

# SINTESIS GEOPOLIMER BERBUSA BERBAHAN DASAR ABU LAYANG BATUBARA DENGAN HIDROGEN PEROKSIDA SEBAGAI *FOAMING AGENT*

---

Ella Kusumastuti, Nuni Widiarti

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang  
Email : ella.kusuma@gmail.com

Abstrak. Tujuan penelitian ini (1) menjelaskan hubungan antara jumlah  $H_2O_2$  sebagai *blowing agent* yang ditambahkan terhadap sifat fisika dan struktur kimiawi geopolimer berbusa yang dihasilkan; dan (2) menjelaskan jumlah optimum  $H_2O_2$  yang ditambahkan untuk menghasilkan geopolimer berbusa dengan sifat kuat, densitas rendah dan isolator panas. Metode yang digunakan dalam sintesis geopolimer berbusa adalah dengan menggunakan abu layang sebagai sumber silika alumina yang diaktifkan dengan larutan pengaktif NaOH dan Na Silikat. Karakterisasi struktur kimiawi dilakukan dengan analisis fasa mineral dengan XRD dan analisis gugus fungsi menggunakan FTIR. Penambahan  $H_2O_2$  sebagai *foaming agent* berpengaruh terhadap sifat fisika dan struktur kimiawi geopolimer berbusa yang dihasilkan. Penambahan  $H_2O_2$  secara umum menurunkan kekuatan geopolimer dengan adanya pori yang terbentuk dari hasil peruraian  $H_2O_2$  menjadi  $H_2O$  dan  $O_2$ . Oleh karena itu penambahan  $H_2O_2$  juga akan menurunkan densitas dan konduktivitas termalnya. Secara kimiawi, sifat material yang dapat diamati dari analisis dengan menggunakan FTIR, XRD dan SEM. Hasil analisis gugus fungsi dengan FTIR menunjukkan bahwa penambahan  $H_2O_2$  tidak menimbulkan gugus fungsi baru dalam geopolimer, ditandai dengan adanya pita yang menunjukkan ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al tidak berubah secara signifikan. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa material hasil sintesis berfasa amorf. Penambahan  $H_2O_2$  menyebabkan bertambahnya fasa kristal mineral sisa reaktan karena sebagian  $H_2O_2$  bereaksi dengan basa. Hasil analisis dengan SEM membuktikan bahwa penambahan  $H_2O_2$  memperbesar jumlah dan ukuran pori sampai dengan lebih dari  $100\mu m$ . Jumlah optimum  $H_2O_2$  yang ditambahkan untuk menghasilkan geopolimer berbusa dengan sifat kuat, densitas rendah dan isolator panas adalah pada penambahan  $H_2O_2$  30% sebanyak 2,0% (b/b) dengan hasil kuat tekan 21,2808 MPa, densitas 1800,8317  $kg/m^3$  dan konduktivitas panas 0,0611 Watt/ $m^{\circ}K$ . Material ini potensial sebagai beton ringan dengan kekuatan sedang.

Kata kunci: abu layang batubara, *foaming agent* hidrogen peroksida, geopolimer berbusa

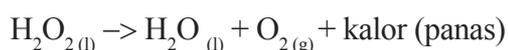
## PENDAHULUAN

Teknologi geopolimerisasi menawarkan solusi baru untuk mengatasi kelemahan-kelemahan material organik dan anorganik tersebut (Vaou dan Panias, 2010). Geopolimerisasi merupakan teknologi yang ramah lingkungan, dilakukan pada suhu ruang dengan memanfaatkan bahan dasar berupa material limbah aluminosilikat, dan tergolong murah. Geopolimerisasi dapat mentransformasi padatan *raw material* mengandung silikat dan aluminosilikat menjadi produk-produk baru (Davidovits, 2005). Produk dari teknologi geopolimerisasi adalah geopolimer.

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 yang dikembangkan Davidovits memiliki rumus umum  $nM_2O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$  dengan M adalah logam alkali. Geopolimer telah dimanfaatkan dalam berbagai bidang antara lain sebagai bahan bangunan, komposit dan refraktori, insulator dan untuk penanganan limbah beracun (Phair dkk., 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). Abu layang sebagai limbah pembakaran batubara merupakan padatan *pozzolan* aluminosilikat amorf yang kaya akan silika dan alumina sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan dalam teknologi geopolimerisasi (Kusumastuti, 2012).

