	6,77	2,78	9,55
50	8	4	8	7,18	2,50	20,86
50	10	4	8	7,58	2,27	26,16
50	12	4	8	7,98	2,08	6,72

Tabel 6. Data hasil pengukuran kuat tekan pada produk geopolimer dengan variasi jumlah NaOH

Abu Vulkanik (g)	Na Silikat (g)	NaOH (g)	H ₂ O (g)	Mol SiO ₂ /Al ₂ O ₃	S/L	Kuat Tekan (MPa)
50	10	3	8	7,58	2,38	11,67
50	10	4	8	7,58	2,27	26,16
50	10	5	8	7,58	2,17	35,71
50	10	6	8	7,58	2,08	7,42
50	10	7	8	7,58	2,00	1,06

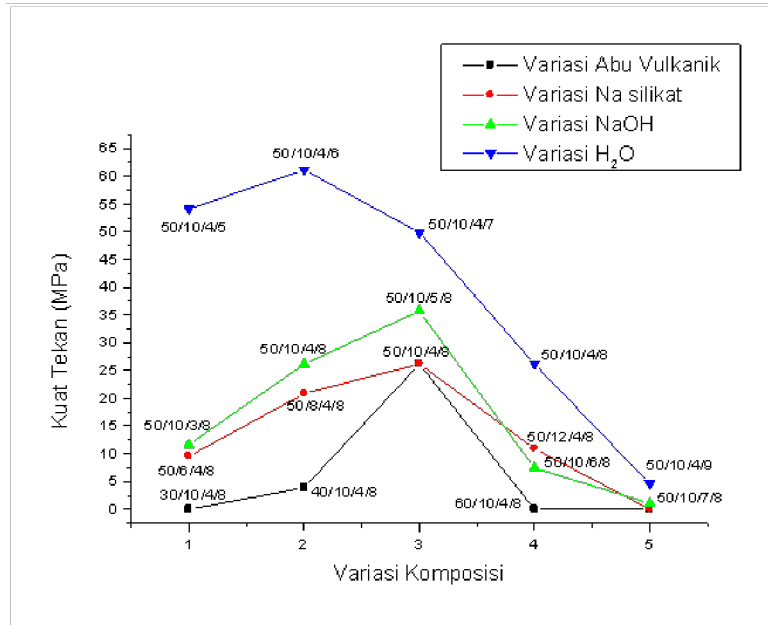
Tabel 7. Data hasil pengukuran kuat tekan pada produk geopolimer dengan variasi jumlah H₂O

Abu Vulkanik (g)	Na Silikat (g)	NaOH (g)	H ₂ O (g)	Mol SiO ₂ /Al ₂ O ₃	S/L	Kuat Tekan (MPa)
50	10	4	5	7,58	2,63	54,09
50	10	4	6	7,58	2,50	61,16
50	10	4	7	7,58	2,38	49,85
50	10	4	8	7,58	2,27	26,16
50	10	4	9	7,58	2,17	4,60

parameter penting yang harus diperhatikan dalam sintesis geopolimer, antara komposisi bahan awal, rasio *solid/liquid* (S/L), rasio SiO₂/Al₂O₃, dan konsentrasi larutan pengaktif (rasio NaOH/H₂O). Parameter-parameter tersebut saling berhubungan satu sama lain dan tidak dapat dipisahkan antara satu dengan lainnya. Komposisi bahan awal akan mempengaruhi kekentalan dan rasio *solid/liquid* (S/L), juga akan mempengaruhi rasio SiO₂/Al₂O₃ karena SiO₂ dan Al₂O₃ berasal dari abu vulkanik dan natrium silikat. Rasio SiO₂/Al₂O₃ juga akan mempengaruhi bahan pengaktif yang dibutuhkan, karena jumlah atau konsentrasi larutan pengaktif akan mempengaruhi seberapa besar SiO₂ dan Al₂O₃ yang dapat larut untuk membentuk monomer-

monomer aktif, sehingga reaksi polimerisasi dapat berjalan.

