

KARAKTERISASI MINERAL AMPAS SERTA EVALUASINYA UNTUK PEMBUATAN MATERIAL GEOPOLIMER BANGUNAN

Muchtar Aziz

Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara "tek-MIRA"
Jl. Jend. Sudirman No. 623, Bandung
muchtar@tekmira.esdm.go.id, aziz.muchtar@gmail.com

ABSTRAK

KARAKTERISASI MINERAL AMPAS SERTA EVALUASINYA UNTUK PEMBUATAN MINERAL GEOPOLIMER BANGUNAN. Karakterisasi terhadap tiga jenis mineral ampas yang akan digunakan sebagai bahan baku pembuatan bahan geopolimer telah dilakukan. Bahan baku yang dikarakterisasi terdiri dari residu bauksit (*red mud*) dan ampas pencucian bauksit (asal Tayan, Kalbar) serta abu layang PLTU (asal Asam-asam, Kalsel). Hasil karakterisasi menunjukkan ketiga jenis mineral ampas mengandung alumina (Al_2O_3) dan atau silikat (SiO_2) relatif tinggi; ampas pencucian bauksit mengandung 32 % Al_2O_3 dan 40 % SiO_2 , residu bauksit 25 % Al_2O_3 dan 3 % SiO_2 , serta abu layang 10 % Al_2O_3 dan 42 % SiO_2 . Alumina dan silika merupakan komponen utama pembentuk material (aluminosilikat) geopolimer. Abu layang mengandung 10 % alumina reaktif dan 42 % silika reaktif dan ampas pencucian bauksit mengandung sekitar 8 % silika reaktif. Alumina reaktif dan silika reaktif berpotensi membantu mempercepat pembentukan material geopolimer. Ampas pencucian bauksit mengandung fraksi kasar (-12 +60 mesh) sekitar 69 %, berpotensi sebagai *grog*. Residu bauksit dan abu layang berukuran butir halus (residu bauksit 80 % -200 mesh, abu layang -200 mesh), berpotensi sebagai pengisi rongga diantara *grog* sehingga menghasilkan produk berkekuatan tekan yang baik. Kandungan 6,35 % Na_2O residu bauksit membantu mengurangi pemakaian larutan alkali sehingga mengurangi ongkos pembuatan bahan geopolimer. Hasil pemeriksaan toksitas dan radioaktifitas menunjukkan residu bauksit, ampas pencucian bauksit dan abu layang aman dari sifat toksik dan radioaktifitas. Hasil karakterisasi secara keseluruhan menunjukkan bahwa secara teknis residu bauksit, ampas pencucian bauksit dan abu layang PLTU berpotensi menghasilkan material geopolimer yang memenuhi persyaratan untuk bangunan khususnya untuk bata dan *mortar*.

Kata kunci: residu bauksit, ampas pencucian bauksit, abu layang, material geopolimer

ABSTRACT

*Characterization toward three kinds of tailing minerals to be used as raw materials for composing of geopolimer material has been carried out. Raw materials have been characterized consist of bauxite residue (*red mud*) and bauxite washing tailing (origin from Tayan, West Kalimantan), and fly ash (origin from Asam-asam, South Kalimantan). Results of characterization shows all of three kinds of tailing minerals contain high alumina (Al_2O_3) and or silicate (SiO_2); bauxite washing tailing contains 32 % Al_2O_3 and 40 % SiO_2 , bauxite residue 25 % Al_2O_3 and 3 % SiO_2 , and then fly ash 10 % Al_2O_3 and 42 % SiO_2 . Alumina and silicate are the main components in forming of (aluminosilicate) geopolymers material. Fly ash contains 10 % of reactive alumina and 42 % of reactive quartz; and bauxite washing tailing contains about 8 % of reactive quartz. Alumina and reactive quartz has potency to faster in forming of geopolymers material. Tailing from bauxite washing contain coarse grains (-12 +60 mesh) about 69 %, it has potency as *grog*. Bauxite residue and fly ash have fine grain size (bauxite residue 80 % of minus 200 mesh, fly ash minus 200 mesh), it has potency as filler of inter *grog* cavity to create a good compressive strength. The content of 6,35 % Na_2O in bauxite residue will reduce of alkali consumption so that can reduce cost of making geopolymers material. Toxicity and radioactivity tests showed that all kinds of tailing minerals are free from toxic and radioactive constituents. All of characterization results show that all kind of tailing minerals technically has potency to yield geopolymers material for building especially for brick and mortar.*

Keywords : bauxite residue, bauxite washing tailing, fly ash, geopolymers material.

