



Sintesis dan Karakterisasi Geopolimer dengan Penambahan Serat Eceng Gondok dan Serbuk Aluminium

Yanuar Hakim[✉], Ella Kusumastuti, dan Jumaeri

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang
Gedung D6 Kampus Sekaran Gunungpati Telp. (024)8508112 Semarang 50229

Info Artikel

Diterima Juli 2017

Disetujui Agustus 2017

Dipublikasikan November
2017

Keywords:

abu layang batubara
serbuk aluminium (Al)
serat eceng gondok

Abstrak

Sintesis dan karakterisasi geopolimer penambahan serat eceng gondok dan serbuk aluminium (Al) berbasis abu layang batubara telah dilakukan. Sintesis ini dilakukan dengan variasi penambahan serat eceng gondok dan serbuk Al. Serat eceng gondok dan serbuk Al yang digunakan bervariasi antara 0,5-3% (b/b) abu layang dan 0-0,5 g serbuk Al. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ optimum adalah 4,90 dengan penambahan serbuk Al sebesar 0,2 g dihasilkan kuat tekan 32,03 MPa, kuat tarik 22,91 MPa, densitas 15888,09 kg/m^3 dan konduktivitas panas 0,1001 $\text{Watt/m}^2\text{K}$. Penambahan serat optimum pada 2,5% (b/b) abu layang dengan kuat tekan 27,57 MPa, kuat tarik 24,11 MPa, densitas 1590,26 kg/m^3 dan konduktivitas panas 0,0999 $\text{Watt/m}^2\text{K}$. Analisa fasa mineral dengan XRD (*X-Ray Diffraction*) menunjukkan bahwa kandungan mineral utama *quartz*. Analisis ikatan kimia dengan FT-IR (*Fourier Transform Infrared*) menunjukkan bahwa geopolimer terbentuk ditandai adanya pita vibrasi ulur asimetri Si-O-Si atau Si-O-Al pada 995,27 dan 1002,98 cm^{-1} . Analisis morfologi partikel menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) menunjukkan bahwa geopolimer yang terbentuk didominasi oleh matriks geopolimer, pori dan serat.

Abstract

Synthesis and geopolymer characterization of addition of water hyacinth and aluminum powder (Al) based on coal fly ash has been done. This synthesis is done by variation of addition of water hyacinth and Al powder. The water hyacinth and Al powder used varies between 0.5-3% (w/w) of fly ash and 0-0.5 g of Al powder. The results showed that the optimum $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mole was 4.90 with the addition of 0.2 g of Al powder produced by compressive strength of 32.03 MPa, tensile strength 22.91 MPa, density 15888.09 kg/m^3 and heat conductivity 0.1001 $\text{Watt/m}^2\text{K}$. Optimum fiber addition at 2.5% (w/w) of fly ash with a compressive strength of 27.57 Mpa, tensile strength of 24.11 MPa, density of 1590.26 kg/m^3 and a heat conductivity of 0.0999 $\text{Watt/m}^2\text{K}$. Mineral phase analysis with XRD (*X-Ray Diffraction*) showed that the main mineral content of quartz. Chemical bonding analysis with FT-IR (*Fourier Transform Infrared*) showed that geopolymers formed were characterized by vibration bands Si-O-Si or Si-O-Al asymmetry at 995.27 and 1002.98 cm^{-1} . Particle morphology analysis using SEM (*Scanning Electron Microscopy*) shows that geopolymer is dominated by geopolymer matrix, pores and fibers.

© 2017 Universitas Negeri Semarang

✉ Alamat korespondensi:
Gedung D6 Lantai 2 Kampus Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229
E-mail: yhakim06@gmail.com

Pendahuluan

Abu layang batubara (*fly ash*) merupakan sisa pembakaran batubara yang banyak dihasilkan industri kelistrikan berbasis batubara, industri semen dan industri lainnya. Abu layang batubara belum dimanfaatkan secara maksimal, untuk saat ini pemanfaatannya terbatas antara lain sebagai adsorben, batako, campuran semen dan geopolimer. Geopolimer memiliki kuat tekan yang lebih baik daripada bata, tahan terhadap pemanasan tinggi (Davidovits, 1994), dan tahan terhadap asam (Schmucker dan MacKenzie, 2005). Hal ini menjadikan geopolimer berpotensi untuk bahan bangunan, immobilisator bahan-bahan beracun, peralatan keramik tahan panas, dan lain-lain (Komnitas dan Zaharaki, 2007). Sebagai pengganti semen portland, geopolimer mempunyai sifat getas dengan kekuatan tarik yang rendah dan sensitif terhadap retak.

