PENGEMBANGAN BAHAN GEOPOLIMER DENGAN PEMANFAATAN LIMBAH ANORGANIK

Development of Geopolymer Material with Inorganic Waste Utilization

Tjokorde Walmiki Samadhi, Ryan Christnata Hardika, Randi Liustanto

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Bandung
Gedung Labtek X, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

Naskah diterima : 15 Juni 2016, Rev I : 17 Juni 2016, Diterima : 28 Juni 2016

ABSTRAK

Geopolimer merupakan padatan alkali-aluminosilikat pengganti semen Portland dengan kadar emisi karbon ekivalen yang jauh lebih rendah. Bahan konstruksi ini dihasilkan dari reaksi aluminosilikat padat dengan larutan alkali pekat pada temperatur rendah. Penelitian ini mengkaji kelayakan awal formulasi resep mortar geopolimer yang mengkombinasikan tiga bahan limbah anorganik, yakni abu terbang batubara (ASTM Class F), terak metalurgi EAF, serta abu sekam padi dari industri kecil batu bata. Resep mortar yang digunakan adalah limbah anorganik, pasir, larutan KOH 10 M dengan perbandingan 3 bagian berat : 2 bagian berat : 1 bagian berat. Variasi komposisi limbah anorganik diatur dengan rancangan percobaan *simplex centroid*. Pengolahan data dengan metode ANOVA menunjukkan bahwa pergeseran komposisi ke arah abu terbang meningkatkan kuat tekan, sementara abu sekam padi menurunkan kuat tekan. Persamaan campuran kuadratik dapat memodelkan kuat tekan sebagai fungsi komposisi dengan memadai. Peningkatan temperatur pengerasan mortar dari kondisi ruang ke 60 °C mempercepat reaksi geopolimerisasi sehingga meningkatkan kekuatan awal mortar. Setelah pengerasan selama 7 hari, mortar geopolimer abu terbang batubara menunjukkan kekuatan yang melebihi ambang batas ASTM C270 (5,2 MPa). Karakterisasi mikrostruktur menunjukkan keberlangsungan reaksi geopolimerisasi dengan baik untuk abu terbang dan terak EAF. Kurang berlangsungnya geopolimerisasi abu sekam padi diduga disebabkan oleh amorfositas bahan yang rendah.

Kata-kata kunci: geopolimer, bahan ramah lingkungan, abu terbang, abu sekam padi, terak

ABSTRACT

Geopolymer is an alkali-aluminosilicate proposed as a Portland cement substitute with a much lower equivalent carbon emission. This construction material is produced via low-temperature reaction between aluminosilicate solids and concentrated alkali solution.

This research studies the preliminary feasibility of geopolymer mortar formulation combining three inorganic wastes, namely coal fly ash (ASTM Class F), EAF metallurgical slag, and rice husk ash from a small brickmaking industry. The geopolymer mortar recipe contains inorganic waste, sand, KOH solution (10 M) with a weight ratio of 3 : 2 : 1. Inorganic waste compositions are varied according to a simplex centroid experimental design. Data treatment by ANOVA indicates that compositional shift towards fly ash increases mortar crushing strength, while rice husk ash reduces the strength. A quadratic mixture model adequately represents the strength as a function of composition. Increase of mortar curing temperature from ambient to 60 °C accelerates the geopolymerization, increasing the initial strength of the mortar. After curing for 7 days, fly ash geopolymer mortar exhibits a strength exceeding ASTM C270 standard (5.3 MPa). Microstructural characterization indicates that geopolymerization reaction does occur in fly ash and EAF slag mortars. Poor geopolymerization in rice husk ash is hypothesized to be caused by its low amorphosity.

