

PEMBUATAN BAHAN GEOPOLIMER BERBASIS RESIDU BAUKSIT UNTUK BAHAN BANGUNAN

The Making of Red Mud - Based Geopolymer for Building Materials

MUCHTAR AZIZ dan AZHARI

Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara
Jalan Jenderal Sudirman 623, Bandung 40211
Telp. 022 6030483, Fax. 022 6003373
e-mail: muchtar@tekmira.esdm.go.id

SARI

Telah dilakukan uji pemanfaatan residu bauksit (*red mud*) dari rencana pabrik alumina Kalimantan Barat, untuk pembuatan bahan geopolimer. Geopolimer adalah bahan yang dihasilkan dari proses geosintesis partikel polimer aluminosilikat dan alkali silikat yang cocok sebagai bahan bangunan. Residu bauksit sebagai bahan dasar dicampur dengan abu terbang (dari PLTU) dan ampas pencucian bauksit. Abu terbang mengandung aluminosilikat reaktif yang berfungsi mempercepat pembentukan senyawa aluminosilikat. Ampas pencucian bauksit mengandung material kasar (lolos 2 mm) yang berfungsi sebagai *grog*. Aditif berupa kapur tohor (CaO) halus ditambahkan untuk membantu mempercepat pembentukan senyawa kalsium aluminosilikat pada saat material masih basah. Larutan alkali silikat ditambahkan sebagai aktifator proses polimerisasi. Hasil pencampuran, pencetakan, *curing*, *aging* dan pengujian benda uji menunjukkan terbentuknya fasa baru yang berbeda dari bahan baku asalnya yaitu bertekstur kapiler. Hasil uji fisik pada benda uji menunjukkan kuat tekan 65,23 kg/cm² (termasuk bata pejal kelas 50 menurut SNI 15-2094-2000). Hasil pengujian TCLP dan radioaktifitas menunjukkan aman dari toksin dan radioaktif.

Kata kunci : residu bauksit, geopolimer, bahan bangunan, senyawa alumina silikat

ABSTRACT

Utilization of bauxite residue (red mud) of West Kalimantan's alumina has been carried out for preparing geopolymer material. The material is composed by geosynthesis process of polymeric aluminosilicates particles and silicate alkalines that are suitable for building materials. The bauxite residue was mixed with fly ash and washed bauxite tailing. The fly ash contains reactive aluminosilicates substances to speed up aluminosilicate compound formation, while the tailing of washed bauxite contains coarse materials (the size is less than 2 mm) as grog. Quicklime (CaO) was added to fasten the calcium-aluminosilicate compound formation in wet condition. Alkaline silicate solution was also added as an activator of polymerization. The results of mixing, pressing, curing, aging and testing of the specimens show that the formation of new phase is different from the original materials. It has capillary textures that is suitable as geopolymer materials. The test result of compressive strength of the specimens was about 65.23 kg/cm², which is known as a 50 class of Indonesian brick standard (SNI 15-2094-2000). The TCLP and radioactivity test results show that specimen are safe from toxic and radioactive substances.

Keywords : bauxite residue, geopolymer, building material, alumina silicate compound

PENDAHULUAN

Residu bauksit (*red mud*) merupakan ampas lumpur merah dari sisa pemrosesan bijih bauksit menjadi alumina (Al₂O₃). Pabrik alumina yang sedang diban-

gun di Kalimantan Barat direncanakan berkapasitas 300 ribu ton alumina per tahun. Pabrik tersebut diperkirakan akan mengeluarkan ampas lumpur merah sebagai residu bauksit sebanyak 300 sampai 350 ribu ton pertahun, serta ampas dari pencucian

bauksit sekitar 200 ribu ton per tahun. Kebutuhan energi pabrik alumina tersebut akan dipasok dari PLTU-batubara. PLTU-batubara akan mengeluarkan sisa pembakaran batubara berupa abu terbang (*fly ash*) dan abu tinggal (*bottom ash*). Ketiga ampas ini, yaitu residu bauksit, ampas pencucian bauksit dan abu terbang yang jumlahnya banyak tersebut merupakan mineral aluminosilikat yang potensial digunakan untuk membuat bahan geopolimer. Keuntungan dalam penggunaan residu bauksit sebagai basis pembuatan bahan geopolimer adalah karena residu bauksit sudah mengandung larutan alkali aluminosilikat (sebagai sisa pemrosesan bijih bauksit yang menggunakan pelarut soda kaustik) sehingga akan mengurangi pemakaian larutan alkali.

Bahan geopolimer didefinisikan sebagai suatu material atau bahan yang dihasilkan dari proses geosintesis atau polimerisasi dari partikel aluminosilikat dan alkali silikat sehingga menghasilkan struktur amorf-semikristal tiga dimensi antara SiO_4 dan tetrahedral AlO_4 (Davidovits, 1994). Mineral aluminosilikat seperti kaolin dapat terlarut dalam larutan alkali silikat membentuk keramik yang keras. Sedikit larutan alkali yang ditambahkan pada kaolin akan melarutkan sebagian mineral aluminosilikat membentuk larutan alkali aluminosilikat yang akan berikatan dengan partikel aluminosilikat polimer yang ada dan membentuk suatu fasa baru bersifat keras setelah mengering. Demikian pula mineral-mineral aluminosilikat lainnya seperti *trass*, tufit, dan ampas (*tailing*) pemrosesan mineral serta sisa pembakaran batubara merupakan material yang potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku geopolimer.

Pembuatan bahan geopolimer berbasis residu bauksit dalam kegiatan ini ditujukan untuk bahan bangunan yaitu bata dan plester (mortar), karena kebutuhannya di Indonesia cukup besar terutama untuk perumahan, sehingga diharapkan dapat menyerap residu bauksit dalam jumlah besar. Pengujian karakteristik benda uji geopolimer yang dihasilkan meliputi kuat tekan, toksisitas atau TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*) dan kandungan radioaktif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu pilihan pemanfaatan residu bauksit rencana pabrik alumina di Kalimantan Barat. Dengan semakin tingginya kesadaran manusia akan dampak terhadap lingkungan hidup dari aktifitas suatu industri maka pemanfaatan limbah industri menjadi suatu keharusan untuk keberlangsungannya.