PENDAHULUAN

Dalam rangka pembuatan bahan geopolimer melalui pemanfaatan mineral-mineral ampas (*tailing minerals*) perlu terlebih dahulu dilakukan karakterisasi dari mineral-mineral ampas tersebut. Mineral-mineral ampas yang akan digunakan terdiri dari tiga jenis yaitu residu bauksit (*red mud*), ampas pencucian bauksit serta abu layang PLTU (*fly ash*). Residu bauksit dan ampas pencucian bauksit merupakan limbah yang akan dikeluarkan oleh pabrik pemrosesan bauksit (pabrik alumina) yang saat ini sedang dibangun di Kalimantan Barat berkapasitas 300 ribu ton alumina per tahun. Pabrik tersebut diperkirakan akan mengeluarkan ampas berupa residu bauksit (*red mud*) sebanyak 300 sampai 350 ribu ton per tahun, serta ampas dari pencucian bauksit sekitar 200 ribu ton per tahun. Kebutuhan energi pabrik alumina tersebut akan dipasok dari PLTU-batubara yang juga akan dibangun. PLTU-batubara akan mengeluarkan sisa pembakaran batubara berupa abu layang dan abu tinggal (*bottom ash*). Abu layang PLTU dalam pembuatan bahan geopolimer ini diambil dari PLTU Asam-asam Kalimantan Selatan yang saat ini telah beroperasi.

Residu bauksit, ampas pencucian bauksit dan abu layang PLTU merupakan bahan-bahan yang mengandung mineral dan atau material aluminosilikat. Mineral dan material aluminosilikat merupakan bahan dasar pembentuk struktur material geopolimer (alkali aluminosilikat). Material geopolimer didefinisikan sebagai suatu material yang dihasilkan dari proses geosintesis dari partikel aluminosilikat polimer dan alkali silikat sehingga menghasilkan struktur amorf-semikristal tiga dimensi antara SiO_4 dan tetrahedral AlO_4 [Davidovits, 1994]. Material geopolimer dan campuran semen geopolimer memiliki ketahanan terhadap asam dan suhu tinggi, sebagai pelapis yang baik untuk keramik dan logam, serta material yang kuat untuk konstruksi bangunan. Kekuatan material geopolimer dapat dilihat pada konstruksi piramida dan sphinx di Mesir. Dengan bahan campuran yang tepat, disengaja atau tidak, campuran material yang membentuk konstruksi piramida dan sphinx tersebut menjadi material geopolimer yang kuat bertahan sampai ribuan tahun.

Makalah ini memuat hasil karakterisasi residu bauksit, ampas pencucian bauksit dan abu layang PLTU serta evaluasinya yang akan digunakan sebagai bahan baku pembuatan material geopolimer khususnya bata dan plester (*mortar*), kedua jenis bahan bangunan tersebut kebutuhannya cukup besar di Indonesia terutama untuk perumahan. Karakterisasi meliputi komposisi kimia, mineralogi (XRD), analisis ayak, struktur mikro (SEM), toksisitas TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), dan radioaktifitas.

Karakterisasi ini bertujuan agar masing-masing dari ketiga jenis bahan baku yang akan digunakan dapat diketahui karakteristiknya serta dievaluasi untuk diarahkan fungsinya agar menghasilkan produk yang memenuhi syarat.