Keywords: geopolymer, environmentally friendly materials, fly ash, rich husk ash, slag

I. PENDAHULUAN

Sebagai perwujudan tanggung jawab sebagai warga dunia yang mengupayakan pelestarian lingkungan global, Pemerintah RI telah berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 26% ekivalen- CO_2 dalam periode 2009-2020. Di dalam sektor industri, industri semen Portland memperoleh perhatian khusus karena kontribusinya yang besar terhadap emisi GRK global. Proses produksi klinker semen Portland menuntut temperatur yang sangat tinggi (sekitar 1450 °C) untuk menjalankan proses sintering bahan-bahan baku. Sebagai konsekuensinya, setiap ton produk semen memerlukan pasokan energi sekitar 3,0-6,5 GJ, dan menghasilkan emisi GRK setara 0,59 ton CO_2 [1]. Emisi GRK ini berasal dari

kalsinasi mineral bahan baku (60%), serta dari pembakaran bahan bakar untuk pemanasan tungku clinker (40%). Secara global, industri semen Portland menyumbang sekitar 5-7% emisi CO_2 total [2].

Selama sekitar 2 dekade terakhir, salah satu bahan yang dikembangkan sebagai pengganti semen Portland adalah geopolimer. Geopolimer merupakan golongan bahan padatan alkali-aluminosilikat yang dihasilkan melalui reaksi antara padatan aluminosilikat dengan larutan aktivator alkali hidroksida dan/atau alkali silikat. Mikrostruktur geopolimer dicirikan oleh fasa perekat yang berasal dari gel alkali aluminosilikat, yang terdiri dari gugus-gugus aluminat dan silikat tetrahedral yang berhubungan

membentuk jaringan 3 dimensi. Kation-kation Al^{3+} yang terkoordinasi secara tetrahedral memutus ikatan-ikatan ionik oksigen-kation, sehingga menghasilkan muatan negatif lokal yang dinetralkan oleh

kation-kation alkali yang disediakan oleh larutan aktivator geopolimer [3]. Reaksi polimerisasi geopolimer berlangsung menurut mekanisme kondensasi, seperti ditampilkan dalam Gambar 1 [4].

Gambar 1. Mekanisme reaksi polimerisasi geopolimer [4]

Geopolimer menjanjikan sejumlah kelebihan dibandingkan dengan semen Portland. Reaksi geopolimerisasi dapat dijalankan pada temperatur ruang, sehingga secara keseluruhan produksi geopolimer mengkonsumsi energi yang jauh lebih rendah. Penggantian semen Portland dengan geopolimer dilaporkan dapat mengurangi emisi CO₂ sebesar 44-64% [2]. Manfaat lingkungan lain yang ditawarkan oleh geopolimer adalah peluang memanfaatkan ulang berbagai bahan limbah padat sebagai bahan baku aluminosilikat, seperti abu terbang (*fly ash*) batubara [5], terak metalurgi (*metallurgical slag*) [6], abu sekam padi [7], dan bahkan puing bekas penghancuran bangunan [8].

Keberadaan terak metalurgi secara umum bergantung pada industri pirometalurgi, yang berjumlah relatif sedikit di Indonesia. Ketersediaan abu

terbang batubara di Indonesia terkait langsung dengan kapasitas produksi listrik oleh PLTU. Seiring dengan arahan batubara sebagai komponen utama bauran energi Indonesia, kelimpahan abu terbang batubara akan semakin meningkat. Produksi abu terbang batubara dari PLTU di Indonesia diperkirakan meningkat dari sekitar 1,70 juta ton pada tahun 2006 menjadi 2,78 juta ton pada tahun 2009 [9]. Angka ini belum memperhitungkan kontribusi dari pembangkit-pembangkit listrik dan/atau energi termal berbahan bakar batubara berukuran relatif kecil yang dioperasikan oleh berbagai industri menengah hingga berat di Indonesia untuk memenuhi kebutuhan utilitas sendiri. Ketersediaan abu biomassa (seperti sekam padi, tandan kosong sawit, dan sebagainya) di masa depan diperkirakan akan meningkat.

seiring dengan peningkatan porsi penyediaan energi berbahan bakar biomassa, yang dalam kebijakan Perpres No.5/2006 direncanakan untuk memasok sekitar 5% (bersama dengan sumber-sumber energi nuklir, air, surya, dan angin) kepada Bauran Energi Primer Nasional tahun 2025.

