

Pengaruh Penambahan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ pada Homogenitas Matriks Geopolimer

A. Indra Wulan Sari R, Abdul Haris, dan Subaer*
Pusat Penelitian Geopolimer - Lab. Fisika Material,
Jurusan Fisika-FMIPA Universitas Negeri Makassar
Jl. Daeng Tata Raya, Makassar 90223

Telah dilakukan penelitian tentang struktur mikro geopolimer dengan bahan adisi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Bahan dasar yang digunakan adalah metakaolin yang diperoleh dari dehidroksilasi mineral kaolin pada suhu 750°C selama 6 jam. Mineral $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ diperoleh dari metakaolin melalui prosedur ekstraksi yang dikembangkan dalam penelitian ini. Studi ini bertujuan untuk mempelajari morfologi dan homogenitas matriks geopolimer dengan atau tanpa bahan adisi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Sintesis geopolimer dilakukan melalui metode aktivasi larutan alkali metakaolin. Mineral $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ditambahkan ke dalam pasta geopolimer, diaduk perlahan hingga campuran bersifat homogeny kemudian dicuring pada suhu 60°C selama 1 jam. Karakterisasi dengan XRD dilakukan untuk mempelajari fase bahan dasar kaolin, metakaolin, mineral $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, serta produk geopolimer. Hasil karakterisasi dengan XRD memperlihatkan bahwa prosedur ekstraksi berhasil menghasilkan $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dengan persentase antara 7 - 12 wt%. Sampel geopolimer yang diproduksi dan berusia 28 hari selanjutnya dikarakterisasi dengan menggunakan SEM-EDS. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa sampel geopolimer dengan bahan adisi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ memiliki struktur mikro permukaan (matriks) yang lebih homogen dibandingkan geopolimer tanpa adisi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Hasil ini diharapkan berkorelasi positif dengan sifat fisis dan mekanik geopolimer.

ABSTRACT

A study has been conducted on microstructure of geopolymers added with $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Precursor used was metakaolin which produced through dehydroxilation of kaolin at 750°C for 6 hours. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ mineral was extracted from metakaolin using a procedure developed in this study. The aims of this study was to investigate the morphology and the homogeneity of geopolimer matrix with and without the addition $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Geopolymers were synthesized by using alkali activation of metakaolin. $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ mineral was poured into geopolimer paste, stirred gently until the mixture homogenous followed by curing at 60°C for 1 hour. X-Ray Diffraction characterization was used to examine the phase of kaolin, metakaolin, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, and geopolimer produced. The results showed that the extraction procedure were able to produced 7 - 12 wt% of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ mineral. Geopolymers sample produced and aged 28 days were characterized using SEM-EDS. The results showed the matrix of samples with $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ was more homogenous that those without $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. These results are expected to have positive correlation with physical and mechanical properties of geopolymers.

KATA KUNCI: $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ extraction, metakaolin, geopolimer, microstructure, homogeneous

I. PENDAHULUAN

Material geopolimer menjadi salah satu topik penelitian yang semakin intensif dikembangkan sebagai material rekayasa untuk berbagai aplikasi dalam kehidupan sehari-hari. Hal ini dikarenakan potensi aplikasinya yang sangat luas, baik dalam bentuk murni maupun dengan tambahan penguat (*reinforced*). Salah satu material rekayasa yang dikembangkan dengan memanfaatkan geopolimer sebagai prekursor adalah komposit geopolimer. Komposit sendiri merupakan material rekayasa yang banyak dikembangkan karena mampu menggabungkan beberapa sifat material yang sangat berbeda karakteristiknya menjadi sifat yang baru dan sesuai dengan yang dikehendaki. Namun demikian, sebagai material dasar kom-

posit, geopolimer juga ditemukan mudah pecah dan memiliki kekuatan tarik yang rendah [1]. Salah satu upaya yang banyak diteliti untuk memperbaiki sifat mekanik komposit geopolimer adalah penambahan serat pendek seperti *polyvinyl alcohol* (PVA), *polypropylene* (PP), serat basalt serta serat karbon. Kehadiran serat sebagai agregat matriks komposit geopolimer berperan untuk mencegah keretakan serta menambah kekuatan tarik matriks geopolimer [2]. Dias [3] melaporkan peningkatan kekuatan tarik beton geopolimer yang diperkuat dengan serat basalt. Zhao, *et al.* juga menemukan bahwa penambahan 10 vol% serat pendek Nextel 610 mampu meningkatkan kuat tarik dan kekerasan matriks geopolimer [1]. Hasil-hasil penelitian ini menunjukkan bahwa optimalisasi matriks akan meningkatkan sifat mekanik komposit geopolimer. Penelitian ini memanfaatkan material $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ sebagai adisi matriks geopolimer. Penelitian terbaru yang dilakukan oleh Hosseini, *et al.* menunjukkan bahwa mineral $\gamma\text{-Alumina}$ ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) dapat disintesis dari mineral kaolin ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). $\gamma\text{-Alumina}$ diperoleh dengan mengek-