Beberapa peneliti terdahulu telah melakukan penelitian berkaitan dengan pembentukan material geopolimer, diantaranya Cheng [2003] telah melakukan pembuatan material geopolimer dari campuran terak tanur tiup dan metakaolinit dengan penambahan sodium silikat. Kuat tekan paling tinggi dapat mencapai 79 MPa (814 kg/cm²). Secara umum dinyatakan bila perbandingan mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ pada interval 3,16-3,46 maka material geopolimer mempunyai kuat tekan yang lebih baik, namun bila meningkat sampai 3,85 kuat tekan menurun. Lee [2007] telah melakukan penelitian dengan melarutkan mineral aluminosilikat yaitu kaolin dalam larutan alkali dengan atau tanpa tambahan silika terlarut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tambahan silika terlarut sebanyak 0,5 M sangat berpengaruh terhadap pembentukan struktur geopolimer. Tanpa penambahan silikat terlarut atau alkalinitas larutannya rendah, struktur geopolimer tidak akan terbentuk. Aaron [2009] telah meneliti hubungan rasio Si:Al terhadap mikrostruktur dan sifat mekanis beton yang terbuat dari terak peleburan dan agregat batu kapur. Aaron menggunakan pereaksi pelet NaOH, Al_2O_3 , NaCl dan sodium silikat untuk penambahan silika terlarut dan kemudian campuran beton di-curing. Hasil analisis XRD menunjukkan terbentuknya fasa C-S-H gel seperti yang umum ditemukan pada semen Portland. Hasil uji kuat tekan menunjukkan beton memiliki kuat tekan 35-65 MPa (360-670 kg/cm²).

Pengujian toksisitas dan radioaktifitas terhadap suatu material (apalagi material ampas) diperlukan untuk mempertimbangkan aspek keselamatan dari bahan beracun atau unsur radioaktif yang mungkin terkandung. Diantara unsur logam (*trace metals*) yang mungkin terkandung dalam residu bauksit, seperti pada residu bauksit Ajka, Hungaria adalah Cu, Cr, Fe, Ni, Cd dan Pb, namun selama ini unsur-unsur tersebut belum pernah dilaporkan melebihi ambang batas yang aman untuk lingkungan [Ruyters, 2011].

Unsur-unsur radioaktif yang mungkin terkandung dalam residu bauksit, seperti pada residu bauksit yang dihasilkan pada industri alumina ETI Seydişehir Aluminum Plant-Turki, mengandung Unsur Ra²²⁶, U²³⁸, Th²³² dan K⁴⁰ dengan konsentrasi bervariasi antara 112-539 Bq/kg. Komisi proteksi radioaktivitas Uni Eropa membatasi konsentrasi Th²³² 1000 Bq/kg. Nilai ambang batas radioaktivitas (I) untuk material bangunan di Uni Eropa dihitung melalui persamaan : $I = CRa/185 + CTh/259 + CK/4810$. Apabila material bangunan jaraknya dekat dengan pekerja, maka nilai I tidak boleh melebihi 1, apabila jaraknya jauh seperti pada atap bangunan maka nilai I tidak boleh melebihi 6 [Akinci, 2007].

METODOLOGI

Pengambilan contoh bijih bauksit dan abu layang (AL) PLTU di Asam-asam. Bijih bauksit dicuci di *pilot plant* pencucian bauksit (di Sentra Pengembangan Pilot Plant Cipatat, Kab.Bandung Barat) menghasilkan bauksit tercuci dan ampas pencucian bauksit (AP). Bauksit tercuci dipreparasi dan diproses (*digesting* dengan proses Bayer) menghasilkan larutan sodium aluminat dan residu bauksit (RB). Residu bauksit, ampas pencucian bauksit, dan abu layang dipreparasi untuk dianalisis kimia, analisis ayak, mineralogi (XRD), struktur mikro (SEM), toksisitas TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), dan radioaktivitas. Hasil karakterisasi dievaluasi dengan mengacu pada aspek-aspek teknis material geopolimer. Foto Conto bahan baku yang dikarakterisasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Contoh bahan baku yang dikarakterisasi; (RB) Residu bauksit, (AL) Abu Layang, (AP) Ampas pencucian bauksit

HASIL DAN DISKUSI

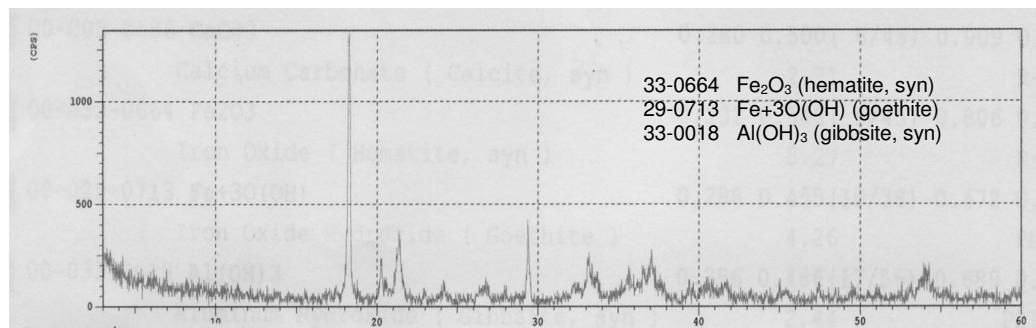
Residu Bauksit (RB)

Hasil analisis kimia residu bauksit ditunjukkan pada Tabel 1. Alumina (Al_2O_3) yang terkandung dalam residu bauksit relatif tinggi (25,4 % Al_2O_3) namun silikatnya (SiO_2) rendah. Sebagaimana telah dikemukakan, alumina (dan silikat) merupakan komponen utama pembentuk geopolimer. Kandungan alumina residu bauksit mendukung pembentukan material geopolimer. Mineral besi bukan komponen utama pembentuk geopolimer, sehingga jika mineral besi kandungannya tinggi bisa dipisahkan untuk dimanfaatkan sebagai konsentrasi besi. Mineral besi (Fe_2O_3) dalam residu bauksit tampak cukup tinggi (34,3 % Fe_2O_3), sehingga perlu dipisahkan dahulu dengan magnetic separator (pemisahan ini relatif mudah). Pemisahan mineral besi bertujuan meningkatkan kandungan alumina (Al_2O_3) dan silikat (SiO_2) sebagai komponen utama pembentuk material geopolimer (alkali aluminosilikat) serta memperoleh konsentrasi besi sebagai produk samping (*by product*). Karakteristik ini nampak berbeda dengan residu bauksit asal China dengan kandungan Al_2O_3 8-9 %, namun mengandung SiO_2 dan CaO yang tinggi yaitu 16-20 % SiO_2 dan 36,4 % CaO [Yang, 2008].

Tabel 1. Komposisi kimia residu bauksit (RB)

Komponen	%
SiO ₂	3,09
Al ₂ O ₃	25,4
Fe ₂ O ₃	34,3
K ₂ O	0,19
Na ₂ O	6,35
CaO	4,64
MgO	0,40
TiO ₂	2,59
LOI	19,04

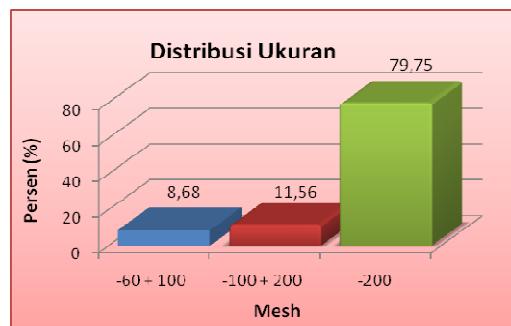
Hasil XRD residu bauksit ditunjukkan pada Gambar 2. Nampak adanya 2 jenis mineral besi yaitu hematit dan goetit, dan satu jenis mineral alumunium yaitu gibbsit yang tidak atau belum habis terekstraksi. Mineral besi dari residu bauksit asal Tayan-Kalbar dapat dipisahkan dengan magnetic separator [Aziz, 2010] dengan perolehan 20 % dan kadar konsentrat 61,92 % Fe₂O₃.



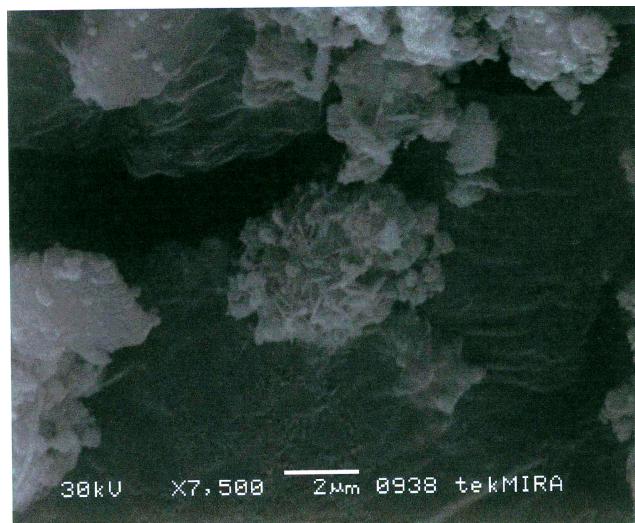
Gambar 2. Hasil XRD sampel residu bauksit (RB)

Hasil analisis ayak residu bauksit ditunjukkan pada gambar 3. Distribusi partikel residu bauksit: sekitar 80 % lolos 200 mesh; 11 % lolos 100 mesh tertahan 200 mesh; dan sisanya 9 % lolos 60 mesh tertahan 100 mesh.