Tulisan ini memaparkan hasil kajian kelayakan awal penggunaan kombinasi abu batu bara, abu biomassa, dan terak metalurgi untuk memproduksi geopolimer, sebagai alternatif teknologi bahan yang diharapkan mampu mengurangi dampak lingkungan dari dua kegiatan sekaligus, yakni produksi semen Portland dan pembangkitan energi melalui pembakaran bahan bakar padat. Sebagai kajian awal, penelitian ini belum menargetkan keunggulan kuantitatif geopolimer dibandingkan dengan semen Portland, namun lebih difokuskan pada pembuktian prospek awal produksi geopolimer dari bahan-bahan limbah anorganik berdasarkan pengukuran kekuatan mekanik dan identifikasi keberlangsungan reaksi geopolimerisasi.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini memilih abu terbang batubara dan abu sekam padi sebagai reaktan aluminosilikat, berdasarkan kelimpahannya di Indonesia. Abu terbang batubara diperoleh dari PLTU Suralaya di Jawa Barat (termasuk ke dalam golongan abu terbang *ASTM Class F*), abu sekam padi diperoleh dari sebuah industri kecil batu bata di Kabupaten Bandung, sementara terak metalurgi diperoleh sebagai limbah dari unit EAF (*electric arc furnace*) di PT Krakatau Steel. Masing-masing bahan dihaluskan dengan *ball mill* dan ditapis dengan ayakan standar 200-mesh sebelum digunakan.

Variabel percobaan yang dikaji adalah komposisi campuran bahan baku aluminosilikat serta temperatur pengerasan. Komposisi campuran bahan baku diatur sesuai dengan rancangan percobaan tipe *simplex centroid*, seperti ditampilkan dalam Gambar 2. Percobaan ini melibatkan tujuh kombinasi komposisi campuran bahan baku.

Gambar 2. Rancangan percobaan campuran tipe *simplex centroid*

Produk geopolimer yang dibuat dalam penelitian ini berupa adukan mortar, dengan resep umum padatan aluminosilikat, pasir, larutan KOH dengan perbandingan 3 : 2 : 1 dalam satuan berat. Untuk pasir dipilih pasir cor beton yang lolos ayakan standar 8-mesh. Larutan KOH dibuat dengan melarutkan serpihan-serpihan KOH padat dalam air bebas mineral sehingga diperoleh larutan KOH 10 M. Pencampuran ketiga bahan ini dilakukan pada sebuah unit *planetary mixer* (atau *Hobart mixer*), dalam periode waktu yang cukup untuk menghasilkan adukan yang relatif homogen, dengan konsistensi menyerupai adukan beton. Agregat mortar ini kemudian dituang ke dalam cetakan dengan ukuran (5 x 5 x 5) cm.

Pengerasan pada temperatur ruang dilakukan dengan membiarkan mortar cetak di tempat yang terbuka namun terlindung dari debu maupun jatuhnya benda-benda lainnya. Pengerasan pada 60 °C dilakukan di dalam *oven* pengering yang beroperasi secara kontinu. Periode pengerasan untuk kedua temperatur adalah 7 hari.

Karakterisasi bahan baku mencakup analisis komposisi oksida dengan metode fluoresensi sinar-X (XRF). Karakterisasi mekanik produk melibatkan pengukuran kuat tekan spesimen-spesimen agregat mortar yang telah menjalani pengerasan selama 7 hari menggunakan alat uji beban