Mengingat keempat komponen bahan awal dalam sintesis geopolimer ini saling terkait, maka pada penelitian ini dibuatlah 4 macam variasi bertahap. Variasi pertama dilakukan dengan memvariasi jumlah abu vulkanik sehingga didapatkan pula variasi rasio SiO₂/Al₂O₃ dan variasi S/L secara bersamaan (Tabel 4). Variasi kedua dilakukan dengan memvariasi jumlah Na Silikat sehingga didapatkan variasi SiO₂/Al₂O₃ dan juga variasi S/L (Tabel 5). Variasi ketiga dilakukan dengan memvariasi jumlah NaOH yang ditambahkan sehingga didapatkan variasi S/L (Tabel 6). Variasi keempat dilakukan dengan memvariasi jumlah H₂O yang ditambahkan



Gambar 3. Grafik kuat tekan pada berbagai variasi komposisi

(Tabel 7). Dari berbagai variasi tersebut diharapkan diperoleh komposisi optimum untuk menghasilkan geopolimer dengan kekuatan optimum.

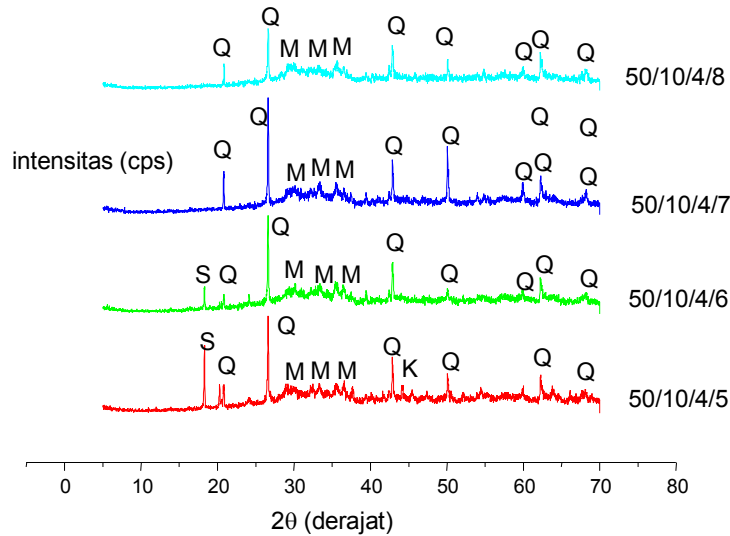
Pada penelitian ini terdapat perbedaan dalam sintesis geopolimer dari abu vulkanik dengan sintesis geopolimer dari abu layang yang sudah diteliti sebelumnya. Pada sintesis geopolimer abu layang (Kusumastuti 2009), pelet/ benda uji sangat cepat mengeras, yakni 15-60 menit sudah bisa dilepaskan dari cetaknya dan hanya perlu dicuring selama 24 jam pada suhu 60°C. Pada sintesis geopolimer dari abu vulkanik ini, pelet/ benda uji sangat lama dalam pengerasan, bahkan memerlukan waktu curing selama 3 hari (3 x 24 jam) pada suhu 70°C. Hal ini disebabkan karena rasio bahan awal abu vulkanik sendiri memiliki kadar Si dan Al yang sangat tinggi (rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sebesar 5,55) sehingga memerlukan larutan pengaktif yang cukup tinggi pula konsentrasinya (perbandingan berat $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}$ sebesar 66,67%) sehingga mampu mengaktifkan monomer-monomer SiO_4 dan AlO_4 dalam abu vulkanik. Selain itu kandungan CaO pada abu vulkanik relatif lebih kecil (CaO hanya 16,10%) bila dibandingkan dengan abu layang yang sudah diteliti sebelumnya (CaO sebesar 21,40%). Kandungan CaO dalam bahan awal pembuatan geopolimer ini sangat mempengaruhi waktu pengerasan geopolimer yang dihasilkan, dimana semakin tinggi CaO akan semakin cepat waktu pengerasan, namun kelebihan CaO juga dapat

menyebabkan geopolimer menjadi rapuh dan kurang kuat (Kusumastuti 2009).

Pengukuran kekuatan akhir pada produk geopolimer dilakukan setelah pelet/benda uji berumur 28 hari mengikat pada umur tersebut perkembangan kekuatan geopolimer sudah optimum. Hasil pengukuran kuat tekan disajikan pada Tabel 4 sampai dengan Tabel 7 dan digabungkan pada Gambar 3.