*E-MAIL: jzubayir@yahoo.com

straksi alumina dari metakaolin menggunakan H_2SO_4 serta etanol sebagai agen aluminium sulfat [4]. Merujuk hasil penelitian di atas, penelitian ini diarahkan untuk melihat pengaruh penambahan $\gamma-Al_2O_3$ terhadap homogenitas matriks geopolimer.

II. DASAR TEORI

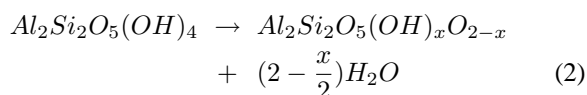
Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits, diawal tahun 1980-an [5]. Geopolimer termasuk *inorganic polymer* yang didefinisikan sebagai polimer yang atom-atom utamanya tidak tersusun atas rantai karbon dan terhubung antara yang satu dengan yang lainnya melalui ikatan kovalen. Geopolimerisasi melibatkan reaksi kimia berbagai oksida aluminasilikat (Al^{3+} dalam koordinasi IV) dengan larutan silikat pada kondisi alkali tinggi, dan menghasilkan material polimerik dengan ikatan Si-O-Al-Si [5, 6]. Material yang dihasilkan memiliki struktur amorf dengan jaringan polimer tiga-dimensi. Material baru ini digolongkan sebagai keluarga *poly(sialate)* (PS) yang terdiri atas jaringan tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 dengan membagi rata semua atom oksigen serta berasosiasi dengan ion Na^+ atau K^+ . Model polimerik geopolimer serupa dengan formasi pembentukan zeolite. Rumus empiris dari *poly(sialate)* dinyatakan sebagai berikut [5].

$$M_n [(-SiO_2)_z - AlO_2]_n \cdot wH_2O \quad (1)$$

M_n adalah kation (elemen alkali), n derajat polikondensasi, $w \leq 3$, dan $z = 1, 2$ atau 3 .

Menurut Davidovits, (1991) [5] geopolimer terdiri atas *poly(sialate)* dasar dengan struktur jaringan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Kristalin *poly(sialate)* dapat diperoleh secara hidrotermal, sedangkan pengerasan (*setting*) pada temperatur tinggi akan menghasilkan sistem amorf atau gelas yang derajat ketidakteraturan atom-atom penyusunnya dapat dipelajari dengan XRD.

Struktur kaolin dibentuk oleh lapisan-lapisan berulang dan diikat oleh gaya elektrostatik dan membentuk struktur tiga dimensi. Lembaran tetrahedral dibentuk oleh ion Si^{4+} yang berkoordinasi dengan anion O^{2-} dan lembaran oktahedral dibentuk oleh kation Al^{3+} yang berkoordinasi dengan anion OH^- . Kedua lembaran dihubungkan oleh oksigen yang berasal dari lembaran tetrahedral. Metakaolin merupakan produk dehidroksilasi dari kaolin. Proses dehidroksilasi kebanyakan kaolin berlangsung pada temperatur $500^\circ C$ dan diikuti oleh kehilangan berat sekitar 14%. Reaksi eksotermal dehidroksilasi kaolin dinyatakan menurut persamaan,



dengan nilai x sekitar 10% dari residu grup hidroksil di dalam metakaolin. Reaktivitas metakaolin sangat bergantung pada parameter kalsinasi seperti temperatur, waktu, dan jenis *kiln* yang digunakan. Temperatur kalsinasi yang ideal terletak antara 700 dan $800^\circ C$ dengan waktu kalsinasi sekitar 6 jam. Kalsinasi kaolin di bawah $700^\circ C$ serta proses kalsinasi yang