uniaksial universal. Karena keterbatasan kuantitas bahan baku khususnya terak metalurgi, setiap kombinasi tempuhan dalam percobaan *simplex centroid* hanya dijalankan dengan jumlah replikasi dua kali (*duplo*). Untuk membuktikan keberlangsungan reaksi geopolimerisasi, dilakukan karakterisasi morfologi menggunakan metode mikroskopi elektron pindaian (SEM) terhadap pasta geopolimer yang telah dibiarkan mengeras pada temperatur ruang selama 28 hari.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis komposisi oksida ketiga bahan limbah anorganik dirangkum dalam Tabel 1. Komposisi abu terbang batubara menunjukkan kuantitas relatif SiO_2 dan Al_2O_3 yang tipikal untuk pembentukan fasa-fasa aluminosilikat. Terak metalurgi menunjukkan kadar Fe_2O_3 dan CaO yang tinggi. Komponen Fe_2O_3 tentunya berasal dari bijih besi yang digunakan sebagai umpan produksi baja, sementara CaO berasal dari batu kapur yang digunakan dalam proses EAF sebagai senyawa pelebur (*fluxing agent*) yang mempermudah penghilangan fasa-fasa pengotor seperti alumina dan silika. Abu sekam padi memiliki komposisi yang unik di antara berbagai biomassa dalam hal kadar SiO_2 yang sangat tinggi dan alkali yang relatif rendah [10].

Tabel 1. Analisis Komposisi Oksida Bahan-bahan Limbah Anorganik

Oksida	Konsentrasi, %-massa		
	Abu terbang	Terak metalurgi	Abu sekam padi
SiO ₂	46,34	10,04	88,65
Al ₂ O ₃	20,36	7,45	1,03
Fe ₂ O ₃	15,07	41,34	0,609
TiO ₂	0,84	0,66	0,045
Na ₂ O	1,48	0,05	0,0553
K ₂ O	1,04	0,046	2,01
CaO	8,4	28,39	0,768
MnO	0,22	2,07	0,124
MgO	3,54	6,84	0,449
P ₂ O ₅	0,28	0,36	1,19
SO ₃	0,7	-	0,427
LOI	1,47	-	-

Hasil pengukuran kuat tekan mortar geopolimer dengan pengerasan pada temperatur ruang dan pada 60 °C dirangkum dalam Tabel 2. Data untuk setiap kombinasi tempuhan merupakan hasil perata-rataan dari dua kali uji tekan. Jika dibandingkan dengan standar ASTM C 270 yang menyatakan bahwa kuat tekan minimum mortar semen tipe N berumur 28 hari adalah 5,2 MPa (52,99 kgf/cm²), dapat disimpulkan bahwa hanya geopolimer dari abu terbang yang mampu menghasilkan kuat tekan yang memuaskan melalui

proses pengerasan pada temperatur ruang.

Peningkatan temperatur pengerasan menjadi 60 °C menghasilkan kuat tekan pada semua komposisi geopolimer. Peningkatan temperatur pematangan telah diketahui dapat mempercepat reaksi geopolimerisasi, sehingga meningkatkan kekuatan awal geopolimer [11].

Dua formulasi geopolimer, yakni abu terbang dan campuran biner abu terbang – terak metalurgi menunjukkan kuat tekan yang jauh di atas nilai standar ASTM C270.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Kuat Tekan Mortar Geopolimer Setelah Pengerasan Selama Tujuh Hari

Komposisi limbah	Kekuatan Tekan Rata-rata (kg/cm ²)	
	T ruang	60 °C
Abu terbang	92.52	470,6
Abu sekam padi	0.14	4,4
Terak metalurgi	18.06	27,24
Abu terbang : abu sekam	1.5	14,62
Abu terbang : terakmetalurgi	24.36	270,82
Abu sekam : terakmetalurgi	1.44	1,72
Abu terbang : abu sekam : terakmetalurgi	4.26	7,98

Untuk mengkuantifikasi besaran efek komposisi bahan limbah anorganik serta temperatur pengerasan, dilaksanakan pengolahan statistik terhadap data kuat tekan dengan metode ANOVA, dengan bantuan perangkat lunak Minitab 16. Sebagai model pencampuran empirik untuk prosedur ANOVA dipilih model kuadratik dengan tambahan satu variabel proses, yakni temperatur pengerasan.

Hasil pengolahan data dengan metode ANOVA ditampilkan sebagai keluaran paket program Minitab16 pada Tabel 3. Pada tingkat keyakinan 95%, hasil ini menunjukkan keberartian pengaruh temperatur pengerasan serta interaksi antara komposisi dan temperatur pengerasan. Tabel 3 hanya mencakup

suku-suku model yang berarti secara statistik. Hubungan antara kuat tekan dengan komposisi dan temperatur pengerasan yang diperoleh melalui regresi dalam metode ANOVA dinyatakan dalam Persamaan (1), dan digambarkan dalam bentuk peta kontur di Gambar 2.

$$\sigma_c = 279.3X_{FA} - 2.5X_{RHA} + 12.7X_{MS} - 569.6X_{FA}X_{RHA} + 198.8X_{FA}T - 405.7X_{FA}X_{RHA}T \quad (1)$$

dengan:

σ_c = kuat tekan, kgf/cm²

X_{FA} = fraksi massa abu terbang

X_{RHA} = fraksi massa abu sekam padi

X_{MS} = fraksi massa terak metalurgi

T = temperatur pengerasan, °C

Tabel 3. Hasil keluaran ANOVA dengan Minitab 16 untuk data kuat tekan (FA = abu terbang, RHA = abu sekam padi, MS = terak metalurgi)

Estimated Regression Coefficients for Kuat Tekan, kg/cm2 (component proportions)						
Term	Coef	SE Coef	T	P	VIP	
FA	279.3	36.36	*	*	1.332	
RHA	-2.5	36.36	*	*	1.332	
MS	12.7	33.00	*	*	1.097	
FA*RHA	-569.6	182.74	-3.12	0.005	1.563	
FA*Curing T	198.8	35.62	5.58	0.000	1.278	
FA*RHA*Curing T	-405.7	165.26	-2.46	0.022	1.278	
* NOTE * Coefficients are calculated for coded process variables.						
S = 79.9752 PRESS = 375332						
R-Sq = 77.18% R-Sq(pred) = 39.13% R-Sq(adj) = 71.99%						
Analysis of Variance for Kuat Tekan, kg/cm2 (component proportions)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	475937	475937	95187	14.88	0.000
Component Only						
Linear	2	214358	243486	121743	19.03	0.000
Quadratic	1	62148	62148	62148	9.72	0.005
FA*RHA	1	62148	62148	62148	9.72	0.005
Component* Curing T						
Linear	1	160878	199249	199249	31.15	0.000
FA*Curing T	1	160878	199249	199249	31.15	0.000
Quadratic	1	38553	38553	38553	6.03	0.022
FA*RHA*Curing T	1	38553	38553	38553	6.03	0.022
Residual Error	22	140713	140713	6396		
Lack-of-Fit	8	8629	8629	1079	0.11	0.998
Pure Error	14	132084	132084	9435		
Total	27	616650

Gambar 2. Peta kontur kuat tekan (kgf/cm^2) mortar geopolimer setelah pengerasan selama 7 hari dan pengerasan pada: (a) temperatur ruang (b) 60°C

Koefisien suku pencampuran linier abu terbang yang jauh lebih besar daripada kedua komponen limbah lainnya menunjukkan bahwa pergeseran komposisi ke arah abu terbang akan meningkatkan kuat tekan mortar. Gambar 2.a. dan 2.b. dengan jelas menunjukkan peningkatan kuat tekan dengan pergeseran komposisi menuju abu terbang ini. Sebaliknya, koefisien suku pencampuran linier abu sekam padi yang bernilai negatif menunjukkan bahwa pergeseran komposisi ke arah abu sekam padi akan menurunkan kuat tekan. Mortar geopolimer terak metalurgi menunjukkan kuat tekan menengah relatif terhadap abu terbang dan abu sekam padi. Gambar 2 menunjukkan bahwa pergeseran dari komposisi yang kaya dengan abu sekam padi ke arah terak akan meningkatkan kuat tekan.