Pada variasi yang pertama (Tabel 4) dilakukan variasi jumlah abu vulkanik yang digunakan, dimana variasi ini sangat dipengaruhi oleh kekentalan pasta atau rasio *Solid/Liquid* (S/L). Hasil perhitungan secara teoritis juga menunjukkan adanya variasi rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Kekentalan pasta optimum pada rasio S/L=2,27 (komposisi 50/10/4/8 dengan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=7,58$) dengan kekuatan akhir sebesar 26,16 MPa, dimana pada komposisi S/L kurang dari 2,27 kekuatan benda uji sangat rendah dan pada komposisi lebih besar dari 2,27 pasta geopolimer sangat kental sehingga sulit untuk dicetak, sehingga produk geopolimer tidak dapat dihasilkan.

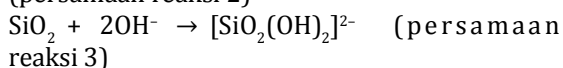
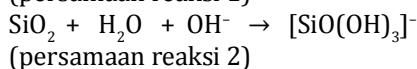
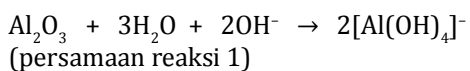
Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran kuat tekan pada geopolimer dengan variasi berat Na Silikat. Komposisi dengan rasio abu vulkanik/Na Silikat/ $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}$ sebesar 50/10/4/8 dengan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=7,58$ juga mencapai kekuatan optimum (kuat tekan 26,16 MPa). Pada komposisi ini, penambahan Na Silikat yang rendah (dalam penelitian ini kurang dari 10 gram dalam tiap set komposisinya) menyebabkan kekuatan rendah



Gambar 4. Difraktogram geopolimer dengan variasi konsentrasi NaOH. Q=quartz (SiO_2), M=mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), Ma=magnetite (FeFe_2O_4), S= sodalite ($\text{Al}_6\text{Na}_8(\text{SiO}_4)_6(\text{Cl})_2$), K=kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

karena jumlah Si terlarut sebagai monomer SiO_4 lebih sedikit, sedangkan pada penambahan Na Silikat yang besar (lebih dari 10 gram) akan memperkecil kekuatan juga, karena adanya kelebihan spesies Si terlarut atau monomer SiO_4 lebih banyak sedangkan monomer AlO_4 dalam jumlah yang terbatas sehingga geopolimer yang dihasilkan lama mengeras dan teksturnya lebih lengket.

Pada variasi ketiga (Tabel 6) dilakukan variasi penambahan berat NaOH, dimana ternyata komposisi 50/10/4/8 tidak lagi optimum. Kekuatan paling tinggi dicapai sebesar 35,71 MPa pada komposisi 50/10/5/8 yakni dengan $S/L=2,17$ dan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=7,58$. Larutan NaOH digunakan sebagai sebagai larutan pengaktif yang berfungsi untuk melarutkan Si dan Al sehingga dihasilkan cukup monomer SiO_4 dan AlO_4 untuk terjadinya proses geopolimerisasi. Pelarutan silika dan alumina dari permukaan abu vulkanik dituliskan pada persamaan reaksi 1, 2 dan 3 berikut ini (De Silva *et al.* 2007).



Kehadiran $[\text{SiO}_2(\text{OH})_2]^{2-}$ (persamaan reaksi 3) lebih disukai pada kondisi yang sangat basa ($\text{pH} > 12$), sedangkan kehadiran $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ (persamaan reaksi 2) cenderung terjadi pada pH

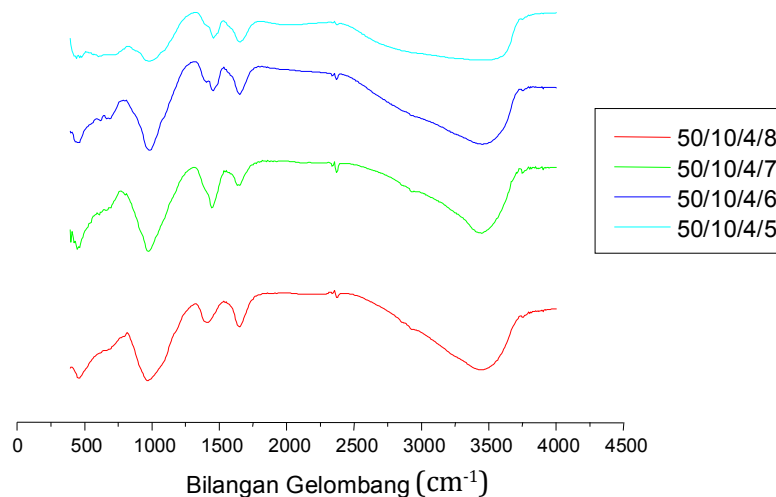
yang lebih rendah ($\text{pH}=10-12$) (Panias & Krestou 2007). Dapat dipahami bahwa perbandingan abu vulkanik dan Na Silikat sebesar 50/10 ternyata membutuhkan larutan NaOH dengan konsentrasi lebih tinggi dari komposisi optimum sebelumnya (perbandingan NaOH dan air optimum adalah 5/8 atau 0,625) untuk melarutkan Si dan Al di dalamnya secara optimal. Sebaliknya konsentrasi NaOH yang terlalu tinggi akan menyebabkan rendahnya kekuatan geopolimer karena kelebihan spesies Na^+ akan membentuk mineral Sodalit ($\text{Al}_6\text{Na}_8(\text{SiO}_4)_6(\text{Cl})_2$) yang rapuh (Kusumastuti 2009).