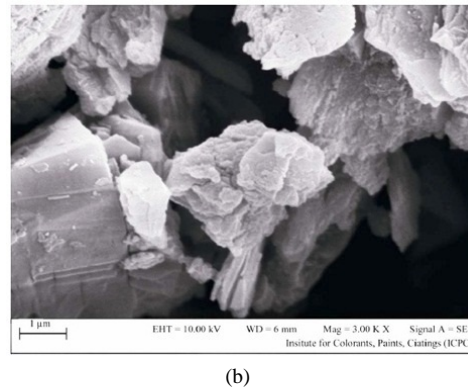
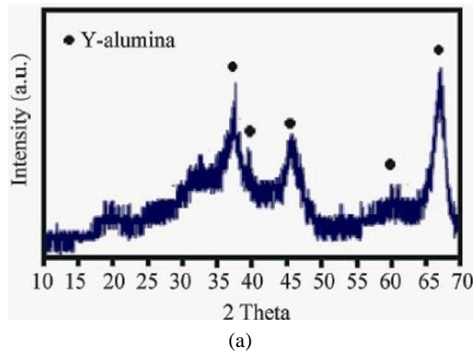
cepat dengan *rotary kiln* akan menghasilkan metakaolin yang kekurangan Al koordinasi IV-V dan sulit bereaksi dengan sodium atau potasium silikat [7].

Alumina (Al_2O_3) merupakan salah satu mineral utama dunia industri dan teknologi, khususnya yang berkaitan dengan sintesis keramik dan komposit. Terdapat dua modifikasi fase kristalin Al_2O_3 yakni $\gamma-Al_2O_3$ dan $\alpha-Al_2O_3$. Fase $\alpha-Al_2O_3$ memiliki tingkat kristalin yang tinggi dan merupakan fase alumina paling stabil secara termodinamika. Tingkat kekristalan fase $\gamma-Al_2O_3$ lebih rendah dan mudah larut dalam larutan alkali.

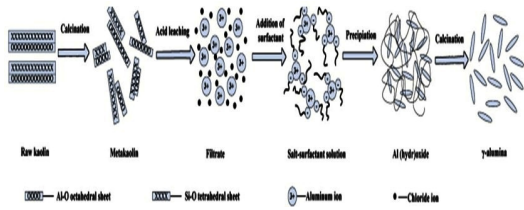
Alumina adalah material keramik dengan sifat isolator termal dan listrik yang menunjukkan *chemical inertness* yang sangat baik dan transparansi optik yang tinggi. Alumina terdiri dari beberapa fase metastabil ($\kappa, \chi, \theta, \eta, \gamma, \delta$) dan fase yang paling stabil secara termodinamika yaitu fase α dengan titik leleh tinggi ($2047^\circ C$) dan memiliki kekerasan relatif tinggi. Jumlah fase metastabil terjadi dengan meningkatnya temperatur annealing sampai pada pembentukan fase $\alpha-Al_2O_3$ stabil dan rentang suhu keberadaannya bergantung pada kedua komposisi dan struktur awal bahan (*diaspore, gibbsite, tohidit, boehmite, bayerite*) [8].

Sumber utama oksida alumina adalah mineral bauxites yang diekstrak melalui proses Bayer. Sintesis alumina dari mineral non-bauxites seperti *alunite, sillimanite, andalusite, kyanite, kaolin, mica*, dan *fly ash* banyak mendapat perhatian akhir-akhir ini dengan menggunakan sulfates, nitrates, dan chlorides sebagai prekursor alumina. Alumina yang dihasilkan memiliki tingkat kemurnian yang tinggi [1]. Hal ini sangat menguntungkan karena selain jumlah mineral non-bauxite berlimpah, proses sintesis tidak memerlukan energi tinggi. $\gamma-Al_2O_3$ merupakan sumber produksi material berukuran nano, digunakan sebagai katalis dan substrat katalis pada industri otomotif dan petroleum, komposit struktural untuk pesawat terbang, pelapis (coating) abrasif dan *thermal wear*. Fase tunggal serbuk $\gamma-Al_2O_3$ dapat menurunkan temperatur densifikasi dibandingkan dengan fase $\alpha-Al_2O_3$. Pada umumnya, mineral kaolin mengandung sekitar 20 - 26 wt% alumina. Produksi $\gamma-Al_2O_3$ dari mineral kaolin akan dilakukan menurut prosedur yang dikembangkan oleh Hosseini, (2011) [4]. Tingkat kekristalan dan kemurnian $\gamma-Al_2O_3$ yang diproduksi diukur dengan menggunakan XRD dan XRF sedangkan morfologi struktur mikronya diukur dengan menggunakan SEM. Gambar 1 memperlihatkan difraktogram dan morfologi $\gamma-Al_2O_3$ yang diproduksi dari kaolin [4]. Kinerja oksida logam, sebagai katalis dan substrat katalis sangat tergantung dari struktur kristal dan sifat teksturnya.

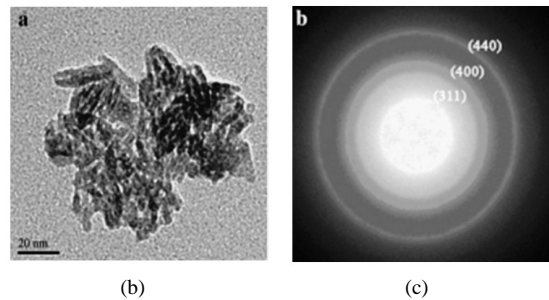
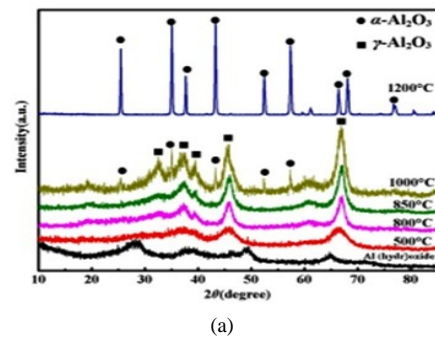
Prosedur ekstraksi $\gamma-Al_2O_3$ dari mineral kaolin lainnya dikembangkan oleh Yang, (2009) [9]. Prosedur sintesis nano $\gamma-Al_2O_3$ berasal dari kaolin yang telah dikalsinasi dengan bantuan zat asam. Aluminium hidroksida dipresipitasi dengan amonia dari proses pelepasan *polyethylene glycol*. Serbuk putih dari partikel nano $\gamma-Al_2O_3$ diamati setelah dikalsinasi, adapun karakterisasi yang dilakukan menggunakan XRD, DSC-TG, TEM, FTIR dan MAS NMR. $\gamma-Al_2O_3$ yang dihasilkan menunjukkan morfologi seperti batang dengan lebar 7 nm dan panjang sekitar 20 nm. Kaolin tersebut lalu dikalsinasi menjadi metakaolin dengan laju pemanasan $10^\circ C$ /menit



Gambar 1: (a) Difraktogram $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, (b) Morfologi mikro $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ yang diproduksi dari kaolin [4].



Gambar 2: Skema mekanisme sintesis $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.



dan suhu tersebut bertahan selama 3 jam. Metakaolin lalu diaktivasi dengan HCl 6M pada suhu 90°C dan distirrer selama 2,5 jam, larutan tersebut lalu difilter dan hasil filtrasi yang terkumpul menghasilkan aluminium hidroksida. Setelah penambahan *polyethylene glycol* (PEG, massa molar 6000), amonia 2,6 M kemudian ditambahkan. Hasil presipitasi dicuci dengan menggunakan aquades dan dikeringkan, selanjutnya dikalsinasi hingga menghasilkan partikel nano $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Gambar 2 menunjukkan mekanisme sintesis $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, mulai dari dehidrosilasi kaolin hingga menjadi metakaolin. Pada proses dehidrosilasi, terjadi perubahan fasa dari kristal menjadi amorf dan gugus hidroksil dari kaolin dilepaskan menjadi metakaolin. Berikutnya proses filtrasi dengan menggunakan asam kuat yang bertujuan untuk memisahkan antara kandungan silika dan alumina yang terdapat pada metakaolin. Selanjutnya proses presipitasi aluminium sulfat dengan menggunakan alkohol dan dicuci dengan aquades. Setelah proses presipitasi dilanjutkan dengan proses kalsinasi.

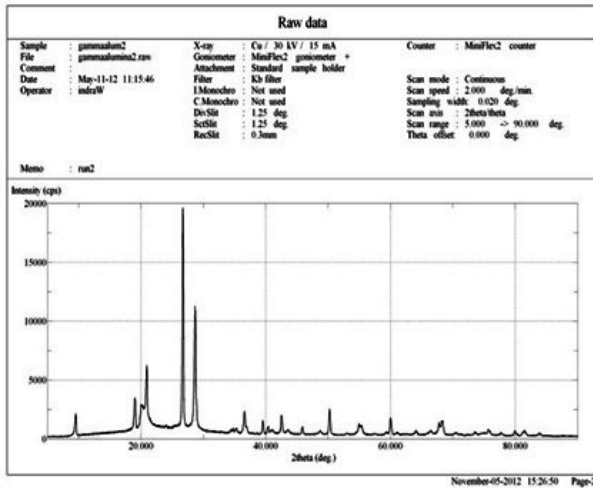
Gambar 3(a) memperlihatkan difraktogram sinar-x yang menunjukkan fasa $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ yang terletak pada rentang sudut 2θ , antara 20-70°. Pada Gambar 3(b) tampak morfologi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ yang berbentuk batang yang diambil dengan TEM. Difraksi elektron (Gambar 3(c)) memperlihatkan bahwa $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ bersifat amorf.