Uji pembuatan bahan bangunan sebagai geopolimer berbentuk bata secara umum sudah banyak dilakukan, diantaranya adalah pembuatan bata kalsium silikat berbasis abu terbang PT. Freeport oleh Ngurah Ardha dan Nuryadi Saleh (2003) yang dilakukan dengan mencampurkan abu terbang dengan kapur tohor menjadi bata kalsium silikat ringan dengan kuat tekan sekitar $47,5 \text{ kg/cm}^2$ dan daya serap air sekitar 23%. Jika abu terbang dicampur dengan pasir kuarsa halus dan sedikit semen Portland bisa menghasilkan bata kalsium silikat dengan kuat tekan 278 kg/cm^2 dengan daya serap air hanya 10%. Hal berbeda yang dilakukan dan dibahas dalam makalah ini adalah pembuatan bata dengan bahan dasar residu bauksit yang dicampur dengan ampas pencucian bauksit sebagai *grog*, kapur dan sedikit aktivator.

Bahan Geopolimer

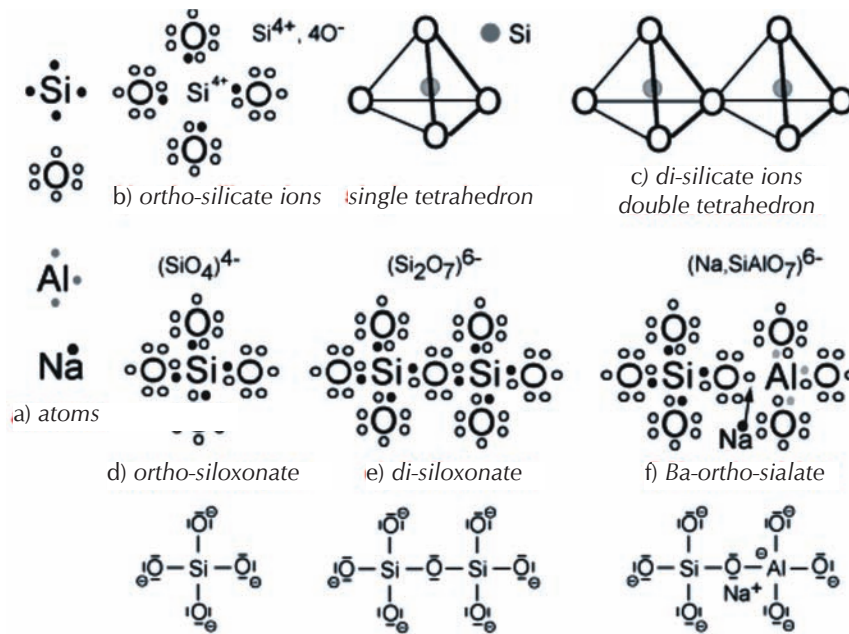
Secara struktur, bahan geopolimer ditunjukkan pada Gambar 1.

Ketahanan Bahan Geopolimer

Dengan menggunakan campuran mineral-mineral aluminosilikat polimer dan larutan alkali silikat yang tepat maka akan diperoleh bahan geopolimer dengan kekuatan yang tinggi hanya dengan waktu beberapa jam saja pada temperatur *curing* (perawatan) tertentu. Bahan geopolimer dan campuran semen geopolimer dapat digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan terhadap asam dan suhu tinggi, pelapis keramik dan logam, serta material konstruksi. Bukti konkrit kekuatan bahan geopolimer dapat dilihat pada konstruksi piramida dan *sphinx* di Mesir. Dengan jumlah campuran yang tepat, disengaja atau tidak, campuran mineral-mineral alumina silikat menjadi bahan geopolimer yang kuat dan bertahan sampai ribuan tahun.

Perkembangan Pembuatan Bahan Geopolimer

Penelitian pembuatan bahan bersifat semen, beton atau bata geopolimer yang menggunakan bahan baku residu bauksit telah banyak dilakukan dengan menggunakan bahan campuran yang berbeda-beda. Pan dkk. (2002) meneliti proses hidrasi material yang bersifat semen dengan mencampurkan residu bauksit 30% dan terak peleburan 70% dengan penambahan aktivator *waterglass* 8% dan sodium silikat 6% dari total jumlah campuran padatan. Percontoh dicetak kemudian dilakukan *curing* pada



Gambar 1. Struktur amorf-semi kristal geopolimer [Davidovits,1994]



Gambar 2. Piramida dan sphinx menggunakan bahan geopolimer (Putro, 2008)

temperatur ruang selama 24 jam, kemudian dilanjutkan dengan perendaman di dalam air pada suhu kamar dan dalam uap air pada suhu 80°C. Hasilnya menunjukkan kuat tekan dapat mencapai 350 kg/cm². Lee dan van Deventer (2007) telah meneliti reaksi kimia antara agregat silika dan bahan geopolimer dengan kadar kalsium rendah. Penelitian dilakukan dengan melarutkan mineral aluminosilikat yaitu kaolin dalam larutan alkali dengan atau tanpa tambahan silika terlarut. Dari hasil penelitian diketahui bahwa tambahan silika terlarut sebanyak 0,5 M sangat berpengaruh terhadap pembentukan struktur geopolimer. Apabila tanpa penambahan silikat terlarut atau larutannya memiliki alkalinitas rendah maka struktur geopolimer tidak akan terben-

tuk. Yang dan Bo (2008) telah meneliti pembuatan bata tanpa sinter atau pada temperatur ruang dengan menggunakan residu bauksit. Komposisi bahan baku terdiri dari 25-40% residu bauksit, 18-28% abu terbang, 30-35% pasir grog, 8-10% kapur, 1-3% gipsum dan 0-1% semen Portland. Dari Hasil analisis XRD dan SEM menunjukkan struktur C-S-H gel dan *ettringite* (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂•26H₂O), kuat tekannya mencapai 29,5 MPa (300 kg/cm²) untuk sampel bata dengan waktu *aging* 28 hari. Sakulich dkk. (2010), telah meneliti hubungan rasio Si:Al terhadap mikrostruktur dan sifat mekanis beton yang terbuat dari terak peleburan dan agregat batu kapur dengan pereaksi pelet NaOH, Al₂O₃, NaCl dan *waterglass* untuk penambahan silika terlarut, kemudian campuran beton di-*curing*. Dari hasil analisis XRD terlihat fasa C-S-H gel seperti yang umumnya ditemukan pada semen Portland. Dan dari uji kuat tekan menunjukkan beton memiliki kuat tekan 35-65 MPa (360-670 kg/cm²). Zhang dkk. (2010) melakukan penelitian dengan campuran 30% residu bauksit yang telah disinter 600°C terlebih dahulu, 21% terak besi, 10% abu terbang, 30% klinker, 8% gipsum dan 1% aditif menghasilkan produk dengan kuat tekan mencapai 45-49 MPa (460-500 kg/cm²). Hardjito dkk. (2011) membuat mortar geopolimer dari abu terbang dan abu tinggal, dibandingkan dengan pembuatan semen Portland ternyata ada perbedaan mendasar dalam pembuatannya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbedaan pembuatan beton geopolimer dan beton semen Portland (Hardjito dkk., 2011)

Ardha dan Saleh (2003) melakukan penelitian pembuatan bata kalsium silikat berbahan dasar abu terbang dari PLTU Portsite, PT. Freeport Indonesia dengan dan/atau tanpa campuran pasir silika, kapur, gipsum, aditif dan semen portland. Campuran bahan abu terbang dan kapur saja dalam waktu *curing* selama 3-28 hari menghasilkan bata kalsium silikat ringan dengan nilai kuat tekan 8–47 kg/cm². Sedangkan apabila ditambahkan campuran pasir kuarsa halus dan semen Portland sebanyak 15% memberikan hasil kuat tekan yang jauh lebih baik yaitu 141-278 kg/cm².

Penggunaan residu bauksit dan abu terbang untuk pembuatan bahan bangunan juga perlu mempertimbangkan aspek keselamatan dari bahan beracun atau unsur radioaktif yang mungkin terkandung. Di antara unsur logam (termasuk *trace metal*) 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 dkk., 2011).

Unsur-unsur radioaktif yang mungkin terkandung dalam residu bauksit seperti yang dihasilkan oleh industri alumina di Turki, mengandung unsur Ra226, U238, Th232 dan K40 dengan konsentrasi bervariasi antara 112–539 Bq/kg. Komisi proteksi

radioaktif Uni Eropa membatasi konsentrasi Th232 sekitar 1000 Bq/kg. Nilai ambang batas radioaktif (I) untuk bahan bangunan di Uni Eropa dihitung melalui persamaan $I = CRa/185 + CTh/259 + CK/4810$. Apabila bahan 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 dan Recep 2007).

METODOLOGI

Bahan baku pembentuk bahan geopolimer terdiri dari 3 komponen utama, yaitu residu bauksit (RB), abu terbang (AL) dan ampas pencucian bauksit (AP). Ketiga komponen bahan baku tersebut dikeringkan, dipreparasi dan diambil percontohnya untuk dikarakterisasi. Pembuatan bahan geopolimer dicoba dalam 2 macam komposisi bahan baku yaitu komposisi I dan komposisi II seperti tercantum pada Tabel 1.

Bahan baku komposisi I dicampur kering dalam mesin pencampur agar homogen, demikian pula cara yang sama dilakukan terhadap bahan baku komposisi II. Terhadap masing-masing komposisi selanjutnya dilakukan pencampuran basah dengan ditambahkan 15 % berat air yang mengandung

Tabel 1. Komposisi campuran bahan geopolimer

Material	Komposisi I (%)	Komposisi II (%)
Residu bauksit (RB)	35	35
Abu terbang (AL)	25	25
Ampas pencucian bauksit (AP)	30	40
Kapur	10	-

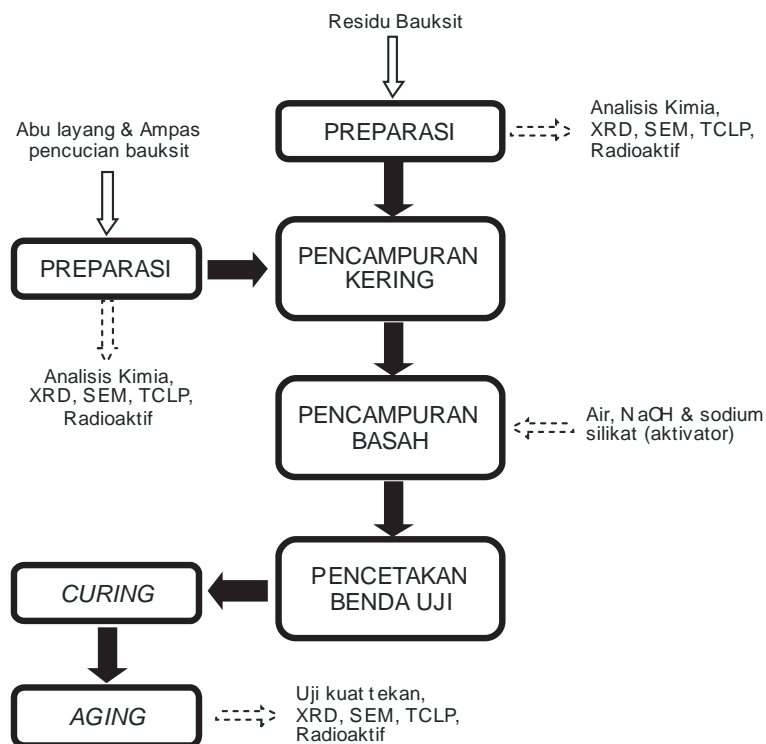
1% berat sodium hidroksida (NaOH), selanjutnya ditambahkan sodium silikat dalam jumlah yang divariasikan dari 0, ½, 1, 2, 4 dan 8 % berat. Sodium hidroksida dan sodium silikat berfungsi sebagai aktivator dalam pembentukan struktur bahan geopolimer. Selanjutnya masing-masing komposisi dilakukan pencetakan benda uji dengan alat *press* hidrolik berkekuatan 1 ton. Terhadap benda uji dilakukan *curing* (dipanaskan dalam oven suhu 80°C selama 24 jam) dan tanpa *curing*. Setelah dilakukan *curing* dan tanpa *curing* selanjutnya semua benda uji didiamkan pada suhu ruang (*aging*) selama 0, 7, dan 14 hari. Setiap selesai *aging* sesuai waktu (hari) yang ditentukan terhadap benda uji selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan. Terhadap bahan

geopolimer juga dilakukan pengujian toksisitas (TCLP) dan kandungan unsur radioaktif masing-masing terhadap residu bauksit, abu terbang dan ampas pencucian bauksit. Bagan alir pembuatan bahan geopolimer berbasis residu bauksit ditunjukkan pada Gambar 4.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Bahan Baku

Karakterisasi dan evaluasi terhadap bahan baku pembuatan bahan geopolimer yang meliputi komposisi kimia, mineralogi (XRD), analisis ayak, struktur mikro (SEM), toksisitas (TCLP), dan radioaktivitas terhadap masing-masing residu bauksit, ampas pencucian bauksit dan abu terbang yang merupakan bahan baku utama pembentukan material geopolimer bahan bangunan khususnya untuk bata dan mortar telah dilakukan di laboratorium (Aziz dan Azhari, 2011). Diketahui bahwa residu bauksit berfungsi sebagai sumber aluminosilikat (25,4 % Al₂O₃; 3,09 SiO₂), alkali (6,35% Na₂O); Ampas pencucian bauksit sebagai sumber alumina (20-25% Al₂O₃) dan kuarsa (40 % SiO₂) termasuk kuarsa reaktif (8 %) yang berfungsi sebagai *grog*. Abu terbang dari PLTU Asam-asam sebagai sumber

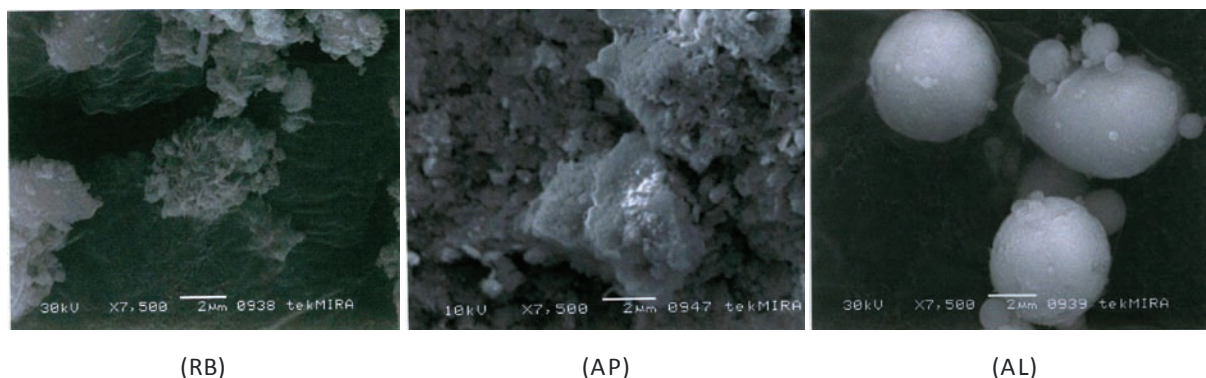


Gambar 4. Bagan alir pembuatan bahan geopolimer berbasis residu bauksit

kuarsa (42% SiO₂) dan alumina (10% Al₂O₃) yang bersifat reaktif untuk mempercepat pembentukan struktur geopolimer, serta berfungsi sebagai pengisi antar kisi (*grog*). Foto struktur mikro dari ketiga jenis bahan baku ditunjukkan pada Gambar 5.

Residu Bauksit (RB)

Hasil analisis kimia residu bauksit ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil mineralogi ditunjukkan pada Gambar 7.

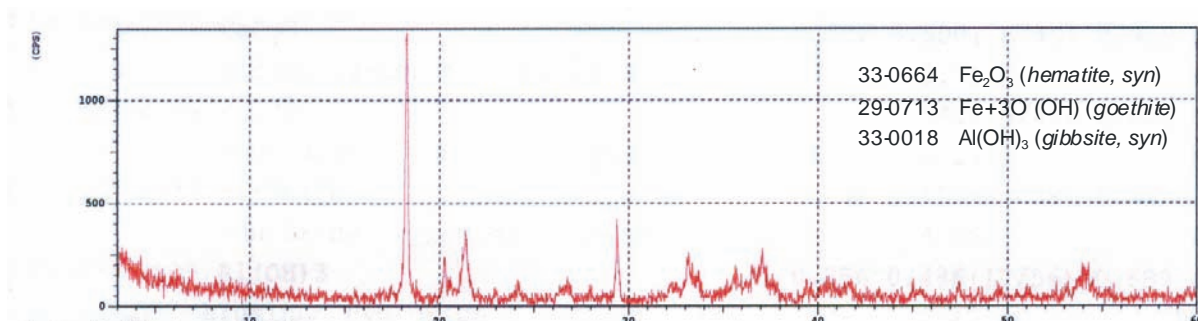


Gambar 5. Foto mikro tekstur residu bauksit (RB), ampas pencucian bauksit (AP) dan pertikel abu terbang PLTU (AL)

Tabel 2. Komposisi kimia residu bauksit

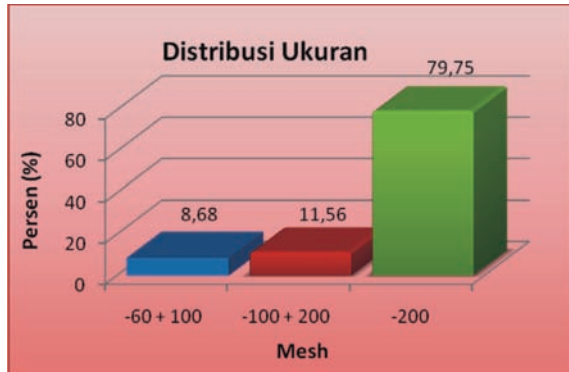
Komponen	%
SiO ₂	3,09
Al ₂ O ₃	25,4
Fe ₂ O ₃	34,3
K ₂ O	0,19
Na ₂ O	6,35
CaO	4,64
MgO	0,40
TiO ₂	2,59
LOI	19,04

Berdasarkan data di atas dapat diketahui bahwa masih banyak alumina yang terkandung dalam residu bauksit hasil proses *digesting*, hal ini mungkin disebabkan oleh proses *digesting* yang belum sempurna. Dari data ini juga dapat dilihat kandungan mineral besi yang cukup tinggi yang merupakan karakteristik bauksit asal Tayan, Kalimantan Barat. Karakteristik ini berbeda dengan residu bauksit asal China dengan kandungan Al₂O₃ sekitar 8-9%, namun mengandung SiO₂ dan CaO yang tinggi yaitu 16-20 % SiO₂ dan 36,4 % CaO (Yang dan Bo, 2008). Hasil analisis XRD residu bauksit ditunjukkan pada Gambar 6 yang menunjukkan bahwa ada 2 (dua) jenis mineral besi yaitu hematit dan gutit,



Gambar 6. Hasil analisis XRD percontoh residu bauksit

selain itu ada juga mineral aluminium yaitu gibsit yang tidak/belum terekstraksi. Hasil analisis ayak residu bauksit ditunjukkan pada Gambar 7.



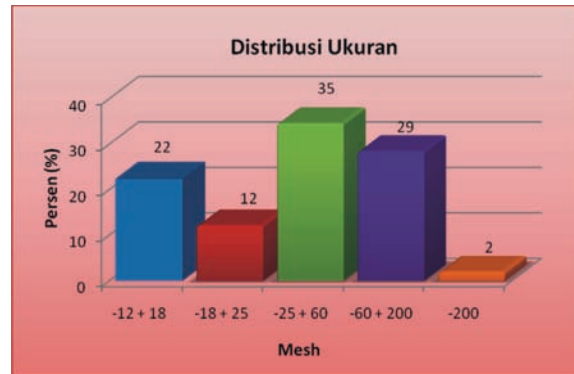
Gambar 7. Distribusi ukuran partikel residu bauksit

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. Namun distribusi ukuran partikel residu bauksit tidak menjadi variabel dalam penelitian ini. 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* yaitu ampas pencucian bauksit. Di samping itu digunakan pula bahan lainnya yaitu abu terbang batubara dari PLTU Asam-asam yang berfungsi sebagai sumber aluminosilikat reaktif.

Ampas Pencucian Bauksit

Ampas pencucian bauksit berfungsi sebagai *grog* agar material geopolimer yang dihasilkan memiliki distribusi ukuran yang tepat sehingga antar partikel terjadi saling mengisi dan memberikan kekuatan ketika dicetak dan pasca cetak. Hasil analisis ayak sampel ampas pencucian bauksit ditunjukkan pada Gambar 8.

Dari distribusi ukuran partikel ampas pencucian bauksit terlihat bahwa fraksi halus (-60 mesh) masih cukup banyak yaitu 31 % sehingga diperlukan pengaturan komposisi fraksi ukuran partikel ampas untuk percobaan pembuatan benda uji, dalam hal ini diatur sesuai yang tercantum pada Tabel 3.



Gambar 8. Distribusi ukuran partikel ampas pencucian bauksit

Tabel 3. Distribusi ukuran partikel ampas pencucian bauksit untuk campuran bahan baku pembuatan spesimen bata

Fraksi ukuran (mesh)	Komposisi (%)
-12 + 16	25
-16 + 20	25
-20 + 60	25
-60 + 100	25

Abu Terbang

Abu terbang berasal dari PLTU Asam-asam, Kalimantan Selatan yang memiliki ciri fisik sedikit basah dengan warna agak kecoklatan. Komposisi kimia abu terbang tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.

Berdasarkan data (Tabel 4) diketahui bahwa abu terbang PLTU Asam-asam memiliki kandungan mineral aluminosilikat yang tinggi, sehingga sangat tepat untuk dimanfaatkan dalam pembuatan bata geopolimer. Dari data tersebut juga terlihat kandungan logam alkali (CaO dan MgO) yang cukup tinggi yang mendukung mempercepat pembentukan senyawa Ca/Mg aluminosilikat. Kandungan mineral besi juga cukup tinggi namun belum diketahui pengaruhnya terhadap material geopolimer. Sebagai pembandingan, abu terbang asal China memiliki kandungan Al₂O₃ yang lebih tinggi yaitu 27% dan kandungan Fe₂O₃ yang lebih rendah yaitu 8,7% (Yang dan Bo, 2008). Hasil XRD percontohan abu terbang dari PLTU Asam-asam Kalimantan Selatan ditunjukkan pada Gambar 9 yang menunjukkan adanya kuarsa

Tabel 4. Komposisi kimia abu terbang PLTU Asam-asam, Kalimantan Selatan

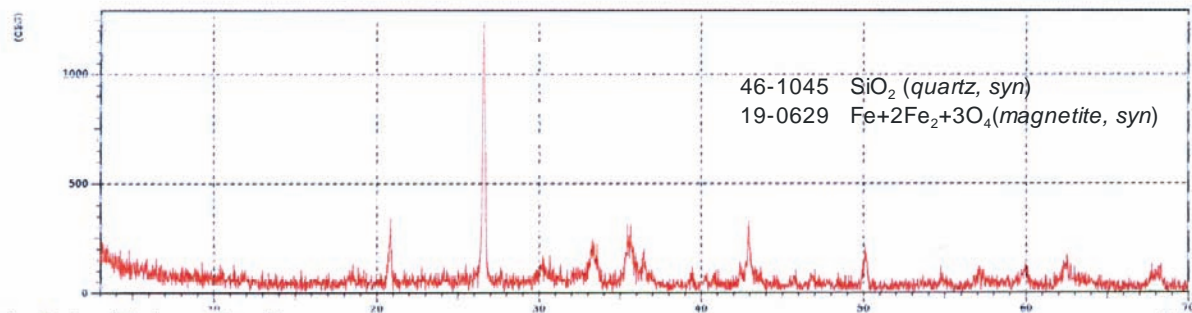
Komponen	%
SiO ₂	42,2
Al ₂ O ₃	10,09
Fe ₂ O ₃	23,4
CaO	10,8
MgO	9,44
K ₂ O	0,55
Na ₂ O	0,43
TiO ₂	0,82
P ₂ O ₅	0,036
SO ₃	0,65
LOI	0,97

dan magnetit. Fasa senyawa mengandung alumina tidak terdeteksi yang keberadaannya kemungkinan sebagai senyawa *amorf*.

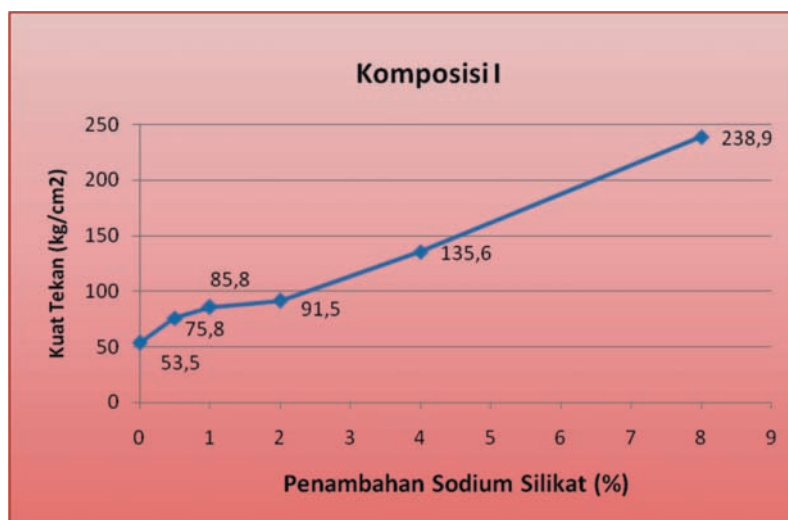
Hasil Uji Kuat Tekan Bahan Geopolimer

Pengujian kuat tekan terhadap benda uji bahan geopolimer dengan komposisi campuran residu bauksit 35%, abu terbang 25%, ampas pencucian bauksit 30% dan kapur 10% (Komposisi I) serta variasi penambahan sodium silikat yang telah mengalami proses *curing* 80°C selama 24 jam ditunjukkan pada Gambar 10.

Dari Gambar 10 nampak bahwa dengan penambahan sodium silikat di bawah 1%, kuat tekan hanya mencapai 50-75 kg/cm². Ketika jumlah sodium silikat dinaikkan 1-2 % dapat meningkatkan kuat



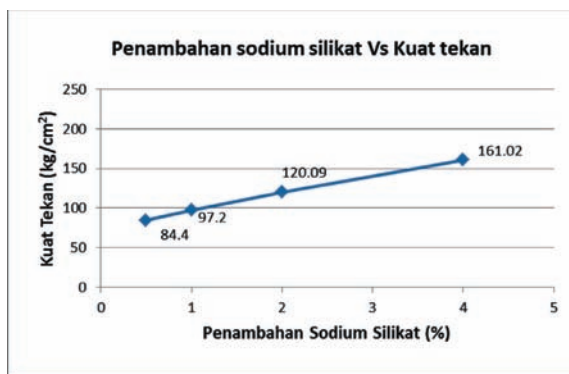
Gambar 9. Hasil XRD abu terbang PLTU Asam-asam, Kalimantan Selatan



Gambar 10. Pengaruh penambahan sodium silikat terhadap kuat tekan benda uji komposisi I

tekan sampai 86-92 kg/cm². Selanjutnya jika jumlah sodium silikat dinaikkan lagi hingga di atas 2 % sampai 4 % dapat meningkatkan kuat tekan antara 92 sampai 136 kg/cm². Kuat tekan dapat mencapai 238,9 kg/cm² pada penambahan sodium silikat 8%.

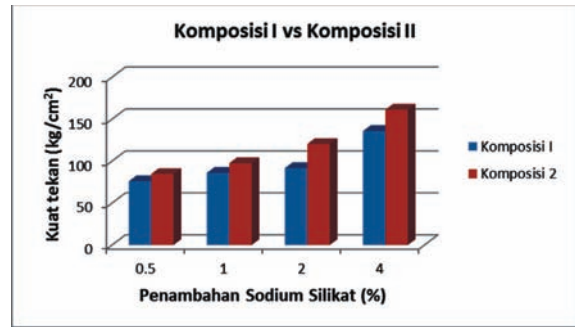
Hasil uji kuat tekan dengan komposisi campuran residu bauksit 35%, abu terbang 25% dan ampas pencucian bauksit 40% (Komposisi II) serta variasi penambahan sodium silikat yang telah mengalami proses curing 80°C selama 24 jam ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Pengaruh penambahan sodium silikat terhadap kuat tekan percontoh komposisi II (tanpa kapur)

Pada Gambar 12 nampak bahwa dengan penambahan sejumlah kecil sodium silikat (0,5 %) pada komposisi II (tanpa kapur) kuat tekan benda uji dapat mencapai 84 kg/cm², berarti sudah melebihi dari target minimum kuat tekan yang diinginkan (50-75 kg/cm²). Kuat tekan dapat mencapai 120,09 kg/cm² pada penambahan sodium silikat 2%. Pada penambahan sodium silikat dua kali lipat yaitu 4%, kuat tekannya meningkat sekitar 30 % menjadi 161,02 kg/cm². Perbandingan nilai kuat tekan pada kedua komposisi tersebut ditunjukkan pada Gambar 12.

Secara umum dari Gambar 12 dapat disimpulkan bahwa benda uji dengan komposisi II (tanpa kapur, namun ampas pencucian bauksit yang lebih banyak) ternyata memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dari pada benda uji pada komposisi I (dengan kapur). Nampaknya fungsi ampas pencucian bauksit yang memberikan distribusi ukuran tertentu berperan lebih baik untuk memperkuat struktur bahan pada benda uji. Penambahan sodium silikat 8% pada



Gambar 12. Perbandingan pengaruh penambahan sodium silikat terhadap kuat tekan benda uji komposisi I dan komposisi II

komposisi II tidak dilakukan percobaannya karena alasan keekonomian.

Hasil uji kuat tekan komposisi I dan II dengan penambahan sodium silikat 0,5 dan 2 % tanpa atau dengan curing serta waktu aging 7 dan 14 hari ditunjukkan pada Tabel 5.

Dari hasil uji kuat tekan yang ditunjukkan pada Tabel 5 maka komposisi dan kondisi optimal bahan geopolimer mencapai kuat tekan 65,23 kg/cm² yang ditunjukkan oleh percontoh No.1 (kode percontoh : 2S7-1), yaitu dengan komposisi : residu bauksit (RB) 35 %, abu terbang (AL) 25 %, ampas pencucian (AP) 40 %, dan sodium silikat 2 %; serta kondisi tanpa curing dan waktu aging 7 hari. Kuat tekan benda uji bahan geopolimer tersebut sudah memenuhi syarat untuk pembuatan bata pejal "kelas 50" (50 kg/cm² ≤ kuat tekan 100 kg/cm²) sesuai dengan standar Indonesia (SNI 15-2094-2000), demikian pula telah memenuhi syarat untuk plester pasangan bata pejal kelas 50.

Apabila dibandingkan dengan pembuatan bata kalsium silikat dari abu terbang hasil penelitian Ngurah Ardha dan Saleh (2003), maka secara umum bata geopolimer ini relatif memiliki keunggulan, karena tidak memerlukan campuran semen portland untuk mencapai kuat tekan > 50 kg/cm². Selain faktor aktivator (min. 0,5%), keunggulan bata geopolimer ini juga disebabkan oleh distribusi partikel pada fraksi kasar (ampas pencucian bauksit) yang lebih variatif (-12 + 100 mesh) dan tidak seragam, sehingga membentuk matriks ikatan yang lebih sempurna antara fraksi halus dan kasar dalam campuran antara residu bauksit (35%) dan abu terbang (25%) yang ternyata jauh lebih sedikit dibandingkan penggunaan abu terbang pada per-

Tabel 5. Hasil uji kuat tekan bahan geopolimer komposisi I dan II dengan variasi perlakuan (*curing* dan tanpa *curing* serta *aging*)

No.	Kode Sampel	Komposisi (% berat)	Sodium Silikat (% berat)	<i>Curing</i> (jam)	<i>Aging</i> (hari)	Kuat Tekan (kg/cm ²)
1.	2S7-1	RB 35% AL 25% AP 40%	2	-	7	65.23
2.	R7-1	RB 35% AL 25% AP 40%	2	24	7	33.77
3.	K14-3	RB 35% AL 25% AP 30% Kp 10%	0,5	24	14	76.46
4.	R14-2	RB 35% AL 25% AP 40%	2	24	14	81.09

cobaan pembuatan bata kalsium silikat yaitu sekitar 50-90% (Ardha dan Saleh, 2003).

pelat (hematit), pada AL nampak jelas tekstur bola-bola besar dan kecil, sedangkan pada AP nampak tekstur granular dan porus.

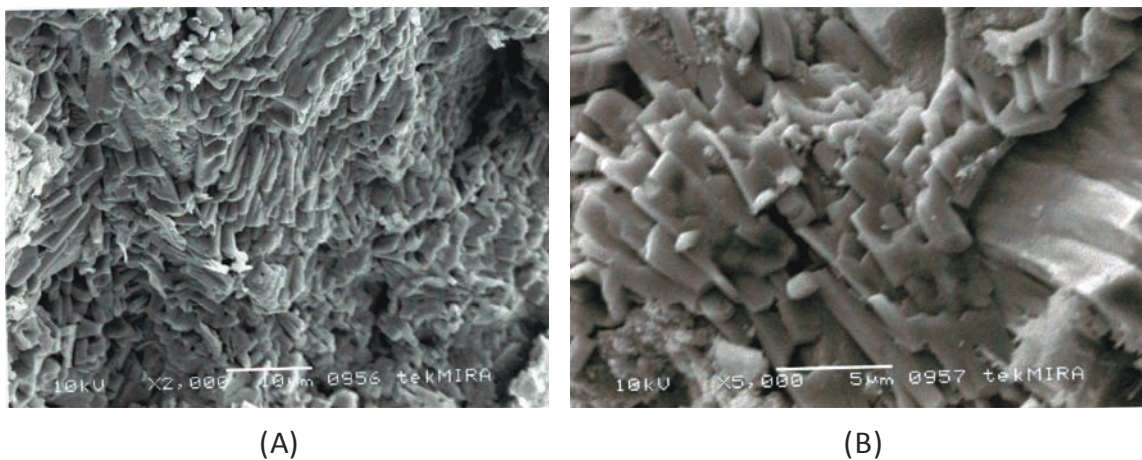
Karakterisasi Struktur Mikro

Bahan Baku

Hasil SEM pada bahan baku (RB=residu bauksit, AL=abu terbang, dan AP=ampas pencucian bauksit) yang ditunjukkan pada Gambar 5, nampak bahwa masing-masing bahan baku mempunyai tekstur yang berbeda yaitu pada RB nampak tekstur

Benda Uji Bahan Geopolimer

Hasil analisis SEM pada hasil benda uji (percontohan No.1) yang memiliki kuat tekan 65,23 kg/cm² ditunjukkan pada Gambar 14. Nampak tekstur memipa (*capillary*) sebagai fasa baru (geopolimer) yang berbeda dari tekstur bahan baku asalnya (Gambar 5).



Gambar 14. Tekstur memipa (*capillary*) fasa bahan geopolimer percontohan No.1 (kuat tekan 65,23 kg/cm²), (A) pembesaran 2.000 kali; (B) pembesaran 5.000 kali

Hasil Uji Toksisitas

Di samping uji kuat tekan terhadap benda uji bahan geopolimer, dilakukan pula pengujian toksisitas (TCLP = *Toxicity Characteristic Leaching Procedure*). Hasil pengujian TCLP ditunjukkan pada Tabel 6. Nampak dari hasil pengukuran bahwa toksisitas bahan baku geopolimer masih aman dari zat toksin.

Hasil Pengujian Kandungan Unsur Radioaktif

Pengujian kandungan unsur radioaktif dilakukan terhadap masing-masing percontohan residu bauksit, abu terbang dan ampas pencucian bauksit dengan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 7. Nampak dari hasil pengujian bahwa nilai I ($I = CRa/185 + CTh/259 + CK/4810$) jika dihitung berdasarkan

nilai-nilai hasil pengujian ternyata tidak melebihi nilai 1 yang berarti masih aman dari jarak dekat. Jadi bahan geopolimer hasil campuran dari bahan-bahan baku tersebut masih aman dari unsur radioaktif.

KESIMPULAN

Dari rangkaian hasil uji pembuatan bahan geopolimer ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Campuran sejumlah tertentu residu bauksit, abu terbang, ampas pencucian bauksit serta sodium silikat sebagai aditif dapat menghasilkan fasa baru (berbeda dari tekstur bahan baku asalnya) yaitu bertekstur kapiler yang cocok untuk bahan geopolimer.

Tabel 6. Hasil pengujian toksisitas (TCLP) *sludge* bahan baku geopolimer

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

Tabel 7. Hasil pengujian konsentrasi radioaktifitas residu bauksit, abu layang dan ampas pencucian bauksit.

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

- Komposisi dan kondisi optimal bahan geopolimer mencapai kuat tekan 65,23 kg/cm² yang ditunjukkan pada komposisi : residu bauksit 35 %, abu terbang 25 %, ampas pencucian bauksit 40 %, dan sodium silikat 2 %; pada kondisi tanpa curing dan waktu aging 7 hari.
- Kuat tekan benda uji bahan geopolimer tersebut dapat memenuhi syarat untuk pembuatan bata pejal kelas 50 (50 kg/cm² ≤ kuat tekan 100 kg/cm²) menurut standar Indonesia (SNI. 15-2094-2000), demikian pula dapat memenuhi syarat untuk plester pasangan bata pejal kelas 50.
- Bahan baku (residu bauksit, abu terbang, dan ampas pencucian bauksit) serta bahan geopolimer yang dihasilkan aman dari unsur toksin dan radioaktif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada beberapa pihak yang telah membantu dalam penelitian ini. Terima kasih kepada Bapak Deden Agus dan Bu Rasti Anggraeni yang melakukan pengujian kuat tekan di Laboratorium Geomekanika Puslitbang Tekmira. Terima kasih juga kepada Bapak Sunardi dan Bu Rina Febriani yang melakukan uji toksisitas di Pusat Penelitian Sumber Daya Alam dan Lingkungan (PPSDAL), LPPM-Universitas Padjadjaran. Terima kasih juga kepada Bapak Eko yang melakukan pengujian radioaktifitas di Laboratorium Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) BATAN. Terima kasih juga kepada para analis kimia Puslitbang Tekmira dan Bapak Tatang Wahyudi yang melakukan pengujian SEM. Dan terima kasih terutama kepada para staf dan editor Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara yang telah membantu dalam penulisan dan penerbitan karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Akinci A. and Recep A., 2007. *Characterization of trace elements and radionuclides and their risk assessment in red mud*. Elsevier : MTL-06200

Aziz M., dan Azhari, 2011. Pemanfaatan residu bauksit untuk pembuatan bata bangunan berbasis material geopolimer, *Laporan Hasil Litbang Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara*, 20 halaman.

Davidovits J., 1994. Geopolymers : Man-made rock geosynthesis and the resulting development of very early high strength cement, *Journal of Materials Education*, 16 [2-3], p. 91-137.

Hardjito D., Valerie J. S. W., dan Tang F. E., 2011. The use of fly ash and bottom ash in geopolimer mortar. *Seminar Nasional Zeolit VII*, Surabaya.

Lee W.K.W., dan J.S.J. Van Deventer, 2007. Chemical interaction between siliceous aggregates and low-Ca alkali-activated cements, *Cement and Concrete Research*, 37, Elsevier, p. 844-855.

Ngurah Ardha dan Saleh, N., 2003. Pemanfaatan abu terbang PLTU Portsit PT. Freeport Indonesia untuk bata kalsium silikat, *Laporan Hasil Penelitian dan Pengembangan*, Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara bekerja sama dengan PT. Freeport Indonesia, 24 halaman.

Pan, Z., Chang L., Lu Y., Yang N., 2002. Hydration products of alkali-Activated slag-red mud cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 32, Pergamon, p. 357-362

Putro G.S., 2008. <http://myscoutchemistry.wordpress.com/2008/05/30/geopolimer-material-ajaib-ramahlingkungan/>, diakses tanggal 11 Februari 2011.

Ruyters, S., Mertens J., Vassilieva E., Dehandschutter B., Poffijn A., Smolders E., 2011. 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.

Sakulich, A. R., Anderson E., Schauer C. L., Barsoum M. W., 2010. 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, p.1025-1035.

Yang J., dan Bo Xiao, 2008. Preparation of glass-ceramics from red mud in the aluminium industries. *Ceramics International*, 34, Elsevier, p. 125-130.

Zhang, N., Liu X., Sun H., Li L., 2010. *Pozzolanic behaviour of compound-activated red mud-coal gangue mixture*, Elsevier, CEMCON-04204.