Adanya komponen kuadratik $X_{FA}X_{RHA}$ dengan koefisien negatif besar mengisyaratkan adanya efek antagonistik, dimana kontribusi peningkatan kekuatan dari abu terbang dilawan oleh penurunan kekuatan oleh abu sekam padi. Efek antagonistik ini menghasilkan respons yang tidak linier terhadap komposisi. Besaran koefisien suku pencampuran kuadratik menunjukkan intensitas ketaklinieran respons kuat tekan terhadap pergeseran komposisi campuran pada sumbu biner (menjaga salah satu komponen pada fraksi tetap).

Pengaruh positif peningkatan temperatur pengerasan terhadap kuat tekan muncul pada suku $X_{FA}T$ pada Persamaan (1). Meskipun secara matematik efek positif ini dilawan oleh efek antagonistik dari suku $X_{FA}X_{RHA}T$, perbandingan antara nilai-nilai kuat tekan

dengan pengerasan pada temperatur ruang dan pada 60 °C di Tabel 2 menunjukkan peningkatan kuat tekan terhadap temperatur pengerasan untuk semua komposisi. Meski demikian, pemanasan geopolimer untuk pengerasan ini tentunya memerlukan kajian kemampooterapan tersendiri, terutama bagi produk yang berukuran besar dan difabrikasi langsung di titik penggunaan (misalnya struktur bangunan yang relatif berat).

Untuk mengevaluasi secara kualitatif keberlangsungan reaksi geopolimerisasi, sampel-sampel mortar geopolimer dengan formulasi bahan aluminosilikat tunggal yang telah mengeras selama 28 hari pada temperatur ruang dikarakterisasi mikrostrukturnya dengan metode SEM. Gambar 3 hingga 5 masing-masing menampilkan mikrograf SEM mortar geopolimer abu terbang, abu sekam padi, dan terak metalurgi pada perbesaran rendah (100x) dan tinggi (1000x). Mikrostruktur mortar geopolimer abu

terbang menunjukkan bahwa fasa gel geopolimer terbentuk dengan baik, yang nampak sebagai fasa kontinu yang menjembatani partikel-partikel agregat yang lebih kasar. Hal demikian juga diamati pada geopolimer terak. Pengamatan ini konsisten dengan hasil pengukuran kuat tekan mortar, dimana pergeseran komposisi geopolimer dari pusat bidang eksperimen (yakni geopolimer dengan komposisi berimbang 1:1:1) ke arah abu terbang atau terak akan meningkatkan kuat tekan, sementara pergeseran ke arah abu sekam padi akan menurunkan kuat tekan. Tingkat keberlangsungan reaksi geopolimerisasi yang buruk pada abu sekam padi mengisyaratkan reaktivitas yang rendah terhadap larutan alkali, yang diduga disebabkan oleh amorfositas yang rendah dari abu sekam padi. Amorfositas ini dipengaruhi oleh kondisi pembakaran, dimana temperatur tinggi dan periode pembakaran yang panjang cenderung menurunkan amorfositas abu sekam padi [12].

Gambar 3. Mikrograf SEM sampel mortar geopolimer abu terbang setelah pengerasan selama 28 hari pada temperatur ruang. (a) perbesaran 100x (b) perbesaran 1000x

Gambar 4. Mikrograf SEM sampel mortar geopolimer abu sekam padi setelah pengerasan selama 28 hari pada temperatur ruang. (a) perbesaran 100x (b) perbesaran 1000x

Gambar 4. Mikrograf SEM sampel mortar geopolimer terak metalurgi pengerasan selama 28 hari pada temperatur ruang. (a) perbesaran 100x (b) perbesaran 1000x

KESIMPULAN

Upaya pengurangan dampak lingkungan semen Portland telah dilakukan dengan mengkaji kuat tekan mortar geopolimer yang diformulasikan dari kombinasi tiga bahan limbah aluminosilikat padat, yakni abu terbang batubara (tipe *ASTM Class F*), terak EAF, dan abu sekam padi. Hasil pengukuran kuat tekan sejumlah resep mortar geopolimer dengan komposisi yang divariasikan menurut rancangan percobaan *simplex centroid* menunjukkan keunggulan abu terbang batubara relatif terhadap kedua bahan limbah lainnya. