

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

Ella Kusumastuti, Warlan Sugiyo

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

Abstrak. Telah dilakukan sintesis material berupa geopolimer dengan memanfaatkan abu vulkanik yang dihasilkan dari letusan gunung Merapi. Geopolimer merupakan 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 pozzolanik, 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 cukup tinggi yakni 5,55. Abu vulkanik Merapi 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 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 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/ 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.

Kata kunci : abu vulkanik merapi, geopolimer, polimer anorganik aluminosilikat

PENDAHULUAN

Letusan Merapi memberikan dampak positif dan 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, 1 November 2010). Untuk itu 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 dan Sutjipto, 2009). Abu vulkanik dikatakan bersifat *pozzolanik*, yakni suatu material dengan kandungan utama silika dan alumina yang mana silika dan alumina tersebut 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, P. dkk., 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). 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 dan Van Deventer, 2000), kemudian dikembangkan geopolimer dengan bahan dasar limbah industri seperti abu layang yang bersifat *pozzolanik* (Van Deventer dkk., 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 (Sudaryo dan Sutjipto, 2009), ternyata 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 *pozzolaniknya*, maka diharapkan abu vulkanik bisa dimanfaatkan dalam sintesis geopolimer, sehingga dapat diperoleh cara penanganan abu vulkanik yang terakumulasi di sekitar daerah gunung Merapi. Dengan demikian 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 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 sekitar gunung berapi dapat dicegah.

METODE

Hal yang pertama dilakukan dalam penelitian ini adalah karakterisasi abu vulkanik Merapi. Abu vulkanik yang diambil dari daerah Sleman Yogyakarta dianalisis sifat kimianya dengan XRF dan analisis fasa dengan XRD. Na silikat yang digunakan juga perlu diketahui komposisinya, yakni dengan menggunakan metode XRF.

Sintesis geopolimer dilakukan dengan cara mencampurkan abu vulkanik dengan larutan pengaktif. Pencampuran dilakukan dengan menggunakan tangan selama 2 menit kemudian dengan *mixer* selama 5 menit sampai benar-benar homogen (Xu dan van Deventer, 2000 dan van Jaarsveld dkk., 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 dan Andini dkk., 2008). Penuangan dilakukan secara bertahap dan divibrasi selama 15 menit agar lebih padat dan untuk mengurangi gelembung udara (Duxson dkk., 2005). Hasil pencetakan ini disebut pelet atau benda uji, didiamkan pada suhu ruang selama minimal 1 jam sampai dapat dilepaskan dari cetakannya (Chindaprasirt dkk., 2007). Pelet yang sudah dilepaskan dari cetakan ditata ke dalam loyang dan ditutup dengan plastik untuk mencegah penguapan air secara tiba-tiba yang dapat menyebabkan pelet atau benda uji menjadi retak-retak (De Silva dkk., 2007). Dalam penelitian ini dilakukan empat deret variasi, berturut-turut memvariasi jumlah abu vulkanik, jumlah Na Silikat, jumlah NaOH baru kemudian terakhir jumlah H₂O. Produk geopolimer dikarakterisasi sifatnya dengan kuat tekan, XRD (fasa mineral) dan FTIR (ikatan kimianya).

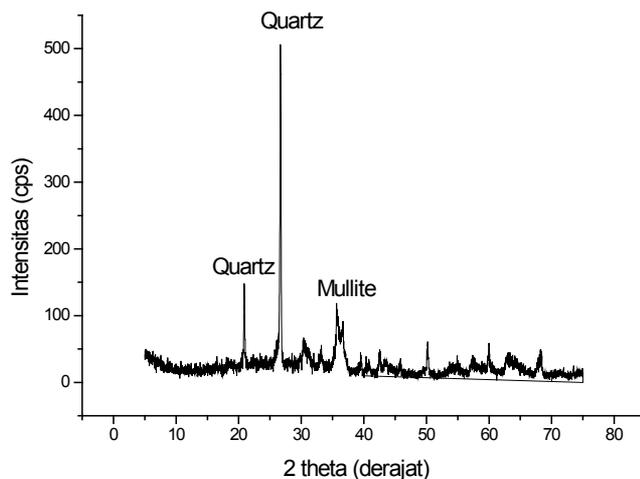
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Bahan Awal