Kekurangan ini tidak hanya menjadi kendala dalam desain struktural, tetapi juga mempengaruhi daya tahan jangka panjang struktur. Penambahan serat merupakan upaya untuk meningkatkan kekuatan geopolimer. Serat sintesis membutuhkan biaya dan energi lebih untuk memproduksinya sehingga digunakan serat alami yang berasal dari lingkungan sekitar sebagai alternatif salah satunya yaitu serat eceng gondok. Hal ini dikarenakan serat eceng gondok dapat meningkatkan kekuatan mekanik komposit dengan kuat tarik sebesar 18,4 MPa (Rohmawati dan Setyarsih, 2014). Penambahan serbuk aluminium sebagai foaming agent untuk mencegah retakan dengan adanya busa yang dihasilkan. Selain sebagai foaming agent penambahan serbuk aluminium sebagai penentu rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ menjadi 3,4-3,8 dikarenakan pada rasio mol tersebut didapatkan tekan yang baik (De silva *et al.*, 2007).

Metode

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara cetakan silinder plastik, dan oven Memmert, instrument mesin penguji kuat tekan (*universal testing machine*), XRF (*X-Ray Fluorescence*) BRUKER, XRD (*X-Ray Diffraction*) BRUKER 6000, *Thermal Conductivity Analyzer*, SEM (*Scanning Electron Microscopy*) JEOL JSM-6360LA, dan FT-IR (*Fourier Transform Infrared*) Shimadzu 8201 PC. Bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah abu layang batubara yang diambil dari PLTU Tanjungjati Jepara, natrium silikat (Na_2SiO_3), natrium hidroksida (NaOH) *grade pro analyst* buatan Merck, serbuk aluminium (Al) dan aquades (H_2O), serat eceng gondok.

Sintesis geopolimer diawali dengan mengkarakterisasi kandungan kimia dan fasa mineral abu layang batubara. Setelah itu, sintesis geopolimer dilakukan dengan memvariasi penambahan serbuk Al untuk mendapatkan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Sintesis geopolimer dilakukan dengan membuat larutan pengaktif, dengan cara melarutkan NaOH dalam aquades. Setelah itu, Na_2SiO_3 dilarutkan dalam larutan pengaktif, lalu dituangkan ke dalam abu layang batubara bersama serbuk Al optimum dan serat eceng gondok, dan diaduk hingga homogen. Campuran dituang dalam cetakan silinder plastik (diameter : tinggi = 1:2) (Naidu *et al.*, 2012), lalu divibrasi selama 15 menit (Duxson *et al.*, 2007). Hasil pencetakan ini disebut dengan pelet. Pelet didiamkan pada suhu ruang minimal selama 1 jam, lalu dipanaskan dalam oven pada temperatur 60 °C selama 24 jam (Chindaprasirt *et al.*, 2007).

Hasil dan Pembahasan

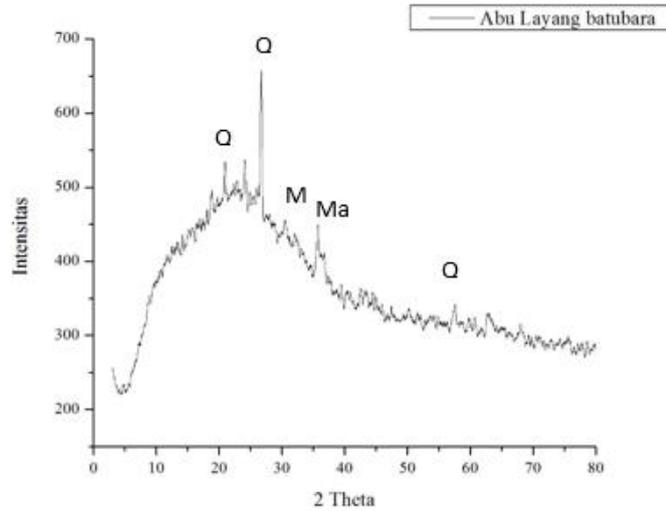
Abu layang batubara yang diambil di PLTU Tanjung Jati B Jepara. Abu layang batubara yang telah diambil berwarna kecoklatan, dan lembab. Oleh karena itu, perlu dilakukan preparasi dan karakterisasi untuk mengetahui kandungan kimianya. Preparasi dilakukan dengan menjemur abu layang batubara selama 2 hari, lalu diayak dan dipanaskan dalam oven pada temperatur 105°C selama 24 jam.

Tabel 1. Kandungan kimia abu layang batubara menggunakan XRF

No.	Nama senyawa	Jumlah (%)
1.	SiO_2	44,94
2.	Al_2O_3	19,10
3.	Fe_2O_3	14,25
4.	CaO	6,64
5.	MgO	4,53
6.	Na_2O	4,14
7.	K_2O	2,38
8.	SO_3	1,33

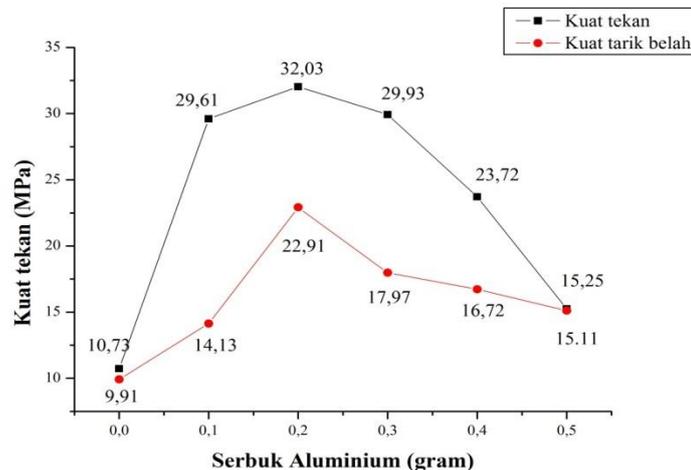
Kandungan kimia abu layang batubara menggunakan XRF (Tabel 1) menyatakan bahwa abu layang batubara memiliki kandungan yang heterogen dengan komponen utama yaitu SiO_2 dan Al_2O_3 seperti pada Tabel 1. Kandungan fasa mineral abu layang batubara menggunakan XRD (Gambar 1) menyatakan bahwa abu layang batubara mempunyai fasa amorf, yang ditandai dengan adanya gundukan pada 2θ antara $20^\circ -$

30°. Abu layang didominasi oleh mineral (Q) *quartz* (SiO_2) yang ditunjukkan oleh puncak pada 2θ 26,6680°; 36,6600°; dan 39,4750° (JCPDS no. 05-0409).



Gambar 1. Difraktogram abu vulkanik dengan Q = *quartz* (SiO_2) M = *mullite* ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), Ma = *magnetite* (FeFe_2O_4)

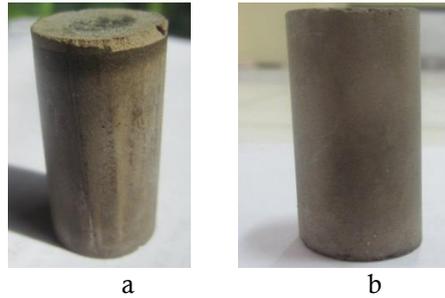
Rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ optimum yang diperoleh saat penambahan serat aluminium (Al) pada sintesis geopolimer, yaitu 4,90 dengan penambahan serbuk Al 0,2 g dihasilkan kuat tekan sebesar 32,03 MPa dan kuat tarik sebesar 22,91 MPa. Gambar 2 merupakan diagram kuat tekan dan kuat tarik penambahan serbuk Al



Gambar 2. Analisis kuat tekan dan kuat tarik geopolimer dengan penambahan serbuk Al

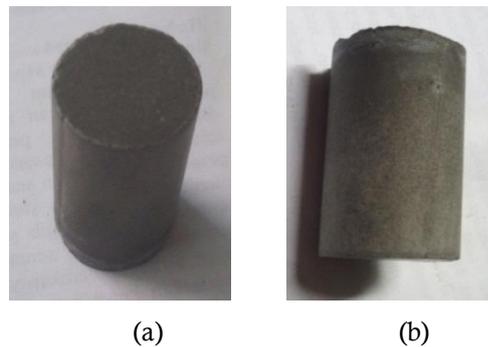
Peningkatan kuat tekan pada penambahan serbuk Al 0,2 g disebabkan karena bertambahnya jumlah Al^{3+} menyediakan lebih banyak aluminat untuk bereaksi dengan jumlah silikat tetap, sehingga memperpanjang rantai geopolimer Si-O-Si-O-Al yang meningkatkan kuat tekan geopolimer.

Gambar 3 merupakan hasil sintesis geopolimer dengan penambahan serbuk Al sebesar 0 dan 0,2 g berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa kedua geopolimer memiliki struktur fisik yang sama perbedaannya pada 0,2 g serbuk Al terdapat serbuk berwarna putih.

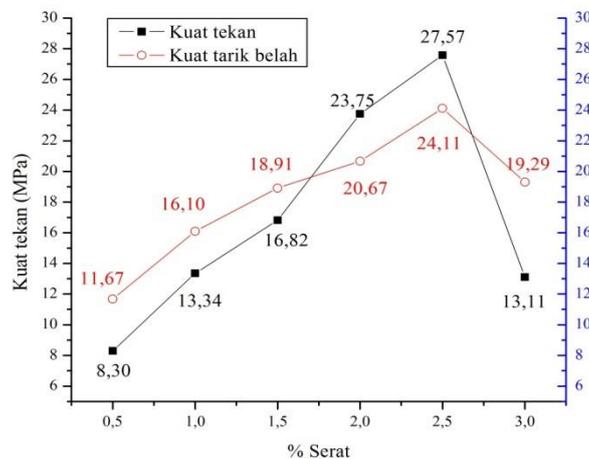


Gambar 3. Hasil sintesis geopolimer penambahan serbuk aluminium (Al) (a) Tanpa penambahan serbuk Al, (b) Penambahan 0,2 g serbuk Al

Hal tersebut disebabkan karena semakin sedikit kandungan silika dan aluminat semakin banyak bereaksi dengan OH⁻, dimana HO-Si berikatan dengan [AlO₄]⁻Na⁺ membentuk Si-O-Al dan melepaskan NaOH. NaOH inilah yang bereaksi kembali dengan udara membentuk Na₂CO₃ dan CaCO₃ berupa endapan putih (Arlis, 2014). Setelah mendapatkan rasio mol SiO₂/Al₂O₃ optimum sintesis geopolimer dilanjutkan dengan penambahan serat eceng gondok untuk mengatasi sifat geopolimer yang getas dengan kekuatan tarik yang rendah dan sensitif terhadap retak. Gambar 4 adalah hasil geopolimer penambahan 0,2 g serbuk Al dan serat eceng gondok

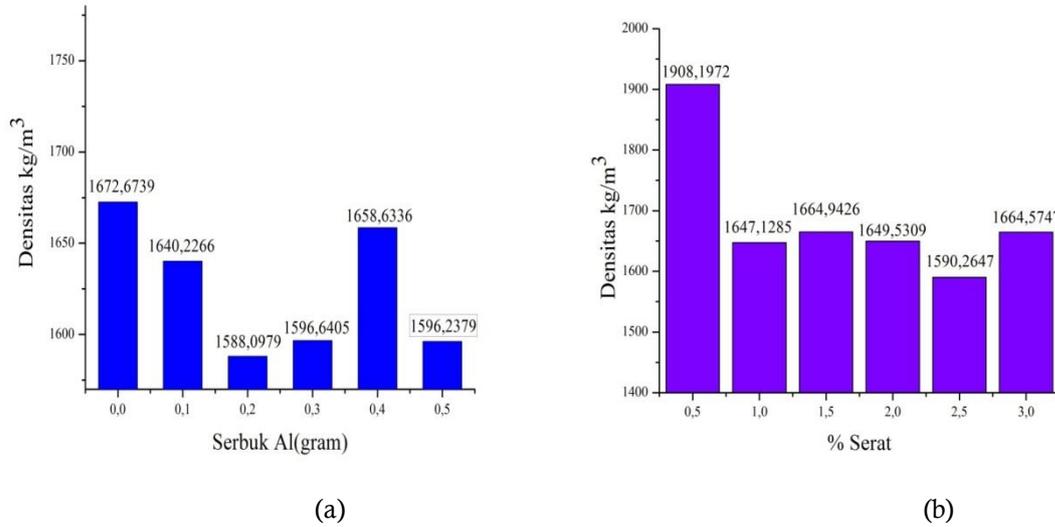


Gambar 4. Hasil sintesis geopolimer penambahan 0,2 g serbuk aluminium dan serat dengan (a) Sampel uji geopolimer penampang diameter, (b) Sampel uji geopolimer penampang panjang diambil pada sampel utuh



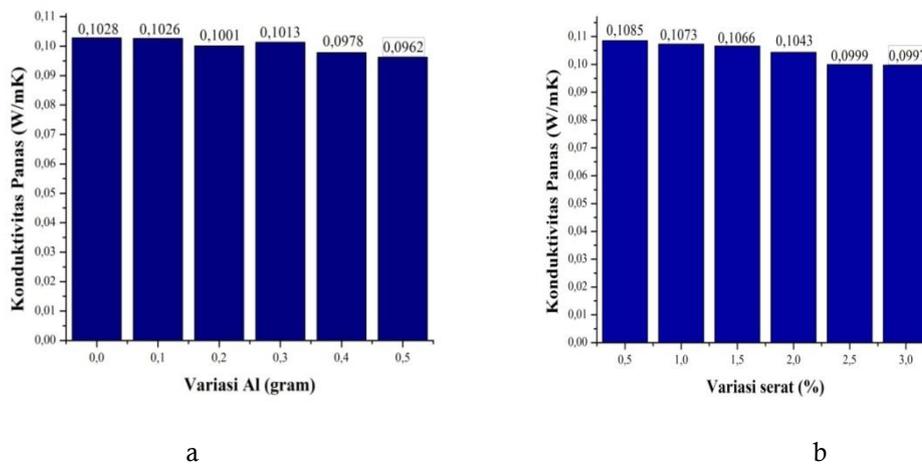
Gambar 5. Analisis kuat tekan dan kuat tarik belah geopolimer dengan penambahan serbuk aluminium dan serat

Pada Gambar 5 menunjukkan hasil perhitungan kuat tekan geopolimer penambahan 0,2 g serbuk Al dan serat eceng gondok. Diharapkan kuat tekan dan kuat tarik optimum pada penambahan serat 2,5 % yaitu sebesar 27,57 MPa dan 24,11 MPa. Penambahan serat pada geopolimer dapat meningkatkan kuat mekanik geopolimer 30-70% jika dibandingkan geopolimer tanpa penambahan serat namun ketika serat telah mencapai batas optimum penurunan akan terjadi secara signifikan (Natalie *et al.*, 2011). Kenaikan kuat tekan dan kuat tarik diakibatkan adanya interaksi antara matriks dengan serat yakni rantai Si-O-Si-O-Al-O yang beraksi dengan gugus OH yang terdapat pada selulosa membentuk ikatan hidrogen (Lie *et al.*, 2013).



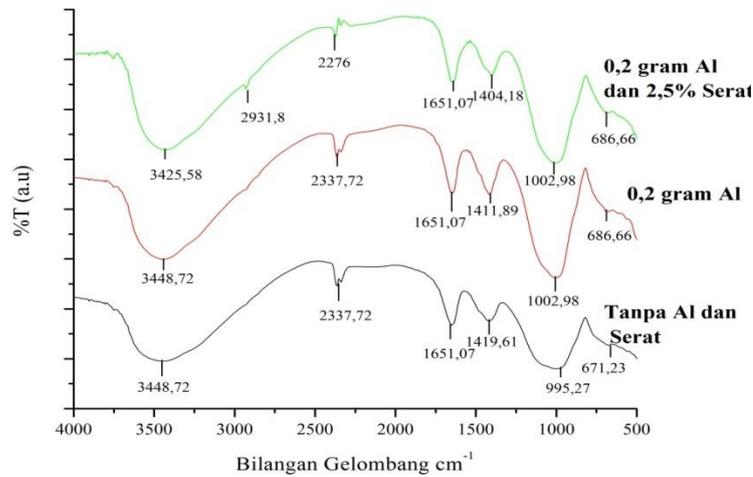
Gambar 6. Diagram densitas geopolimer (a) Penambahan serbuk Al (b) Penambahan serbuk Al 0,2 g dan serat eceng gondok

Gambar 6 merupakan hasil pengukuran densitas geopolimer dengan penambahan serbuk Al dan penambahan serat. Pada penambahan serbuk Al didapatkan nilai densitas paling rendah pada penambahan 0,2 g sebesar 1588,0979 dan pada penambahan serbuk Al 0,2 g dan serat eceng gondok 2,5% didapatkan nilai densitas paling rendah sebesar 1590,2547. Hal ini dikarenakan adanya pori yang dihasilkan dari penambahan serbuk Al yang bereaksi dengan air dan hidroksida membentuk gas H₂ seperti pada reaksi berikut :



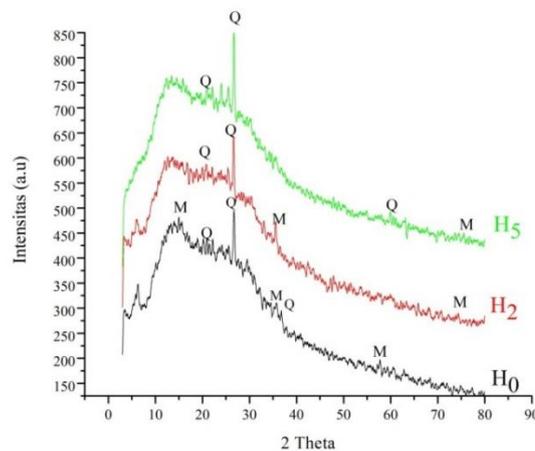
Gambar 7. Diagram konduktivitas panas (a) Penambahan serbuk Al (b) Penambahan 0,2 g serbuk Al dan serat eceng gondok

Gambar 7 merupakan hasil pengukuran konduktivitas panas geopolimer dengan (a) penambahan serbuk Al, (b) penambahan 0,2 g serbuk Al dan serat eceng gondok. Secara keseluruhan nilai konduktivitas panas terus menurun dari penambahan 0,1-0,5 g serbuk Al dan 0,5-3% serat, penurunan konduktivitas panas ini disebabkan karena adanya ruang kosong yang menghambat penghantaran panas. Rongga kosong ini dihasilkan dari penambahan serbuk aluminium. Hal itulah yang menyebabkan nilai konduktivitas panas semakin menurun pada sintesis geopolimer.



Gambar 8. Spektra IR geopolimer dari abu layang batubara PLTU Jepara

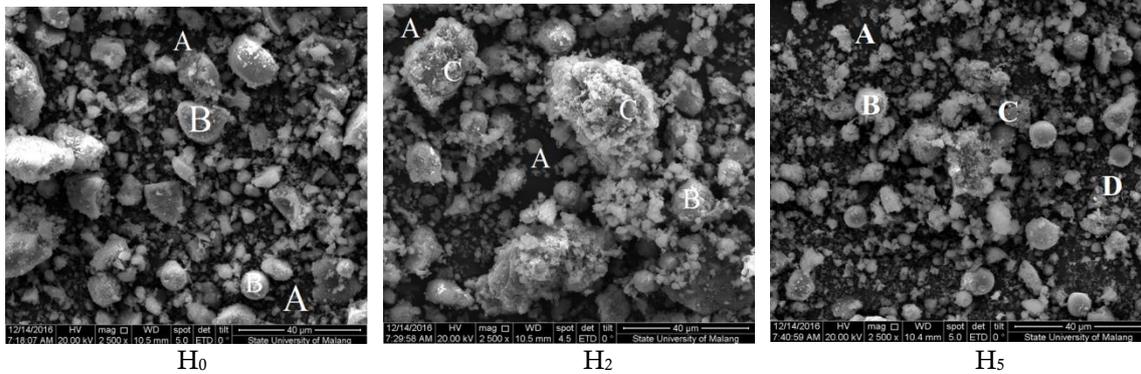
Gambar 8 merupakan gambar spektra FT-IR (*Fourier Transform Infra Red*) sampel geopolimer tanpa penambahan serbuk Al dan serat (H₀), penambahan 0,2 g serbuk Al dan 0% serat (H₂) dan penambahan 0,2 g serbuk Al dan 2,5% serat (H₃). Pita serapan pada 3448,72; 2337,72; 1651,07; 3448,72; 2337,73; 1651,07 cm⁻¹ dan 3425,58; 2276,01; 1651,07cm⁻¹ berturut-turut menunjukkan vibrasi ulur O-H dan vibrasi tekuk H-O-H (Panas & Giannopoulou, 2006). Pita serapan pada daerah 1419,16; 1411,89 dan 1404,18 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi ulur O-C-O dalam Na₂CO₃ yang dihasilkan dari reaksi karbonasi larutan natrium hidroksida (NaOH) dengan udara (Song, 2007). Pada sampel H₃ adanya pita serapan pada daerah 2931,8 cm⁻¹ menunjukkan adanya selulosa yang berasal dari serat yang ditambahkan sebesar 2,5%. Terbentuknya geopolimer dapat ditandai dengan adanya pita serapan pada 995,27; 1002,98; 1002,98 cm⁻¹ yang menunjukkan vibrasi ulur asimetri Si-O-Si atau Si-O-Al (Bakharev, 2005) dan pita serapan pada 671,23; 686,66 dan 686,66 cm⁻¹ yang menunjukkan vibrasi ulur simetris Al-O-Si (Panas *et al.*, 2006).



Gambar 9. Difraktogram Geopolimer dengan sampel H₀, H₂ dan H₅. (Q) quartz (SiO₂) dan (M) mullite (3Al₂O₃.2SiO₂)

Gambar 9 merupakan difraktogram geopolimer dengan kode sampel H₀, H₂ dan H₅. Geopolimer dengan sampel H₂ terbentuk fasa *amorf* yang lebih besar ditandai dengan adanya gundukan (*hump*) pada 2θ sekitar 10°-45° jika dibandingkan dengan geopolimer pada sampel H₀ dan H₅ yang hanya terbentuk gundukan (*hump*) pada 2θ 10°-35° dan 10°-40°. Geopolimer H₂ didominasi mineral *quartz* (SiO₂) ditunjukkan oleh puncak pada 2θ 20,81 dan 26,60 (PDF 05-0490). Mineral *mullite* (3Al₂O₃.2SiO₂) ditunjukkan oleh puncak pada 2θ 35,52 dan 74,36 (PDF 05-0490). Sampel H₀ didominasi oleh mineral (Q) *quartz* (SiO₂) yang ditunjukkan oleh puncak pada 2θ 20,81° dan 26,60° (PDF 05-0490). Mineral (M) *mullite* (3Al₂O₃.2SiO₂) ditunjukkan oleh puncak pada 2θ , 35,52° dan 74,36° (PDF 06-0258). Sedangkan pada sampel H₅ didominasi mineral *quartz* (SiO₂) ditunjukkan oleh puncak pada 2θ 20,96° dan 26,67° (PDF 05-0490).

Gambar 10 merupakan mikrograf SEM (*Scanning Electron Microscopy*)(perbesaran 2500x) dari ketiga sampel geopolimer didominasi oleh matriks geopolimer, pori, pertikel serat dan material yang tidak bereaksi.



Gambar 10. Mikrograf SEM (*Scanning Electron Microscopy*) (Perbesaran 2500). A. matriks geopolimer, B. material yang tidak bereaksi, C. pori-pori, D. serat

Bila dibandingkan dengan material lain yang sudah disintesis seperti pada Tabel 2, geopolimer dengan penambahan serbuk aluminium dan serat eceng gondok ini sudah memenuhi kriteria sebagai material konstruksi yang bersifat isolator panas dengan kuat tekan yang tinggi. Referensi material lain seperti pada Tabel 2, sebagai contoh beton Insulasi (*Insulating Concrete*) memiliki karakteristik konduktivitas panas sangat rendah sebesar 0,07-0,11 W/m²K, mempunyai nilai densitas yang rendah yaitu 300-800 kg/m³ namun kekurangannya kuat tekannya masih rendah yaitu 0,69-6,89 MPa. Hasil sintesis beton ringan lain dengan kekuatan sedang (*Moderate Strength Concrete*), nilai konduktivitas panas sebesar 0,13-0,21 Watt/mK, densitas 800-1440 kg/m³ dan kuat tekan 6,89-17,24 MPa. Beton struktural (*structural concrete*), memiliki nilai konduktivitas panas sebesar 0,23-0,42 W/mK, nilai densitas 1440-1850 kg/m³ dan kuat tekan >17,24. Pada penelitian ini geopolimer optimum adalah pada penambahan serbuk aluminium 0,2 g dengan hasil konduktivitas panas 0,1001 Watt/mK, densitas 1588,098 kg/m³, kuat tekan 32,03 MPa dan pada penambahan serbuk aluminium 0,2 g dan 2,5% serat eceng gondok dengan hasil konduktivitas panas 0,0999 Watt/mK, densitas 1590,265 kg/m³, kuat tekan 27,57 MPa. Dengan demikian hasil penelitian ini menunjukkan bahwa material yang disintesis termasuk beton struktural dan potensial juga untuk beton insulasi (nilai kuat tekan dan densitas memenuhi beton structural, sedangkan konduktivitas panasnya memenuhi beton insulasi).