Distribusi partikel menunjukkan bahwa residu bauksit berukuran partikel halus sampai sangat halus. Oleh karena itu, untuk pembuatan bata dan plester diperlukan bahan pencampur yang berbutir kasar yang berfungsi sebagai *grog*. Bahan baku yang berfungsi sebagai *grog* direncanakan ampas pencucian bauksit dengan mengambil fraksi kasarnya (-12+60 mesh). Foto mikro residu bauksit melalui SEM ditunjukkan pada Gambar 4. Nampak tekstur pelat (hematit) berukuran 6 – 12 μm dan granular (gibbsit) berukuran 2 - 6 μm dalam residu bauksit. Diantara tekstur pelat dan granular ada rongga-rongga yang dapat mempermudah penetrasi larutan alkali untuk membentuk struktur aluminosilikat material geopolimer.



Gambar 3. Distribusi ukuran partikel residu bauksit (RB)



Gambar 4. Foto mikro residu bauksit (RB), menunjukkan tekstur pelat (hematit) dan granular (gibsit).

Ampas Pencucian Bauksit (AP)

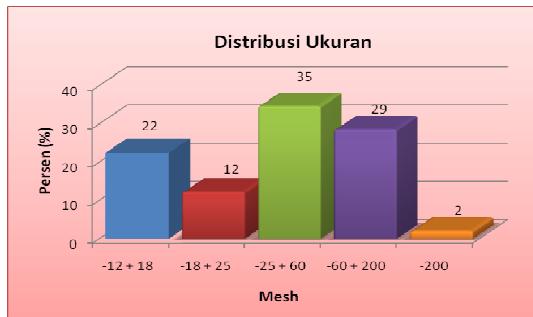
Komposisi kimia fraksi -12 +60 mesh ampas pencucian bauksit ditunjukkan pada Tabel 2. Kandungan silika reaktif 7,6 %, dengan sifat reaktifnya dapat membantu pembentukan struktur geopolimer. Kandungan yang relatif tinggi SiO₂ total (40,20 %) dan alumina (32 %) menunjang pembentukan material geopolimer karena komponen utamanya cukup tersedia.

Tabel 2. Komposisi kimia utama (*major compound*) fraksi -12 +60 mesh ampas pencucian bauksit (AP)

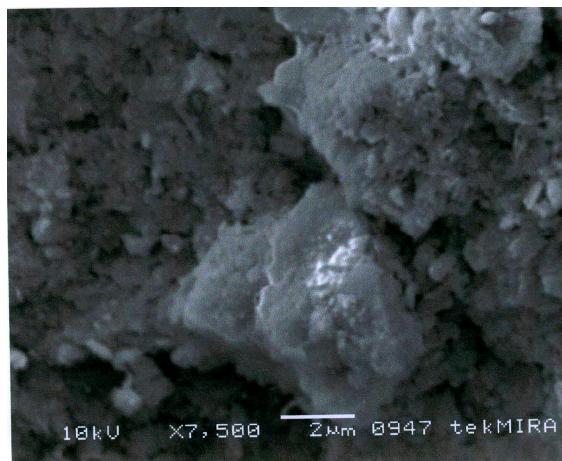
Komponen	%
SiO ₂ reaktif	7,60
SiO ₂ bebas	32,60
SiO ₂ total	40,20
Al ₂ O ₃	32,00
Fe ₂ O ₃	9,58
TiO ₂	0,78

Hasil analisis ayak sampel ampas pencucian bauksit ditunjukkan pada Gambar 5. Ampas pencucian bauksit relatif kasar sehingga dapat berfungsi sebagai *grog*. Distribusi ukuran partikel ampas pencucian bauksit menunjukkan bahwa fraksi halus (-60 mesh) masih cukup banyak yaitu 31 %. Untuk berfungsi sebagai *grog* fraksi -60 mesh perlu dikeluarkan sehingga yang tersisa hanya butiran relatif kasar (-12 +60 mesh). Rongga antar *grog* (*inter grog cavity*) direncanakan akan diisi dengan residu bauksit dan abu layang PLTU dalam interval perbandingan mol SiO₂/Al₂O₃ 3,16-3,46 pada campuran bahan dengan aditif larutan sodium silikat, sehingga diharapkan akan menghasilkan material geopolimer yang memiliki kuat tekan yang tinggi [Cheng, 2003].

Foto mikro ampas pencucian bauksit melalui SEM ditunjukkan pada Gambar 6. Nampak tekstur granular dan poros pada ampas pencucian bauksit (AP). Sifat poros dapat mempermudah penetrasi larutan alkali sehingga membantu pembentukan material geopolimer.



Gambar 5. Distribusi ukuran partikel ampas pencucian bauksit (AP)



Gambar 6. Tekstur granular dan porus pada ampas pencucian bauksit (TP)

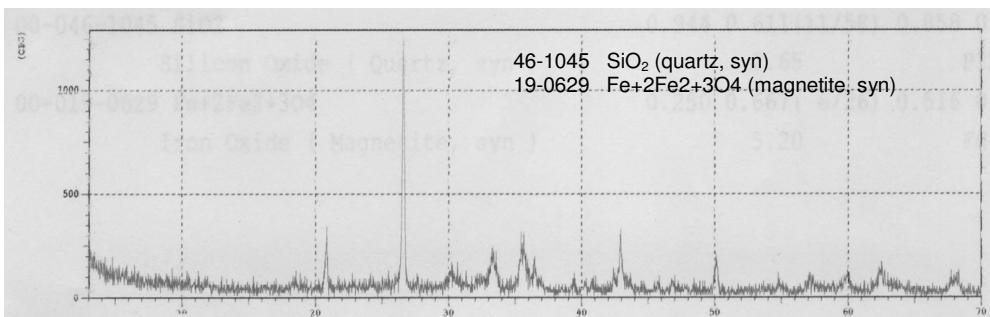
Abu Layang (AL)

Abu layang PLTU Asam-asam berupa tepung halus berwarna abu-abu tua kehitaman. Secara umum komposisi komponen abu layang PLTU diseluruh dunia relatif sama, yang berbeda adalah persentase kandungan senyawa kimianya sesuai dengan jenis batubara yang dipakai [Aziz dan Ardha, 2006]. Komponen mineral utama abu layang adalah aluminosilikat, besi oksida, silikat densitas rendah (*cenosphere*) dan sisa karbon, serta kemungkinan adanya mineral *mullite*. Partikel-partikelnya berbentuk membentuk. *Cenosphere* berasal dari senyawa alkali silikat yang telah mengalami pembakaran suhu tinggi, yaitu saat alkali meleleh, posisi alkali digantikan oleh udara, sehingga membentuk partikel bulat dengan lubang di dalamnya (densitas rendah). Abu layang berukuran sangat halus yaitu sekitar 1–75 µm. Sedangkan abu dasar berukuran butiran lebih kasar sekitar 100–300 µm, namun komposisi mineralnya mungkin masih dalam bentuk kuarsa/aluminosilikat. Komposisi kimia abu layang Asam-asam ditunjukkan pada Tabel 3. Kandungan kuarsa relatif tinggi (42 %) sedangkan alumina tidak terlalu tinggi (11 %), dan Fe₂O₃ sekitar 23 %. Sebagai perbandingan abu layang PLTU Surabaya mengandung kuarsa jauh lebih tinggi (73 % SiO₂), namun aluminanya relatif sama yaitu 11 % Al₂O₃, dan Fe₂O₃ jauh lebih rendah yaitu sekitar 6 % [Aziz dan Ardha, 2006]. Belum diketahui pengaruh dari kandungan besi oksida terhadap struktur material geopolimer, namun dari perbandingan tersebut terlihat ada korelasi rendahnya kandungan besi dengan tingginya kandungan SiO₂ atau sebaliknya. Alumina dan SiO₂ yang dikandung abu layang bersifat reaktif, sehingga berpotensi sebagai komponen pembentuk struktur material geopolimer.

Tabel 3. Komposisi kimia abu terbang (AL) PLTU Asam-asam, Kalimantan Selatan

Komponen	%
SiO ₂	42,2
Al ₂ O ₃	10,09
Fe ₂ O ₃	23,4
CaO	10,8
MgO	9,44
K ₂ O	0,55
Na ₂ O	0,43
TiO ₂	0,82
P ₂ O ₅	0,036
SO ₃	0,65
LOI	0,97

Kandungan logam alkali (11 % CaO dan 9 % MgO) mendukung pembentukan ikatan material aluminosilikat. Kandungan mineral besi (23 % Fe₂O₃) berupa magnetit, jika mungkin dapat dipisahkan dengan magnetic separator sepanjang tidak menurunkan kandungan alumina dan SiO₂ nya. Sebagai pembanding lain adalah abu layang asal China memiliki kandungan Al₂O₃ yang lebih tinggi yaitu 27 % dan kandungan Fe₂O₃ yang lebih rendah yaitu 8,7% , dan SiO₂ 54 % [Yang, 2008]. Hasil XRD abu layang Asam-asam ditunjukkan pada Gambar 7. Pada hasil XRD menunjukkan kuarsa dan magnetit pada abu layang. Fasa senyawa mengandung alumina tidak terdeteksi, kemungkinan senyawa amorf.



Gambar 7. Hasil XRD abu layang PLTU Asam-asam, Kalimantan Selatan.

Foto mikro abu layang dari PLTU Asam-asam Kalimantan Selatan melalui SEM ditunjukkan pada Gambar 8. Nampak jelas tekstur bola-bola (*spheres*) besar dan kecil berukuran 0,25 – 10 µm. Aziz dan Ardha [2006] juga telah melakukan pengujian melalui SEM terhadap abu layang PLTU Suralaya dan menunjukkan tekstur yang mirip yaitu berupa bola-bola besar dan kecil.

Kandungan SiO₂ dan Al₂O₃

Kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ rata-rata dari campuran bahan baku AP dan AL (berat yang sama) adalah 41 % SiO₂ dan 21 % Al₂O₃. Perbandingan mol SiO₂/Al₂O₃ campuran tersebut adalah 3,3, angka ini berada pada interval 3,16-3,46. Melalui variasi penambahan RB dan aditif larutan sodium silikat campuran kedua bahan baku tersebut berpotensi menghasilkan material geopolimer yang mempunyai kuat tekan yang tinggi.



Gambar 8. Tekstur bola-bola besar dan kecil pada abu layang Asam-asam.

Toksitas

Hasil pengujian toksitas TCLP benda uji dari bahan campuran (35% RB, 40% AP dan 25% AL) ditunjukkan pada Tabel 4. Nampak dari hasil pengukuran toksitas bahan campuran masih aman dari sifat toksik.

Tabel 4. Hasil pengujian toksitas TCLP dalam *sludge* bahan campuran (RB, AP dan AL)

No	PARAMETER	SATUAN	HASIL PENGUKURAN	BAKU MUTU (PP 18/99 jo PP 85/99)
1	Tembaga (Cu)	ppm	0,021	10
2	Timbal (Pb)	ppm	0,150	5
3	Seng (Zn)	ppm	0,043	50
4	Perak (Ag)	ppm	0,015	5
5	Kadmium (Cd)	ppm	0,0002	1
6	Kromium (Cr)	ppm	0,002	5
7	Sianida (CN)	ppm	< 0,001	20
8	Barium (Ba)	ppm	0,087	100
9	Selenium (Se)	ppm	0,0112	1
10	Arsen (As)	ppm	0,0025	5
11	Air Raksa (Hg)	ppm	< 0,06	200
12	Boron (B)	ppm	6,33	500

Radioaktifitas

Kandungan unsur radioaktif sampel residu bauksit, abu layang dan ampas pencucian bauksit ditunjukkan pada Tabel 5. Nampak dari hasil pengujian, nilai I ($I = CRa/185 + CTh/259 + CK/4810$) jika dihitung dengan angka-angka hasil pengujian tidak melebihi 1, berarti masih aman dari jarak dekat. Bahan-bahan tersebut masih aman dari sifat radioaktif.