III. METODOLOGI

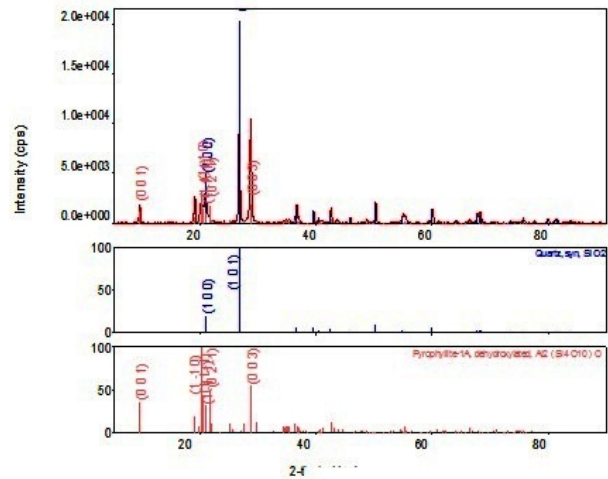
Penelitian ini diarahkan untuk mensintesis komposit geopolimer dengan agregat $\gamma\text{-Alumina}$ (Al_2O_3). $\gamma\text{-Alumina}$ diperoleh dengan mengekstraksi kaolin dengan menggunakan

Gambar 3: (a)Difraktogram $\text{Al}(\text{hydr})\text{oxide}$ dan setelah dikalsinasi pada temperatur yang berbeda. (b) Gambar TEM dari $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (c) pola SAED.

dua prosedur yaitu prosedur yang dikembangkan oleh Hosseini [4] dan prosedur yang dikembangkan oleh Yang [9]. Hasil sintesis komposit geopolimer kemudian dikarakterisasi dengan menggunakan SEM-EDS (Tescan Vega3SB) untuk mengetahui struktur mikro dan morfologi komposit serta komposisi elementalnya. Serta dilakukan karakterisasi XRD (Rigaku MiniFlexII) untuk memperoleh informasi kualitatif dan kuantitatif fase yang terbentuk dari proses ekstraksi alumina. XRD dilakukan pada sudut 2θ antara 5-80° dengan *scan speed* 2°/s dan step 0,02°. Sintesis komposit geopolimer dilakukan melalui metode aktivasi larutan alkali mineral metakaolin. Mineral $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ditambahkan ke dalam campuran pasta geopolimer, diaduk perlahan hingga campuran bersifat homogen lalu dimasukkan ke dalam cetakan plas-

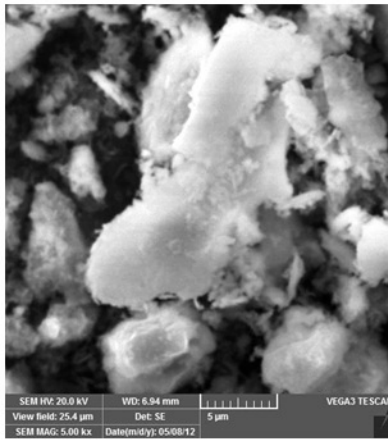


(a)



(b)

Gambar 4: Difraktogram hasil ekstraksi γ -Al₂O₃ (eks-1). (a) Hasil pengukuran (b) Analisis dengan *search and match*.



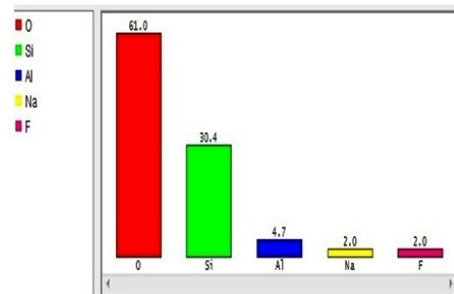
Gambar 5: Foto SEM hasil ekstraksi γ -Al₂O₃ (eks-1).

tik polycarbonate, diikuti dengan curing pada suhu 60°C selama 1 jam. Selama proses curing berlangsung air reaksi dipertahankan dengan menutup cetakan rapat-rapat. Karakterisasi dengan XRD dilakukan dengan mempelajari fase bahan dasar kaolin dan metakaolin, mineral γ -Al₂O₃ yang diperoleh dari hasil ekstraksi, serta produk geopolimer.

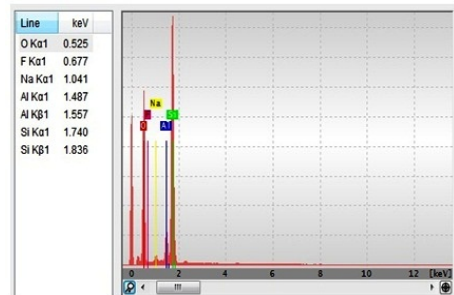
IV. HASIL DAN DISKUSI

Penelitian ini menggunakan dua prosedur ekstraksi γ -alumina, yaitu prosedur ekstraksi 1 (eks-1) yang dikembangkan oleh Hosseini [4] dan prosedur ekstraksi 2 (eks-2) yang dikembangkan oleh Yang [9].

Difraktogram hasil ekstraksi 1 ditunjukkan Gambar 4. Gambar 4 menunjukkan bahwa setelah dilakukan *autosearch* dengan PDXL 2 tampak bahwa fasa dominan hasil ekstraksi 1 adalah *pyrophyllite-1A dehydroxylated* (Al₂(Si₄O₁₀)O). Hal



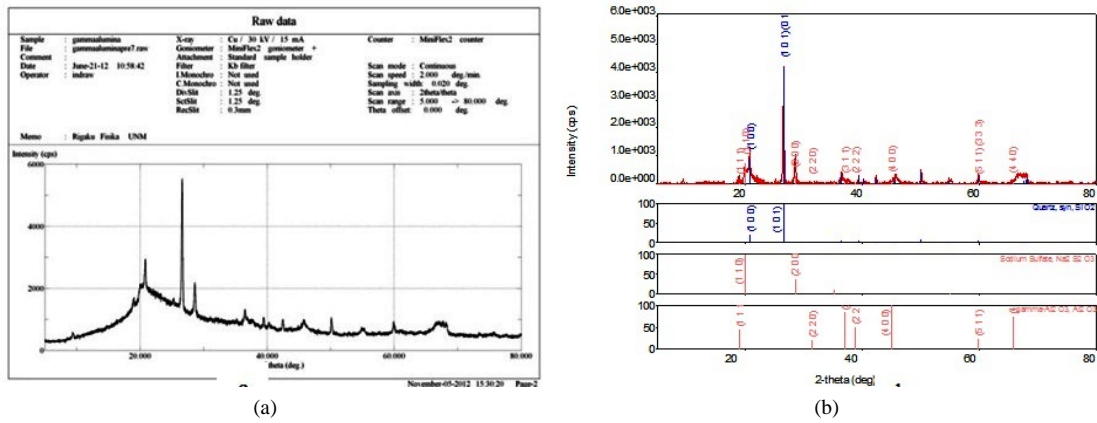
(a)



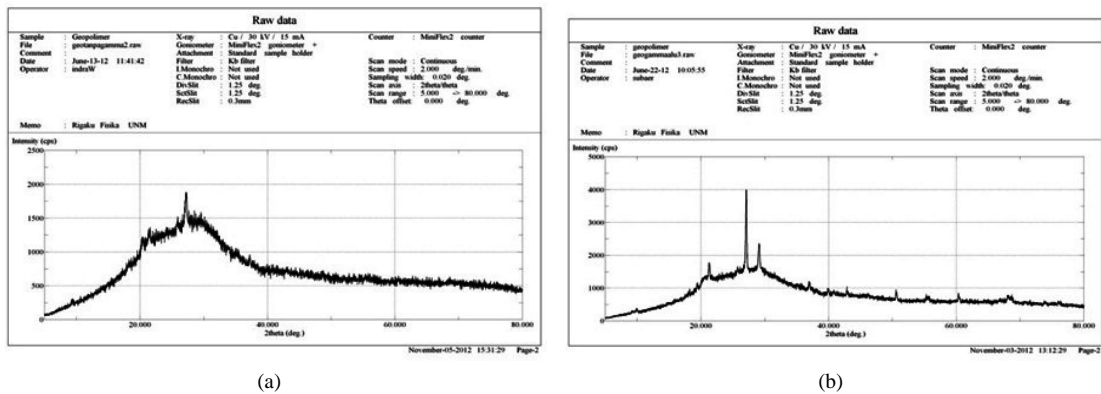
(b)

Gambar 6: (a) Bar chart komposisi elemental (b) Spektrum EDS hasil ekstraksi γ -Al₂O₃ (eks-1).

ini menunjukkan bahwa hasil ekstraksi dengan prosedur eks-1 belum menunjukkan terbentuknya fase γ -Al₂O₃. Fasa *pyrophyllite* yang terbentuk masih memiliki gugus hidroksil walaupun menggunakan prekursor yang disintering hingga suhu 800°C dan 850°C, namun sifat kristal dari kaolin justru kembali muncul di atas suhu 750°C. Hal ini juga menunjukkan bahwa larutan asam sulfat 2M yang digunakan tidak mampu memisahkan antara kandungan alumina dan silika dari prekursor dengan baik. Selain itu juga terlihat fasa *quartz syn* (SiO₂) pada sudut 2θ sebesar 26,709° dengan intensitas sebe-



Gambar 7: Difraktogram hasil ekstraksi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (eks-2) (a) sebelum *Search and Match* (b) setelah *Search and Match*.



Gambar 8: Difraktogram hasil ekstraksi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (eks-2) (a) tanpa agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (b) dengan agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

sar 13649 counts. Fasa ini merupakan pengotor yang berasal dari kaolin yang digunakan.

Gambar 5 menunjukkan bahwa butir yang terlihat dari hasil ekstraksi tidak homogen. Adapun *bar chart* dengan menggunakan EDS (Gambar 6) menunjukkan bahwa elemen dengan komposisi terbanyak adalah oksigen. Aluminium dalam bentuk unsur ditemukan sebesar 4,7%wt, silikon 30,4%wt, natrium 2,0%wt dan fluor 2,0%wt.

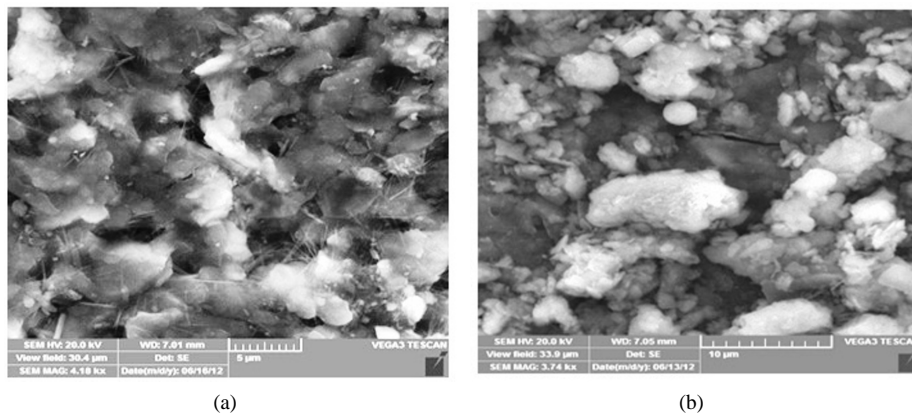
Gambar 7 menunjukkan difraktogram hasil ekstraksi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dengan menggunakan prosedur ekstraksi 2 (eks-2) yang merunut pada prosedur ekstraksi yang dikembangkan oleh Yang [9]. Hasil *search and match* dengan PDXL 2 menunjukkan bahwa hasil ekstraksi $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dengan kode prosedur eks-2, fasa yang terbentuk berupa $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ yang berada pada rentang sudut 2θ antara $35\text{-}70^\circ$.

Fasa lain yang muncul adalah fasa *quartz syn* (SiO_2) yang sebenarnya merupakan pengotor yang berasal dari kaolin yang digunakan (kaolin yang disuplai dari Intraco, Makassar) yang akan tetap ada pada hasil ekstraksi. Gambar 8(a) merupakan difraktogram geopolimer tanpa agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Dari gambar tersebut tampak bahwa geopolimer tanpa agregat ini bersifat amorf. Fasa yang terbentuk didominasi oleh fasa silicon dioxide yang berasal dari kaolin yang digunakan. Sedangkan Gambar 8(b) menunjukkan difraktogram kom-

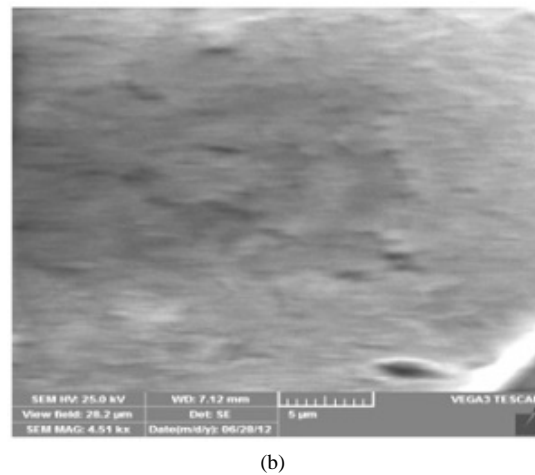
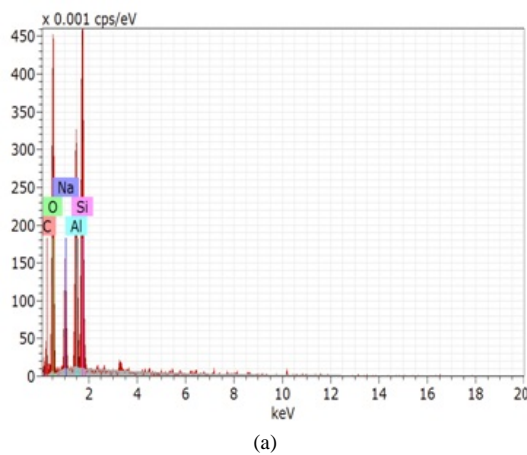
posit geopolimer dengan agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Selain itu, juga tampak bahwa *hump* (gundukan) difraksi berbeda dengan *hump* pada Gambar 8(a). Hal ini dikarenakan kehadiran $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ merubah jaringan matriks geopolimer.

Gambar 9(b) merupakan foto SEM sampel komposit geopolimer dengan agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (KG2D). Berdasarkan gambar tampak bahwa agregat belum menyatu dengan matriks melainkan hanya melekat pada matriks geopolimernya. Jika dibandingkan dengan Gambar 9(a) terlihat bahwa kondisi permukaan matriks geopolimer menjadi lebih baik dengan keberadaan agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Spektrum EDS menunjukkan bahwa komposit geopolimer dengan agregat Al_2O_3 (KG2D) secara elemental komposisinya terdiri dari atom Silikon sebesar 3,37%wt, aluminium 2,89%wt, dan sodium sebesar 3,00%wt.

Pada sampel KG2D, kehadiran agregat berpengaruh terhadap perbaikan struktur mikro permukaan matriks, namun agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ yang ditambahkan hanya melekat di permukaan matriks. Adapun sampel KG4D yang ditunjukkan pada Gambar 10 menunjukkan bahwa struktur mikro permukaan sampel jauh lebih homogen dibandingkan dengan KG2D. Morfologi ini menyerupai morfologi gelas yang dibuat dari bahan Na_2O_3 [10].



Gambar 9: Foto SEM sampel geopolimer (a) tanpa agregat (KG2T), (b) dengan agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (KG2D).



Gambar 10: (a) Spektrum EDS komposit geopolimer dengan agregat (KG2D), (b) komposit geopolimer dengan agregat (KG4D).

V. SIMPULAN

Telah disintesis mineral $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ dari bahan dasar mineral kaolin serta komposit geopolimer dengan bahan dasar metakaolin dengan adisi agregat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Penambahan agre-

gat $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ pada komposit geopolimer mampu memperbaiki struktur permukaan matriks geopolimer ditandai dengan berkurangnya pori dan tidak ditemukannya kristal *sodium carbonate* yang tumbuh di permukaan matriks.

[1] Q. Zhao, *et al.*, J. Mater. Sci., **42**, 3131-3137 (2007).
 [2] Y. Zhang, *et al.*, Build. Mater., **22**, 370-383 (2008).
 [3] D.P. Dias, and C. Thaumaturgo, Cement Concrete Compos, **27**, 49-54 (2005).
 [4] S.A. Hosseini, A. Niaei, and D. Salari, Open Journal of Physical Chemistry, **1**, 23-27 (2011).
 [5] J. Davidovits, Journal of thermal analysis, **37**, 1633-1656 (1991).
 [6] Subaer, and A. van Riessen, J. Mater. Sci., **42**, 3117-3123 (2006).
 [7] Kamisawati, *Sintesis dan Karakterisasi Keramik Geopolimer Berbahan Dasar Kaolin dan Pasir Kuarsa dengan Difraksi Sinar-X*, Skripsi, Universitas Negeri Makassar, 2010.
 [8] J. Musil, *et al.*, Thermal stability of alumina thin film containing $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase prepared by reactive magnetron sputtering, Applied Surface Science, (2010). [sciencedirect]
 [9] H. Yang, M. Liu, and J. Ouyang, Novel synthesis and characterization of nanosized $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ from kaolin, Applied Clay Science (2009). [science direct]
 [10] Subaer, *Pengantar Fisika Geopolimer* (DP2M Dikti Jakarta, 2007).