Aerogel adalah material padat berupa jaringan tiga dimensi polimer anorganik yang bersifat *porous*, dibentuk dari reaksi pemadatan suatu gel/pasta basah dengan kehadiran gelembung-gelembung gas yang nantinya akan membentuk pori (Schubert dan Husing, 2000). Gel/ pasta basah tersebut akan mengeras dan dalam proses pengerasannya pori udara terjebak di dalamnya. Pori-pori pada aerogel berisi udara, sehingga menjadikan aerogel bersifat ringan (densitasnya rendah), porositas tinggi, dan bersifat insulator termal (Schubert dan Husing, 2000).

Hidrogen peroksida dengan rumus kimia  $H_2O_2$  merupakan bahan kimia anorganik yang memiliki sifat oksidator kuat. Senyawa  $H_2O_2$  tidak berwarna dan memiliki bau yang khas agak keasaman.  $H_2O_2$  larut dengan sangat baik dalam air. Dalam kondisi normal hidrogen peroksida sangat stabil, dengan laju dekomposisi yang sangat rendah. Pada saat mengalami dekomposisi hidrogen peroksida terurai menjadi air dan gas oksigen, dengan mengikuti reaksi eksotermis berikut:



Berdasarkan beberapa hal yang sudah diuraikan tersebut, diperlukan inovasi material yang dapat mengatasi kelemahan-kelemahan material isolator termal baik organik maupun organik

yakni melalui teknologi geopolimerisasi. Dalam penelitian yang dilakukan, digunakan bahan dasar berupa abu layang batubara yang diaktifkan dengan larutan NaOH dan Na Silikat dengan hidrogen peroksida sebagai *blowing/foaming agent*. Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ) memiliki ketidakstabilan secara termodinamika sehingga mudah terurai menjadi  $H_2O$  dan  $O_2$  dan menciptakan pori pada geopolimer sehingga menurunkan densitas geopolimer. Kelebihan hidrogen peroksida adalah tidak mencemari lingkungan karena yang tersisa hanyalah air dan oksigen. Geopolimer berbusa yang disintesis diharapkan memiliki sifat kuat, pori permukaan yang luas, isolator panas dan mempunyai densitas yang rendah sehingga potensial untuk menggantikan beton ringan yang aman dan ramah lingkungan.

## METODE

Peralatan sederhana yang digunakan dalam penelitian ini adalah cetakan silinder plastik, pengaduk (*mixer*), oven, neraca analitik, peralatan plastik (beaker *polipropilen*, gelas dan wadah plastik serta pengaduk plastik), alat-alat gelas (gelas kimia, gelas ukur, dll), piknometer, serta saringan/ayakan 100 mesh.

Peralatan untuk karakterisasi antara lain Mesin Penguji Kuat Tekan (*Universal Testing Machine*), Piknometer, *Thermal Conductivity Analyser*, XRF (*X-Ray Fluorescence*), alat XRD (*X-Ray Diffraction*), *Precise FTIR (Fourier Transform Infrared)* dan SEM (*Scanning Electron Microscopy*).

Bahan yang digunakan antara lain sampel abu layang PLTU Tanjung Jati Jepara, natrium hidroksida pelet (NaOH 99%), binder / plasticizer berupa larutan Na silikat ( $Na_2SiO_3$ ) teknis, aquades ( $H_2O$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) 30% sebagai *blowing agent*.

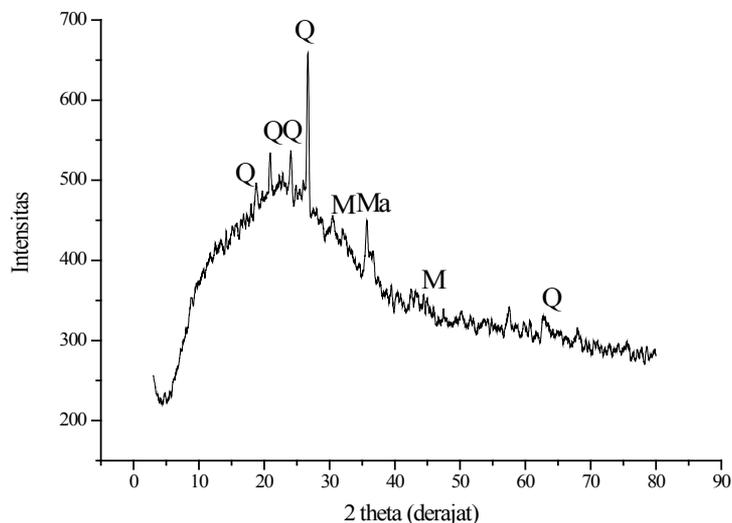
Sintesis geopolimer dilakukan dengan cara mencampurkan abu layang dengan larutan pengaktif dan Na Silikat. Pencampuran dilakukan dengan menggunakan tangan selama 2 menit kemudian dengan *mixer* selama 5 menit sampai benar-benar homogen (Xu dan Van Deventer, 2000 dan van Jaarsveld dkk., 2003). Campuran 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). Kondisi curing dilakukan pada suhu  $65^\circ C$  selama 24 jam dan pelet disimpan pada suhu kamar selama 28 dan siap diuji kuat tekannya (Hardjito dkk., 2004).

Sintesis geopolimer berbusa dilakukan pada S/L optimum. Penambahan *blowing agent*

$H_2O_2$  30% dilakukan pada saat terbentuk pasta antara abu layang dan larutan pengaktif. Variasi penambahan pasta adalah 0,5-3,0% w/w dari jumlah keseluruhan berat bahan awal yang digunakan (Vaou dan Panias, 2010). Penambahannya dilakukan dengan pengadukan secara konstan selama 2 menit, kemudian pasta dalam cetakan dibiarkan pada suhu  $35^\circ C$  selama 2 jam. Selama kondisi tersebut,  $H_2O_2$  akan terdekomposisi secara cepat menghasilkan oksigen yang mengembang dan menciptakan busa di dalam pasta geopolimer. Kondisi curing dilakukan pada suhu  $65^\circ C$  selama 24 jam. Setelah itu, pasta geopolimer dilepaskan dari cetaknya dan disimpan pada suhu kamar selama 28 hari untuk diuji kuat tekan, densitas, konduktivitas termal, XRD, FTIR dan SEM. Khusus untuk pengujian konduktivitas termal, geopolimer berbasa dicetak dengan bentuk silinder ukuran diameter 110 mm dan ketebalan 10 mm (Vaou dan Panias, 2010).

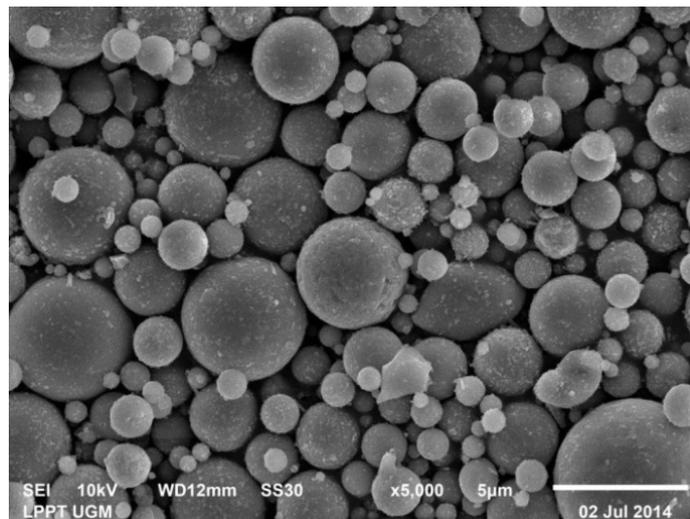
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis fasa mineral dengan XRD pada abu layang PLTU Tanjung Jati Jepara menyatakan bahwa abu layang ini sebagian besar mengandung fasa amorf aluminosilikat dengan kandungan utama mineral *Quartz* dan *Mullite*. Gambar 1 merupakan difraktogram abu layang PLTU Tanjung Jati Jepara. Mineral utama (Q) *Quartz* ( $SiO_2$ ) ditunjukkan oleh puncak difraksi tajam pada  $2\theta=20,94^\circ$ ;  $26,64^\circ$ ;  $50,38^\circ$ ;  $54,95^\circ$  dan  $60,02^\circ$  (PDF 03-0420), sedangkan (M) *Mullite* ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) pada  $2\theta=33,31^\circ$  dan  $42,94^\circ$  (PDF 06-0258) serta (Ma) *Magnetite* ( $FeFe_2O_4$ ) pada  $2\theta=35,95^\circ$  dan  $62,25^\circ$  (PDF 19-0629). Puncak-puncak tajam ini menunjukkan fasa kristalin yang tidak reaktif, sedangkan fasa amorf ditunjukkan dengan adanya *hump* atau gundukan yang lebar pada  $2\theta$  antara  $10^\circ$  sampai  $40^\circ$ .

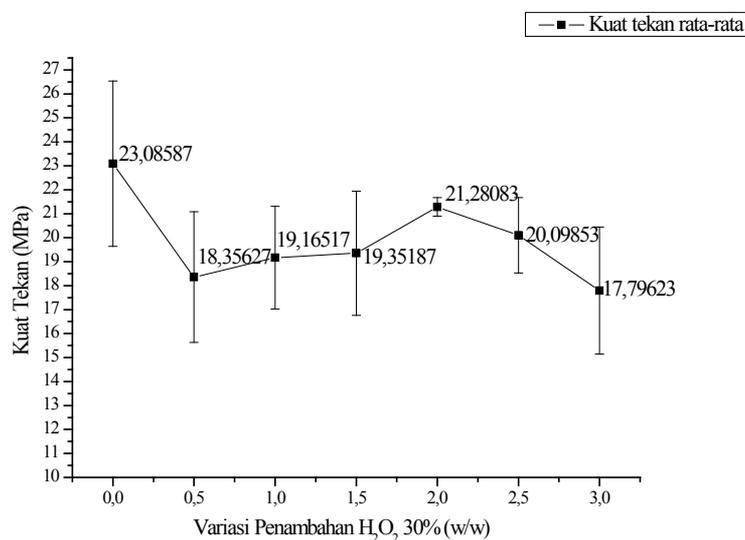


**Gambar 1. Difraktogram Abu Layang PLTU Tanjung Jati Jepara (Q=quartz, M=mullite, Ma=magnetite)**

Analisis morfologi partikel dengan menggunakan SEM disajikan pada Gambar 2. Gambar 2 memperlihatkan bahwa partikel abu layang yang berbentuk bola (*spherical*) dengan ukuran butiran partikelnya diperkirakan antara 1-100  $\mu\text{m}$ . Ukuran dan bentuk partikel abu layang mempengaruhi keaktifan abu layang. Semakin kecil dan tidak beraturan bentuk partikel abu layang, semakin reaktif (mudah larut dalam asam/ basa) karena luas permukaan bidang sentuh dengan pelarut dalam hal ini adalah NaOH sebagai larutan pengaktif, semakin besar.



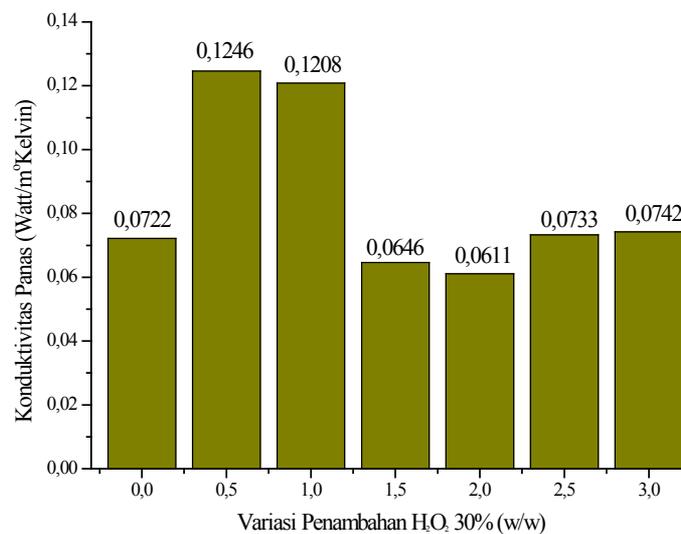
**Gambar 2. Morfologi Partikel Abu Layang PLTU Tanjung Jati Jepara**



**Gambar 3. Hasil Uji Kuat Tekan 28 Hari Geopolimer Berbusa dengan Variasi  $\text{H}_2\text{O}_2$**

Hasil uji kuat tekan pada variasi ini ditampilkan pada Gambar 3. Gambar 3 secara umum menunjukkan bahwa kuat tekan geopolimer menurun dengan bertambahnya  $H_2O_2$ . Penambahan *foaming agent*  $H_2O_2$  30% akan menciptakan pori pada geopolimer. Silika dan alumina cukup stabil terhadap hidrogen peroksida sehingga diperkirakan hidrogen peroksida akan bereaksi dengan basa CaO (Harjanto et al., 2007). Pada daerah penambahan  $H_2O_2$  sebanyak 0-0,5% kuat tekan menurun karena jumlah  $H_2O_2$  belum cukup untuk terjadinya reaksi dengan CaO.

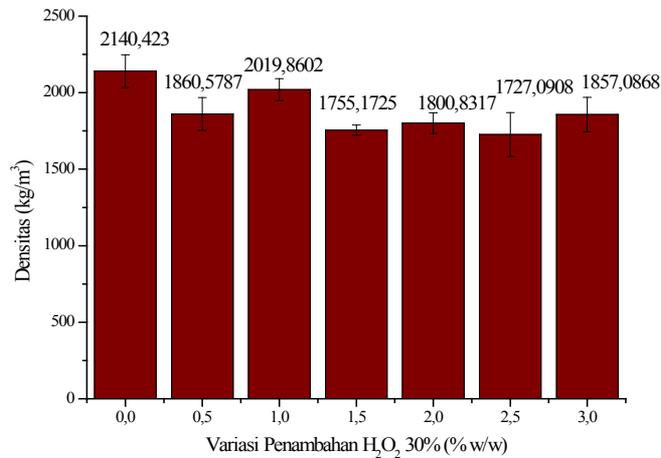
Hasil uji densitas geopolimer berbusa pada variasi  $H_2O_2$  30% ditunjukkan pada Gambar 4. Gambar tersebut menunjukkan bahwa *trend* atau pola grafik diagram batang secara umum menunjukkan penurunan pada penambahan  $H_2O_2$  sebesar 0,0; 1,0 dan 2,0%. *Trend* yang sama ditemukan pada penambahan  $H_2O_2$  sebesar 0; 1,5 dan 2,5%. Pola yang turun kemudian naik secara tidak beraturan ditemukan pada penambahan  $H_2O_2$  sebesar 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 dan 3,0% sehingga secara umum dapat dikatakan bahwa penambahan *foaming agent* akan menurunkan densitas geopolimer. Hal ini sejalan dengan kuat tekan geopolimer.



**Gambar 4. Hasil Uji Densitas Geopolimer Berbusa pada Variasi  $H_2O_2$  30%**

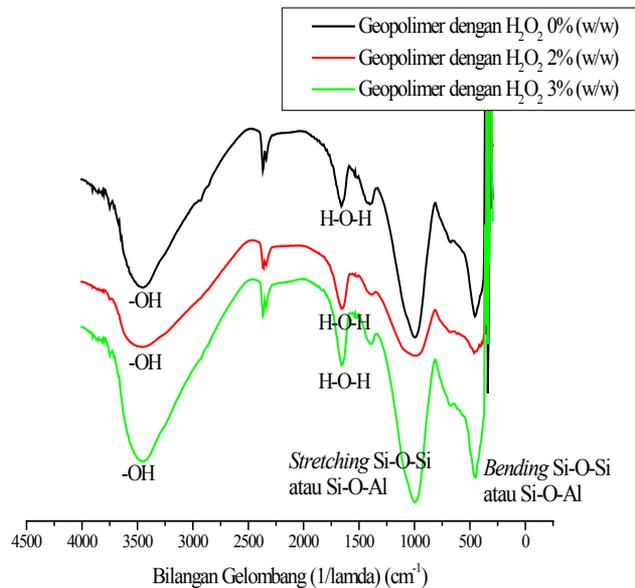
Hasil pengujian konduktivitas panas pada geopolimer ditampilkan pada Gambar 5. Hasil uji konduktivitas panas pada berbagai variasi penambahan  $H_2O_2$  30% sebagai *foaming agent* mempunyai *trend* atau pola yang sama dengan densitas. Konduktivitas panas paling besar dicapai oleh penambahan  $H_2O_2$  sebanyak 0,5% yakni sebesar 0,1246 Watt/m<sup>2</sup>K, naik dari harga sebelumnya yakni pada penambahan  $H_2O_2$  sebanyak 0,0% dengan nilai konduktivitas panas 0,722 Watt/m<sup>2</sup>K. Nilai konduktivitas panas selanjutnya mengalami penurunan pada penambahan

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebanyak 1,0% menjadi 0,1208 Watt/m<sup>o</sup>K. Penurunan konduktivitas panas selanjutnya terjadi sampai pada penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebanyak 1,5 dan 2,0% yakni berturut-turut 0,0646 dan 0,0611 Watt/m<sup>o</sup>K, kemudian mengalami kenaikan pada penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebanyak 2,5 dan 3,0% berturut-turut 0,0733 dan 0,0742 Watt/m<sup>o</sup>K. Dari sekian data konduktivitas panas yang diperoleh, didapatkan nilai konduktivitas panas paling rendah pada penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebanyak 2,0% yakni 0,0611 Watt/m<sup>o</sup>K.



**Gambar 5. Hasil Uji Konduktivitas Termal Geopolimer Berbusa pada Variasi Penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%**

Metode FTIR ditampilkan pada Gambar 6 sedangkan hasil interpretasinya ditampilkan pada Tabel 4. Gambar 6 menunjukkan hasil analisis perubahan ikatan kimia pada geopolimer dengan penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebanyak 0; 2,0 dan 3,0% pada masa simpan 28 hari. Puncak-puncak pada daerah sekitar 3400 cm<sup>-1</sup> dan 1600 cm<sup>-1</sup> menunjukkan adanya vibrasi ulur (*stretching*) –OH dan vibrasi tekuk (*bending*) H–O–H dari molekul-molekul air. Pita ini menunjukkan bahwa terdapat molekul-molekul air pada permukaan maupun terjebak dalam rongga-rongga struktur kerangka geopolimer. Hal ini membuktikan bahwa penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> menyebabkan bertambahnya molekul air dari hasil peruraian H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> menjadi H<sub>2</sub>O dan O<sub>2</sub>. Pada penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebesar 2% terlihat bahwa puncak pada daerah 950-1200 cm<sup>-1</sup> dan 3400 cm<sup>-1</sup> paling melebar dan tidak tajam diantara yang lain, sehingga dapat dipahami bahwa pada pada komposisi mencapai kuat tekan yang tertinggi, karena jumlah H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> digunakan untuk bereaksi dengan CaO sehingga H<sub>2</sub>O sebagai hasil peruraian H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> menjadi minimal. Sebaliknya pada penambahan 0 dan 3,0%, pita pada kedua daerah tersebut tampak tajam menandakan bahwa terdapat kadungan air yang cukup besar.



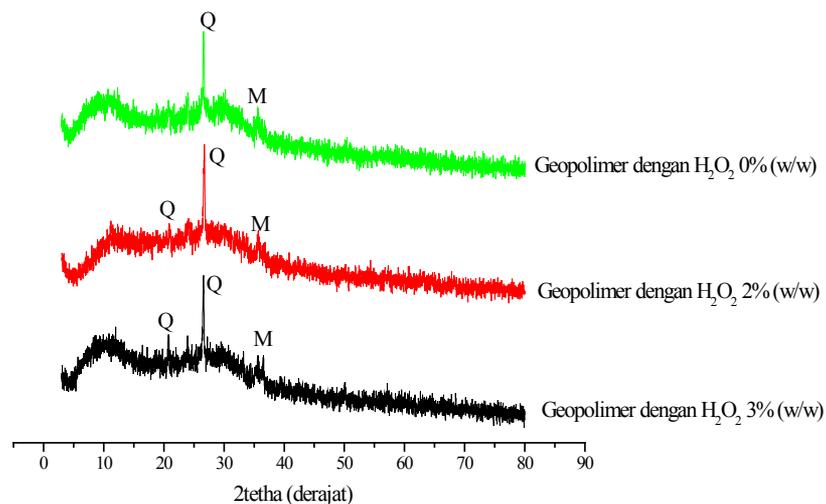
**Gambar 6. Hasil Uji Analisis Gugus Fungsi dengan FTIR pada Geopolimer Berbusa pada Variasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%**

Pengamatan spektra FTIR juga difokuskan pada pembentukan ikatan Si–O–Si atau Si–O–Al pada daerah 400-1200 cm<sup>-1</sup> pada geopolimer. Pada penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 0,0 dan 3,0% terdapat pita pada daerah 500 dan 1000 cm<sup>-1</sup> yang semakin tajam dengan intensitas yang tinggi sedangkan pada penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 2% pita yang sama terlihat melebar dengan intensitas yang lebih rendah. Puncak-puncak pada 950-1200 cm<sup>-1</sup> merupakan pita vibrasi ulur asimetri (*asymmetric stretching vibration*) Si–O–Si atau Si–O–Al terlihat semakin tajam menandai ikatan yang semakin kuat pada matriks (Bakharev, 2005). Puncak-puncak pada 470-450 cm<sup>-1</sup> yang merupakan vibrasi tekuk (*bending*) Si–O–Si atau Si–O–Al juga semakin tajam, namun kesemuanya ini tidak jauh berbeda secara signifikan. Pita-pita pada daerah sekitar 1000 cm<sup>-1</sup> merupakan vibrasi ulur asimetri (*asymmetric stretching vibration*) Si–O–Si atau Si–O–Al, menandai padat dan kompaknya matriks geopolimer yang disintesis. Puncak pada daerah 1404,18 cm<sup>-1</sup> menandai adanya vibrasi ulur O–C–O dalam Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sebagai akibat reaksi karbonasi larutan NaOH dengan udara. Kesemua penjelasan ini terangkum dalam Tabel 4.

Gambar 7 adalah difraktogram geopolimer berbusa dengan variasi penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Pembentukan matriks geopolimer berupa fasa amorf baru yakni gel aluminosilikat ditandai dengan pergeseran *hump* atau gundukan pada 2θ=10-40° pada abu layang (Gambar 1) menjadi sekitar 2θ=20-30° pada geopolimer (Gambar 7). Hal ini adalah akibat pelarutan fasa amorf abu layang dalam larutan alkali kuat. Peningkatan lebar dan intensitas *background* pada difraktogram menandai telah terbentuknya struktur baru yang lebih tidak teratur atau amorf.

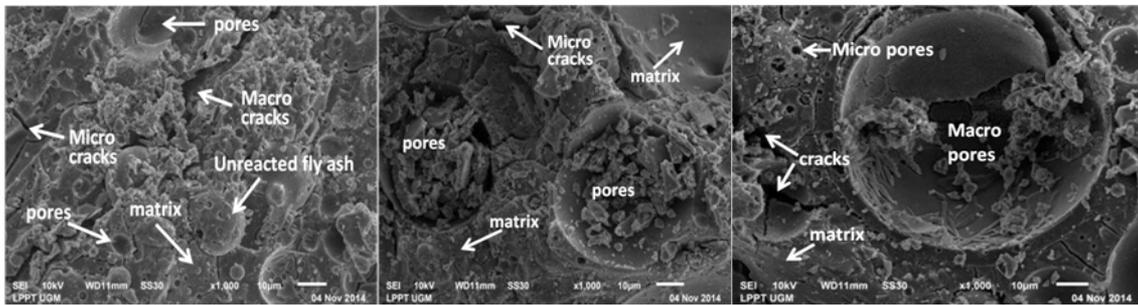
**Tabel 4. Hasil Interpretasi Spektra FTIR pada Geopolimer Berbusa dengan Penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

No	Pita Hasil Analisis FTIR pada Geopolimer Berbusa Penambahan H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>			Interpretasi dan Referensi
	0,0%	2,0%	3,0%	
1	3448,72	3448,72	3448,72	Adanya vibrasi ulur ( <i>stretching</i> ) –OH (Panas dkk., 2007)
2	1658,78	1651,07	1658,78	Vibrasi tekuk ( <i>bending</i> ) H–O–H dari molekul-molekul air (Panas dkk., 2007)
3	1404,18	1381,03	1396,46	Vibrasi ulur O–C–O (Bakharev, 2005)
4	995,27	995,27	995,27	Vibrasi ulur ( <i>stretching asimetri</i> ) Si–O–Si dan Si–O–Al (Bakharev, 2005)
5	455,20	447,49	447,49	Vibrasi tekuk ( <i>bending</i> ) Si–O–Si dan O–Si–O (Bakharev, 2005)



**Gambar 7. Hasil Uji Analisis Fasa Mineral dengan XRD pada Geopolimer Berbusa pada Variasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% sebesar 0, 2, dan 3% (b/b)**

Morfologi geopolimer pada skala mikro dapat diamati dengan menggunakan mikroskop elektron (SEM). Pengamatan difokuskan pada perubahan struktur mikro geopolimer, yakni matriks geopolimer, khususnya kehomogenan struktur morfologinya, kepadatan dan kekompakan serta pori dan retakan pada permukaan (*microcracks* dan *fracture surface*) yang kesemuanya dihubungkan dengan penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebagai *foaming agent* pada geopolimer berbusa. Gambar 8 memperlihatkan struktur morfologi geopolimer dengan penambahan *foaming agent* H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, tampak bahwa semakin banyak penambahan *foaming agent*, semakin besar pori yang terjadi.



**Gambar 8. Mikrograf Geopolimer Berbusa pada Variasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30%**

Pada penambahan 0% (Gambar 8(a)) tampak bahwa terbentuk matriks (*matrix*) geopolimer yang padat dan butiran partikel abu layang telah tersementasi. Selain itu, tampak pula adanya pori berukuran kecil (*pores*) dengan diameter kira-kira kurang dari 1 µm, retakan berukuran mikro (*microcracks*), serta sisa partikel abu layang yang tidak bereaksi (*unreacted fly ash*) berbentuk *sphere*. Pada mikrograf geopolimer dengan penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebesar 2,0% (Gambar 8(b)), tampak matrik (*matrix*) yang lebih kompak dan padat serta telah tersementasi dengan baik, bahkan tidak terlihat adanya sisa partikel abu layang yang tidak bereaksi (*unreacted fly ash*) sehingga matriks yang terbentuk kompak dan padat. Tampak pula adanya beberapa retakan berukuran mikro (*microcracks*), serta pori-pori berukuran sedang yakni sekitar berdiameter 10-50 µm. Pori berukuran besar (*macropores*) tampak pada mikrograf geopolimer berbusa dengan penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 3,0% (Gambar 8(c)). Diameter pori mencapai lebih dari 100 µm. Selain itu tampak pula matriks geopolimer yang kompak (*matrix*) serta beberapa retakan (*cracks*).

## SIMPULAN DAN SARAN

### Simpulan

Dari data hasil dan pembahasan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sebagai *foaming agent* berpengaruh terhadap sifat fisika dan kimia geopolimer berbusa yang dihasilkan. Penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> secara umum menurunkan kekuatan geopolimer dengan adanya pori yang terbentuk dari hasil peruraian H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> menjadi H<sub>2</sub>O dan O<sub>2</sub>. Oleh karena itu penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> juga akan menurunkan densitas dan konduktivitas termalnya. Secara kimiawi, sifat material yang dapat diamati dari analisis dengan menggunakan FTIR, XRD dan SEM. Hasil analisis gugus fungsi dengan FTIR menunjukkan bahwa penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tidak menimbulkan gugus fungsi baru dalam geopolimer, ditandai dengan adanya pita yang menunjukkan ikatan Si-O-Si dan Si-O-Al tidak berubah secara signifikan. Hasil analisis XRD menunjukkan bahwa material hasil sintesis berfasa amorf. Penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> menyebabkan bertambahnya fasa kristal mineral sisa reaktan karena sebagian H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bereaksi dengan basa. Hasil analisis dengan SEM

membuktikan bahwa penambahan  $H_2O_2$  memperbesar jumlah dan ukuran pori sampai dengan lebih dari  $100\mu m$ .

Jumlah optimum  $H_2O_2$  yang ditambahkan untuk menghasilkan geopolimer berbusa dengan sifat kuat, densitas rendah dan isolator panas adalah pada penambahan  $H_2O_2$  30% sebanyak 2,0% (b/b) dengan hasil kuat tekan 21,2808 MPa, densitas  $1800,8317 \text{ kg/m}^3$  dan konduktivitas panas  $0,0611 \text{ Watt/m}^\circ\text{K}$ . Material ini potensial sebagai beton ringan dengan kekuatan sedang.

## DAFTAR PUSTAKA

- 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*, 28. hal. 416-423.
- Bakharev, T. 2005. Gepolimeric Materials Prepared Using Class F Fly Ash and Elevated Temperature Curing. *Cement and Concrete Research*, 35 : 1224-1232.
- Bakharev, T. 2005. Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. *Cement and Concrete Research*, 35 : 1233-1246.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., dan Sirivivatnanon, V. 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29 : 224-229.
- 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*, 37 : 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*, 269, hal. 47-58.
- Harjanto, S., Sony P., Suharno, B. dan Ashadi, H.W., 2008. Struktur mikro dan Sifat Fisik-Mekanik Beton Ringan Tanpa Pematangan dalam Autoclave (Non Autoclaved Aerated Concrete, NAAC). *Indonesian Journal of Materials Science*, 9 (2): 139 – 144.
- Kusumastuti, E. 2009. *Geopolimer Abu Layang Batubara : Studi Rasio Mol  $SiO_2/Al_2O_3$  Dan Sifat-Sifat Geopolimer yang Dihasilkan*. Tesis tidak diterbitkan. Surabaya : Program Magister FMIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kusumastuti, E., 2012, Pemanfaatan Abu Vulkanik Gunung Merapi sebagai Geopolimer (Suatu Polimer Anorganik Aluminosilikat), *Jurnal MIPA Universitas Negeri Semarang*, 35(1): 67-76.
- Kusumastuti, E., 2013, Sintesis Geopolimer Berbahan Abu Vulkanik dengan Penambahan Aluminium Hidroksida sebagai Pengatur Rasio Silika dan Alumina, *Jurnal Sains dan Teknologi (Sainteknol) Universitas Negeri Semarang*, 11(1): 45-56.
- Phair, J. W., Smith, J. D., dan Van Deventer, J. S. J. 2003. Characteristics of Aluminosilicate Hydrogels Related to Commercial Geopolymers. *Materials Letters*. 57 : 4356-4367.
- Schubert, U. dan Husing, S., .2000, *Synthesis of Inorganic Material*. Austria: Wiley-VCH.
- 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*, 139 : 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*. 10 (7) : 659-669.

- Vaou, V. dan Parias, D.. 2010, .Thermal Insulating Foamy Geopolymers From Perlite, *Minerals Engineering*, 23: 1146–1151.
- Xu, H. dan Van Deventer, J. S. J. 2000. The Geopolymerisation of Alumino-silicate Minerals. *International Journal of Mineral Processing*. 59 : 247-266.