Tabel 5. Hasil pengujian konsentrasi radioaktifitas residu bauksit, abu layang dan ampas pencucian bauksit.

No.	Radio nuklida	Konsentrasi radioaktifitas (Bq/kg)					
		Residu bauksit	Nilai I	Abu layang	Nilai I	Ampas pencucian	Nilai I
1	Timbal-210 (^{210}Pb)	6,90 ± 3,91	0,1389	37,09 ± 6,25	0,5274	26,66 ± 5,35	0,2858
2	Radium-226 (^{226}Ra)	5,17 ± 0,59		40,55 ± 2,77		16,19 ± 1,25	
3	Radium-228 (^{228}Ra)	13,48 ± 0,07		32,41 ± 1,50		22,58 ± 1,08	
4	Thorium-228 (^{228}Th)	8,07 ± 0,64		20,71 ± 1,44		15,02 ± 1,07	
5	Uranium-238 (^{238}U)	< 5,37		19,54 ± 8,81		< 5,37	
6	Potassium-40 (^{40}K)	3,25 ± 1,03		110,7 ± 6,9		6,08 ± 1,25	

KESIMPULAN

Perbandingan mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ campuran ampas pencucian bauksit dan abu layang PLTU berada pada interval 3,16-3,46. Melalui variasi penambahan residu bauksit dan aditif sodium silikat berpotensi sebagai bahan baku pembuatan material geopolimer bahan bangunan khususnya untuk bata dan *mortar*,

Residu bauksit, ampas pencucian bauksit dan abu layang PLTU sebagai bahan baku material geopolimer bahan bangunan telah diuji, aman dari sifat toksik; kandungan Cu, Pb, Zn, Ag, Cd, Cr, CN, Ba, Se, As, Hg, dan Boron (B) masih dibawah batas maksimum angka baku mutu sifat toksik, Ketiga bahan baku yang telah dikarakterisasi tersebut juga aman dari sifat radioaktif; nilai I dari konsentrasi radioaktifitas masih jauh dibawah 1, yaitu untuk residu bauksit 0,1389, ampas pencucian bauksit 0,2858 dan abu layang 0,5274.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Sakulich, Aaron R., et al.: Influence of Si Al Ratio on the Microstructural and Mechanical Properties of a Fine-Limestone Aggregate Alkali-Activated Slag Concrete, *Rilem Materials and Structures* 43,1025-1035, (2010).
- [2]. Akinci, A., Artir, Recep.: Characterization of Trace Elements and Radionuclides and Their Risk Assessment in Red Mud. Elsevier, MTL-06200, (2007).
- [3]. M, Aziz., N, Ardha.: Karakterisasi abu terbang PLTU Suralaya dan evaluasinya untuk refraktori cor, *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, no.36, Tahun 14, Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara, ISSN 0854-7890, (2006).
- [4]. M, Aziz., Mutaalim, S, Rochani., A, Wahyudi., D, Amalia.: Konsentrasi Mineral Besi dari Residu Bauksit Kalimantan Barat untuk Bahan Baku Peleburan Besi, *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, vol.6,no.1, Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara, ISSN 1979-6560, (2010).
- [5]. T.W., Cheng., J.P.: Fire-resistance geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering* 16, 205-210, (2003).
- [6]. Davidovits, J.: Geopolymers: Man-made Rock Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement. *Journal of Materials Education*, 16 [2-3], 91-137, (1994).
- [7]. Lee, W.K.W., van Deventer, J.S.J.: Chemical Interaction Between Siliceous Aggregates and Low-Ca Alkali-Activated Cements, Elsevier, *Cement and Concrete Research* 37, 844-855, (2007).
- [8]. Ruyters, S., et al.: The Red Mud Accident in Ajka (Hungary): Plant Toxicity and Trace Metal Bioavailability in Red Mud Contaminated Soil, *Environmental Science & Technology*, Jan 4. PubMed PMID: 21204523, (2011).

- [9]. Yang, J., Xiao, Bo.: *Preparation of Glass-Ceramics from Red Mud in the Aluminium Industries.* Elsevier, Ceramics International 34, 125-130, (2008).