Pada variasi keempat (Tabel 7) dilakukan variasi penambahan jumlah air. Komposisi 50/10/4/6 mencapai kekuatan optimum sebesar 61,16 MPa. Komposisi ini mempunyai $S/L=2,50$ dan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=7,58$, dimana konsentrasi optimum untuk NaOH dan air adalah 4/6 atau 0,666 lebih besar dari konsentrasi NaOH pada komposisi optimum yang diperoleh pada variasi ketiga yang dilakukan sebelumnya (Tabel 6) sebesar 5/8 atau 0,625 dan dengan komposisi ini menunjukkan peningkatan kekuatan secara signifikan dari 35,71 MPa menjadi 61,16 MPa.

Gambar 3 menunjukkan grafik kuat tekan pada berbagai variasi komposisi dari variasi yang pertama hingga variasi yang keempat. Variasi keempat yakni variasi penambahan jumlah air ternyata memberikan kekuatan yang relatif lebih tinggi dari variasi yang lain. Komposisi abu vulkanik/Na Silikat/NaOH/ H_2O sebesar 50/10/4/6 dengan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sebesar 7,58 mencapai kekuatan yang paling tinggi yakni

Tabel 8. Komposisi sampel yang dianalisis dengan XRD dan FTIR

Abu Vulkanik (g)	Na Silikat (g)	NaOH (g)	H ₂ O (g)	S/L	Perbandingan NaOH : H ₂ O	Kekuatan (MPa)
50	10	4	8	2,27	0,50	26,16
50	10	4	7	2,38	0,57	49,85
50	10	4	6	2,50	0,67	61,16
50	10	4	5	2,63	0,80	54,09

**Gambar 5.** Spektra FTIR geopolimer abu vulkanik

sebesar 61,16 MPa.

Analisis kandungan fasa mineral pada produk geopolimer dilakukan dengan metode XRD (*X-ray Diffraction*), dan difraktogramnya ditunjukkan pada Gambar 4. Pola difraksi yang diperoleh menggambarkan keberadaan fasa kristal dan atau fasa amorf. Keberadaan fasa kristal dapat dilihat dari adanya puncak-puncak difraksi yang tajam, sedangkan material amorf memberikan pola difraksi berbentuk punuk (*gundukan/hump*) atau intensitas latar (*background*) yang tidak teratur (Pratapa 2006).

Analisis kandungan mineral ini dilakukan pada produk yang mempunyai kekuatan optimum. Dari hasil pengukuran kuat tekan, kekuatan optimum dicapai pada Si/Al=7,58, dan pada Si/Al yang sama maka diperlukan optimasi dalam konsentrasi NaOH. Diperoleh fakta bahwa pada variasi konsentrasi NaOH diperoleh kekuatan optimum pada pada komposisi 50/10/4/6. Analisis kandungan mineral dilakukan pada variasi konsentrasi NaOH seperti ditunjukkan pada Tabel 8 dengan hasil ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada Gambar 4 dapat dijelaskan bahwa produk geopolimer mempunyai kandungan

mineral berupa *quartz* (SiO₂), *mullite* (3Al₂O₃·2SiO₂), *magnetite* (FeFe₂O₄), dan *sodalite* (Al₆Na₈(SiO₄)₆(Cl)₂). Difraktogram geopolimer menunjukkan pembentukan material amorf ditandai adanya *hump* pada sudut 2q (2 theta) antara kira-kira pada 27-35 derajat.

Dari Tabel 8 terlihat bahwa semakin besar konsentrasi larutan pengaktif NaOH, semakin bertambah kekuatannya, namun akan turun pada saat larutan NaOH terlalu pekat (komposisi 50/10/4/5 dengan perbandingan NaOH:H₂O 0,800). Hal ini dapat dijelaskan melalui Gambar 3 dimana pada komposisi tersebut terdapat kristal mineral *sodalit* (Al₆Na₈(SiO₄)₆(Cl)₂) dengan intensitas yang cukup tinggi. Hal ini menyebabkan geopolimer rapuh, sehingga kekuatannya menjadi lebih rendah (Kusumastuti 2009). Sedangkan semakin besar konsentrasi NaOH (perbandingan NaOH:H₂O semakin besar) akan semakin aktif dalam melarutkan Si dan Al dalam bahan awal, sehingga pembentukan monomer-monomer semakin sempurna untuk melakukan geopolimerisasi. Hal ini terlihat pada komposisi 50/10/8/8 sampai 50/10/4/6 yang kekuatannya bertambah dan ini ditunjukkan dengan adanya fasa amorf (*hump* pada 2q antara

kira-kira 27-35 derajat) yang semakin besar seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

Metode spektroskopi FTIR digunakan untuk menentukan secara kualitatif adanya ikatan Si-O-Al pada produk geopolimer yakni berupa vibrasi molekul sebagai akibat interaksi dengan gelombang elektromagnet infra merah pada bilangan gelombang 400-4000 cm^{-1} . Dalam studi ini, perhatian difokuskan pada puncak-puncak pita vibrasi yang khas dan utama pada geopolimer, yakni pembentukan ikatan Si-O-Si atau Si-O-Al pada daerah 400-1200 cm^{-1} . Puncak-puncak pada 950-1200 cm^{-1} merupakan pita vibrasi ulur asimetri (*asymmetric stretching vibration*) Si-O-Si atau Si-O-Al. Puncak pada daerah sekitar 3400 cm^{-1} dan 1600 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi ulur -OH dan vibrasi tekuk H-O-H dari molekul air.

Analisis ini dilakukan pada sampel dengan komposisi seperti pada Tabel 8 dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5. Dari gambar tersebut terlihat bahwa ikatan Si-O-Si atau Si-O-Al telah terbentuk ditandai dengan adanya pita vibrasi ulur asimetri (*asymmetric stretching vibration*) Si-O-Si atau Si-O-Al pada sekitar 1000 cm^{-1} , sedangkan puncak-puncak pada 430-460 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi tekuk (*bending*) Si-O-Si atau O-Si-O. Pada masing-masing komposisi tidak terlihat perbedaan yang signifikan pada puncak-puncak tersebut. Pada komposisi 50/10/4/8 terlihat pita yang sangat tajam bila dibandingkan dengan komposisi yang lain, yakni pada sekitar 3500 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur -OH dari molekul air, karena komposisi ini memiliki perbandingan NaOH dan air yang paling kecil atau dapat dikatakan mempunyai kandungan air yang paling besar. Sedangkan pada komposisi 50/10/4/5 pita pada 3500 cm^{-1} tampak melebar dan tidak tajam karena memiliki kandungan air yang paling sedikit. Pada komposisi ini pita pada 1000 cm^{-1} juga tampak tidak tajam dan vibrasi Si-O-Si atau Si-O-Al yang lemah.

Penutup

Analisis kandungan kimia abu vulkanik Merapi menunjukkan bahwa material ini termasuk material *pozzolan*, dengan kandungan silika dan alumina yang tinggi, yakni 45,7% berat SiO_2 ; 14,00% berat Al_2O_3 ; 16,1% berat CaO; 18,2% berat Fe_2O_3 dan 3,86% berat K_2O . Perbandingan mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam abu vulkanik Merapi sendiri cukup tinggi yakni 5,55.

Abu vulkanik Merapi tetap dapat disintesis menjadi geopolimer meskipun mempunyai

rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang tinggi, dengan cara mempertinggi konsentrasi larutan pengaktif NaOH (perbandingan berat NaOH/ H_2O sebesar 0,666 atau 66,67%) serta menambah waktu *curing* selama 3 hari pada suhu 70°C untuk membantu proses kondensasi (lepasnya molekul air) pada geopolimerisasinya. Geopolimerisasi abu vulkanik Merapi pada suhu kamar tidak dapat terjadi, ditandai kekuatannya yang sangat rendah.

Karakterisasi pada geopolimer berbahan dasar abu vulkanik menunjukkan bahwa kuat tekan optimum dicapai pada komposisi dengan perbandingan abu vulkanik/Na silikat/NaOH/ H_2O sebesar 50/10/4/6 dengan kekuatan 61,16 MPa. Analisis kualitatif berupa fasa mineral dengan XRD dan ikatan kimia dengan FTIR menunjukkan bahwa telah terbentuk fasa amorf aluminosilikat geopolimer dengan ikatan Si-O-Si atau Si-O-Al juga sudah terbentuk.

Daftar Pustaka

- Adamiec P, Benezet JC, & Benhassaine A. 2008. Pozzolanic reactivity of silico-aluminous fly ash. *Particuology* 6: 93-98.
- Andini S, Cioffi F, Colangelo T, Grieco T, Montagnaro F, & Santoro L. 2008. Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. *Waste Manage* 28: 416-423.
- Bakharev T. 2005a. Geopolymeric materials prepared using class f fly ash and elevated temperature curing. *Cem Concr Res* 35: 1224-1232.
- Bakharev T. 2005b. Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cem Concr Res* 35: 1233-1246.
- Bernas Jogja. 1 November 2010. *Terserang ISPA Tiga Korban Abu Vulkanik Opname*. hal. 3.
- Chindaprasirt P, Chareerat T, & Sirivivatnanon V. 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cem Concr Compos* 29: 224-229.
- Davidovits J. 1991. Geopolymer: inorganic polymeric new materials. *J Therm Anal* 3: 1633-1656.
- Davidovits J. 1994. Geopolymers: man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement. *J Mater Edu* 16 (2&3): 91-139.
- De Silva P, Sagoe-Crenstil K, & Sirivivatnanon V. 2007. Kinetics of geopolymerization: role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cem Concr Res* 37: 512-518.
- Duxson P, Provis JL, Mallicoat SW, Lukey GC, Kriven WM, & van Deventer JSJ. 2005. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids Surf* 269: 47-58.
- Hardjito D, Wallah SE, Sumajouw MJ, Rangan BV. 2004. Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. *Dimensi Teknik Sipil* 6 (2): 88-93.

- Komnitsas K & Zaharaki D. 2007. Geopolimerisation: a review and prospects for the minerals industry. *Miner Eng* 20: 1261-1277.
- Kusumastuti E. 2009. *Geopolimer Abu Layang Batubara: Studi Rasio Mol SiO₂/Al₂O₃ Dan Sifat-Sifat Geopolimer yang Dihasilkan*. Tesis tidak diterbitkan. Surabaya: Program Magister FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Nandi. 2006. *Geologi Lingkungan: Vulkanisme*. Bahan Ajar tidak diterbitkan. Bandung: Jurusan Pendidikan Geografi Fakultas Pendidikan IP Universitas Pendidikan Indonesia.
- Phair JW, Smith JD, & van Deventer JSJ. 2003. Characteristics of aluminosilicate hydrogels related to commercial geopolymers. *Mater Lett* 57: 4356-4367.
- Rizain. 2008. *Pelarutan Aluminium dan Silikon Berbagai Abu Layang Batubara dari Empat PLTU Menggunakan Variasi Konsentrasi NaOH dan Temperatur*. Tesis tidak diterbitkan. Surabaya: Program Magister FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Panias D & Krestou A. 2007. Effect of synthesis parameters on precipitation of nanocrystalline boehmite from aluminates solutions. *Powder Technol* 175: 163-173.
- Rowles MR. 2004. *The Structural Nature of Aluminosilicate Inorganic Polymers: A Macro to Nanoscale Study*. Desertasi. Curtin: Curtin University of Technology.
- Sudaryo & Sutjipto. 2009. *Identifikasi dan Penentuan Logam pada Tanah Vulkanik di Daerah Cangkringan Kabupaten Sleman dengan Metode Analisis Aktivasi Neutron Cepat*. Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta, Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir BATAN Yogyakarta, 5 November 2009.
- van Deventer JSJ, Provis LJ, & Lukey GC. 2007. Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *J Hazard Mater* 139: 506-513.
- van Jaarsveld JGS & van Deventer JSJ. 1996. The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: part i theory and applications. *Miner Eng* 10 (7): 659-669.
- Xu H & van Deventer JSJ. 2000. The Geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *Int J Miner Process* 59: 247-266.