Sampel abu vulkanik diperoleh dari daerah Sleman Yogyakarta. Sebelum digunakan dalam sintesis geopolimer, abu vulkanik dijemur selama 2 hari agar kering, lalu diayak terlebih 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.

Karakterisasi abu vulkanik meliputi kandungan bahan kimia dan kandungan fasa mineral penting dilakukan karena sifat fisik dan kimia abu vulkanik sangat berpengaruh pada proses sintesis maupun 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*).



Gambar 1. Difraktogram Abu Vulkanik Merapi

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 (jumlahnya mayor) 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 . Hasil analisis kandungan abu vulkanik ini, terlihat bahwa material ini termasuk pozzolanik yakni mempunyai SiO_2 dan Al_2O_3 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 1.

Informasi kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 pada abu vulkanik diperlukan karena pembentukan rantai Si–O–Al pada geopolimer sangat ditentukan oleh rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ bahan awal. Selain itu rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam abu vulkanik akan mempengaruhi kondisi yang diperlukan untuk pembentukan geopolimer. Rasio berat $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dalam abu vulkanik Merapi adalah 3,26 atau bila dikonversi ke dalam rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sebesar 5,55. Hasil konversi dari komposisi persen berat menjadi komposisi mol tiap gram abu vulkanik ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi Kimia Abu Vulkanik Merapi

Kandungan Oksida Abu Vulkanik	Jumlah (%)
SiO ₂	45,7
Al ₂ O ₃	14,0
K ₂ O	3,86
CaO	16,1
Fe ₂ O ₃	18,2
TiO ₂	1,40
V ₂ O ₅	0,07
MnO	0,469
CuO	0,052
BaO	0,24

Tabel 2. Konversi Berat ke Jumlah Mol Komponen dalam Tiap 1 Gram Abu Vulkanik

Komponen Abu Vulkanik	Berat Komponen dalam Tiap 1 Gram Abu Layang (gram)	Jumlah Mol Komponen dalam Tiap 1 Gram Abu Layang (mol)
SiO ₂ (45,7%)	0,457	0,007617
Al ₂ O ₃ (14,0%)	0,140	0,001373
CaO (16,1%)	0,161	0,002875
Fe ₂ O ₃ (18,2%)	0,182	0,001138
K ₂ O (3,86%)	0,0386	0,000515

Binder yang dikenal juga dengan sebutan *alkali activator* yang digunakan dalam geopolimerisasi adalah natrium silikat atau Na₂SiO₃. Penambahan natrium silikat ini juga bertujuan untuk memperbesar spesies Si yang terlarut sehingga akan terdapat cukup silikat oligomerik untuk 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 2.

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⁻.

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	86,4	1,44000
CaO	2,4	0,04286
Komponen Minor Lain	7,6	-

Sintesis Geopolimer dengan Bahan Dasar Abu Vulkanik Merapi

Sintesis geopolimer dilakukan dengan cara mencampurkan abu layang dengan larutan pengaktif. Pencampuran dilakukan dengan menggunakan tangan selama 2 menit kemudian dengan *mixer* selama 5 menit sampai benar-benar homogen (Xu dan van Deventer, 2000 dan van Jaarsveld dkk., 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 dan Andini dkk., 2008). Penuangan dilakukan secara bertahap dan divibrasi selama 15 menit agar lebih padat dan untuk mengurangi gelembung udara (Duxson dkk., 2005). Hasil pencetakan ini disebut pelet atau benda uji. Pelet didiamkan pada suhu ruang selama minimal 1 jam sampai dapat dilepaskan dari cetaknya (Chindaprasirt dkk., 2007). Pelet yang sudah dilepaskan dari cetakan ditata ke dalam loyang dan ditutup dengan plastik untuk mencegah penguapan air secara tiba-tiba yang dapat menyebabkan pelet atau benda uji menjadi retak-retak (De Silva dkk., 2007).

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 kandungan CaO pada abu vulkanik relatif lebih kecil (CaO hanya 16,1%) bila dibandingkan dengan abu layang yang sudah diteliti sebelumnya (CaO sebesar 21,4%). 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).

Pada sintesis yang dilakukan, geopolimer disiapkan dari bahan awal berupa abu vulkanik, natrium silikat, NaOH dan air. Ada beberapa 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. Variasi kedua dilakukan dengan memvariasi jumlah Na Silikat sehingga didapatkan variasi SiO₂/Al₂O₃ dan S/L juga. Variasi ketiga dilakukan dengan memvariasi jumlah NaOH yang ditambahkan sehingga didapatkan variasi S/L. Variasi keempat dilakukan dengan memvariasi jumlah H₂O yang ditambahkan. Dari berbagai variasi tersebut diharapkan diperoleh komposisi optimum untuk menghasilkan geopolimer dengan kekuatan optimum.

Karakterisasi Sifat Geopolimer Abu Vulkanik

Kuat Tekan

Pengukuran kekuatan akhir pada produk geopolimer dilakukan setelah pelet/benda uji berumur 28 hari mengingat pada umur tersebut perkembangan kekuatan geopolimer sudah optimum. Hasil pengukuran kuat tekan disajikan pada Tabel 4 sampai dengan Tabel 7 dan digabungkan pada Gambar 2.

Pada variasi yang pertama (Tabel 4) dilakukan variasi jumlah abu vulkanik yang digunakan, dimana variasi ini sangat dipengaruhi oleh kekentalan pasta atau rasio S/L. 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. Komposisi ini juga optimum pada variasi yang kedua (Tabel 5) yakni dengan variasi penambahan Na Silikat. Pada komposisi ini, penambahan Na Silikat yang rendah menyebabkan kekuatan rendah karena jumlah Si terlarut lebih kecil, sedangkan pada penambahan Na Silikat yang besar akan memperkecil kekuatan juga, karena adanya kelebihan spesi Si terlarut sehingga geopolimer yang dihasilkan lama mengeras dan teksturnya lebih lengket.

Tabel 4. Data Hasil Pengukuran Kuat Tekan pada Produk Geopolimer dengan Variasi Abu Vulkanik

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	3.18	0.00

Tabel 5. Data Hasil Pengukuran Kuat Tekan pada Produk Geopolimer dengan Variasi 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

Pada variasi ketiga (Tabel 6) dilakukan variasi penambahan 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 untuk terjadinya proses geopolimerisasi. Di sini untuk perbandingan abu vulkanik dan Na Silikat 50/10 ternyata dibutuhkan lebih banyak larutan NaOH dari komposisi optimum sebelumnya (perbandingan NaOH dan air optimum adalah 5/8 atau 0,625) untuk melarutkan Si dan Al di dalamnya secara optimal.

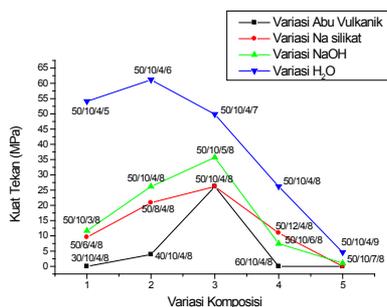
Pada variasi keempat (Tabel 7) dilakukan variasi penambahan air. Komposisi 50/10/4/6 mencapai kekuatan optimum sebesar 61,16 MPa. Komposisi ini mempunyai S/L=2,50 dan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=7,58$, dimana konsentrasi optimum untuk NaOH dan air adalah 4/6 atau 0,666 lebih besar dari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

Tabel 6. Data Hasil Pengukuran Kuat Tekan pada Produk Geopolimer dengan Variasi 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 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



Gambar 2. Grafik Kuat Tekan pada Berbagai Variasi Komposisi

Kandungan Fasa Mineral

Analisis fasa kandungan mineral pada produk geopolimer dilakukan dengan metode XRD (*X-ray Diffraction*), dan difraktogramnya ditunjukkan pada Gambar 3. 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).

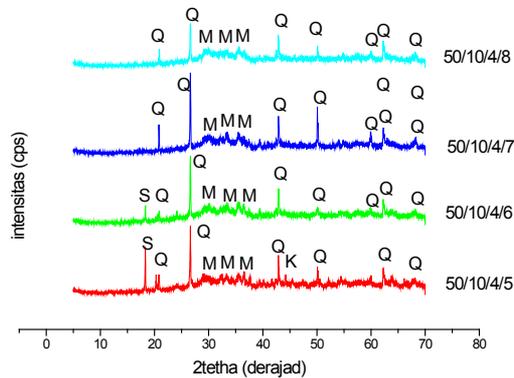
Analisis kandungan mineral ini dilakukan pada produk yang mempunyai kekuatan optimum. Dari hasil pengukuran kuat tekan, kekuatan optimum dicapai pada Si/Al=7,58, dan pada Si/Al yang sama maka diperlukan optimasi dalam konsentrasi NaOH. Diperoleh fakta bahwa pada variasi konsentrasi NaOH diperoleh kekuatan 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 3.

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

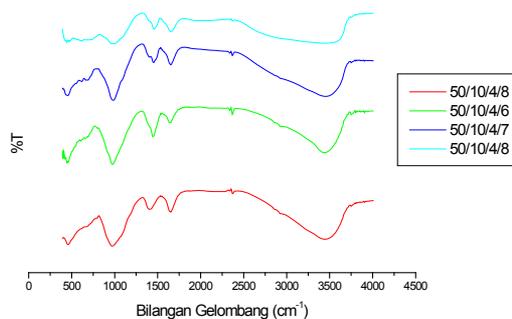
Pada Gambar 3 dapat dijelaskan bahwa produk geopolimer mempunyai kandungan mineral berupa *quartz* (SiO₂), *mullite* (3Al₂O₃·2SiO₂), *magnetite* (FeFe₂O₄), dan *sodalite* (Al₆Na₈(SiO₄)₆(Cl)₂). Difraktogram geopolimer menunjukkan pembentukan material amorf ditandai adanya *hump* pada sudut 2θ (2tetha) antara kira-kira 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 0,80). 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. 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 2θ antara kira-kira 27-35 derajat) yang semakin besar seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. 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 ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$).

Ikatan Kimia



Gambar 4. Spektra FTIR Geopolimer Abu Vulkanik

Metode spektroskopi FTIR digunakan untuk menentukan secara kualitatif adanya ikatan Si–O–Al yakni berupa vibrasi molekul sebagai akibat interaksi dengan gelombang elektromagnet infra merah pada bilangan gelombang $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$. 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 $400\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$. Puncak-puncak pada $950\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ yang 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 4. 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 uncak-puncak pada $430\text{--}460\text{ cm}^{-1}$ yang menunjukkan vibrasi tekuk (*bending*) Si–O–Si atau O–Si–O. Pada komposisi 50/10/4/8 terlihat pita yang sangat lebar 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.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Analisis kandungan kimia abu vulkanik Merapi menunjukkan bahwa material ini termasuk material pozzolanik, 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 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 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.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamiec, P., Benezet, J. C., dan Benhassaine, A., (2008), “Pozzolanitic Reactivity of Silico-aluminous Fly Ash”, *Particuology*, Vol. 6, hal. 93-98.
- Andini, S., Cioffi, F., Colangelo, T., Grieco, T., Montagnaro, F., dan Santoro, L., (2008), “Coal Fly Ash as Raw Material for the Manufacture of Geopolymer-Based Products”, *Waste Management*, Vol. 28, hal. 416-423.
- Bakharev, T., (2005a), “Gepolimeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, hal. 1224-1232.
- Bakharev, T., (2005b), “Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, hal. 1233-1246.
- Bernas Jogja, 1 November 2010, Terserang ISPA Tiga Korban Abu Vulkanik Opname, halaman 3, Yogyakarta.

- Bolly, H. M. B., 2009, *Bahaya Silikosis Abu Vulkanik*.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., dan Sirivivatnanon, V., (2007), "Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer", *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, hal. 224-229.
- Davidovits, J., (1991), "Geopolymer : Inorganic Polymeric New Materials", *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 3, hal. 1633-1656.
- Davidovits, J., (1994), "Geopolimers : Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement", *Journal of Materials Education*, Vol. 16 (2&3), hal. 91-139.
- De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., dan Sirivivatnanon, V., (2007), "Kinetics of Geopolymerization : Role of Al_2O_3 and SiO_2 ", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, hal. 512-518.
- Duxson, P., Provis, J. I., Mallicoat, S. W., Lukey, G. C., Kriven, W., M., dan van Deventer, J., S. J., (2005), "Understanding the Relationship between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties", *Colloids and Surfaces*, Vol. 269, hal. 47-58.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, M. J., Rangan, B. V., (2004), "Factors Influencing The Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", *Dimensi Teknik Sipil*, Vol. 6, No. 2, hal. 88-93.
- Komnitsas, K. dan Zaharaki, D., (2007), "Geopolimerisation : A Review and Prospects for the Minerals Industry", *Minerals Engineering*, Vol. 20, hal. 1261-1277.
- Kusumastuti, E., (2009), *Geopolimer Abu Layang Batubara : Studi Rasio Mol SiO_2/Al_2O_3 Dan Sifat-Sifat Geopolimer Yang Dihasilkan*, Tesis, Program Magister, FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Nandi, (2006), *Handout Geologi Lingkungan : Vulkanisme*, Jurusan Pendidikan Geografi, Fakultas Pendidikan IPS, UPI Bandung.
- Phair, J. W., Smith, J. D., dan van Deventer, J. S. J., (2003), "Characteristics of Aluminosilicate Hydrogels Related to Commercial Geopolymers", *Materials Letters*, Vol. 57, hal. 4356-4367.
- Rizain, (2008), *Pelarutan Aluminium dan Silikon Berbagai Abu Layang Batubara dari Empat PLTU Menggunakan Variasi Konsentrasi NaOH dan Temperatur*, Tesis, Program Magister FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Rowles, M. R., (2004), *The Structural Nature of Aluminosilicate Inorganic Polymers : A Macro to Nanoscale Study*, Tesis Ph. D., Curtin University of Technology, Curtin.
- Sudaryo dan Sutjipto (2009), *Identifikasi Dan Penentuan Logam Pada Tanah Vulkanik Di Daerah Cangkungan Kabupaten Sleman Dengan Metode Analisis Aktivasi Neutron Cepat*, Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta, 5 November 2009 ISSN 1978-0176, Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir Batan, Yogyakarta.

- van Deventer, J. S. J., Provis, L. J., dan Lukey, G. C., (2007), "Reaction Mechanisms in the Geopolymeric Conversion of Inorganic Waste to Useful Products", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. A139, hal. 506-513.
- van Jaarsveld, J.G.S. dan van Deventer, J. S. J., (1996), The Potential Use of Geopolimeric Materials to Immobilize Toxic Metals : Part I. Theory and Applications, *Minerals Engineering*, Vol. 10, No. 7, hal. 659-669.
- Xu, H. dan van Deventer, J. S. J., (2000), "The Geopolymerisation of Alumino-silicate Minerals", *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 59, hal. 247-266.