Tabel 2. Referensi bahan konstruksi *Insulating Material*

Material	Referensi bahan konstruksi <i>Insulating Material</i>		
	Beton insulasi (<i>Insulating concrete</i>) ^a	Beton ringan dengan kekuatan sedang (<i>Moderate strength concrete</i>) ^b	Beton struktural (<i>Structural concrete</i>) ^a
Kuat tekan	0,69-6,89 MPa	6,89-17,24 MPa	>17,24 MPa
Densitas	300-800kg/m ³	800-1440 kg/m ³	1440-1850 kg/m ³
Konduktivitas panas	0,07-0,11 W/m ² K	0,13-0,21 W/m ² K	0,23-0,42 W/m ² K

Sumber : ^aSujoko, 2013; ^cHarjanto *et al.*, 2007

Simpulan

Jumlah serbuk aluminium optimum yang ditambahkan untuk mendapatkan kuat tekan maksimal sebesar 32,03 MPa dan kuat tarik 22,91 MPa yaitu 0,2 g dan jumlah serat optimum yang ditambahkan adalah 2,5% (b/b) abu layang dengan kuat tekan 27,57 MPa dan kuat tarik 24,11 MPa. Secara umum, semakin banyak serbuk aluminium dan serat yang ditambahkan nilai konduktivitas panas menurun dan nilai

densitasnya. Analisis fasa mineral dengan XRD menunjukkan bahwa geopolimer mengandung fasa amorf dengan kandungan mineral utama *quartz*. Analisis ikatan kimia geopolimer dengan FT-IR menunjukkan telah terbentuk rantai geopolimer yang ditandai dengan adanya vibrasi ulur asimetri Si–O–Si atau Si–O–Al. Analisis morfologi partikel menggunakan SEM menunjukkan bahwa geopolimer yang terbentuk didominasi oleh matriks geopolimer, pori, partikel serat dan material yang tidak bereaksi.

Daftar Pustaka

- Arlis, P.N. 2012. Optimasi Nilai Kuat Tekan Fleksural Geopolimer Abu Terbang Suralaya terhadap Variable Alkali, Konsentrasi Alkali dan Suhu Curing. *Skripsi*. Depok: Universitas Indonesia
- Bakharev, T., 2005. Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions. *Cement and Concrete Research*, 35: 1233-1246
- Chindapasirt, P., Chareerat, T., dan Sirivivatnanon, V. 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 29: 224-229
- Davidovits, J. 1994. Geopolimers: Man-Made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *Journal of Materials Education*, 16(2&3): 91-139
- De Silva, P., K. Sagoe-Crenstil, K. dan V. Sirivivatnanon. 2007. Kinetic of Geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 . *Cement and Concrete Research*, 37: 512-518
- Duxson, P., S.W. Mallicoat, G.C. Lukey, W.M. Kriven, & J.S.J. Van Deventer. 2007. The Effect of Alkali And Si/Al Ratio on The Development of Mechanical Properties of Metakaolin-Based Geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 292: 8-20
- 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
- Komnitas, K. dan Zaharaki, D. 2007. Geopolimerisation: A Review Prospects for the Minerals Industry. *Mineral Engineering*, 20: 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 November, Surabaya
- Naidu, G., A.S.S.N. Prasad, S. Adishesu, & P.V.V. Satyanarayana. 2012. A Study on Strength Properties of Geopolymer Concrete with Addition of G.G.B.S. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2 (4):19-28
- Natalie, A., Manzi, S., dan Bignozzi, M.C. 2011. *Nobel Fiber-Reinforced Composite Material Based on Sustainable Geopolymer Matrix*. Procedia Engineering. Italy: University Bologna.
- Panias, D. dan I. Giannopoulou. 2006. Development of Inorganic Polymeric Materials based on Fired Coal Fly Ash. *Acta Metallurgica Slovaca*, 12: 321-327
- Panias, D., Giannopoulou, I.P., Perraki, T. 2007. Effect of Synthesis Parameters on the Mechanical Properties of Fly Ash-based Geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 301:246-254
- Rohmawati, L. dan Setryarsi, W. 2014. Studi Kekuatan Mekanik Komposit Serat Alam/Resin Epoxy. *Journal Berkala Fisika Indonesia*, 6(2): 40-46
- Song, X. 2007. Development and Performance of Class F Fly Ash based Geopolymer Concretes against Sulphuric Acid Attack. *Thesis*. Australia: School of Civil and Environmental Engineering the University of New South Wales Sydney
- Sujoko, S.F. 2013 Pengaruh Partial Replacement Pasir dengan Breaksi Batu Apung terhadap Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton Ringan. *Skripsi*. Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta
- Weber, H., De Grave, I., & Rohl, E. 2005. *Foamed Plastics, Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA. Weinheim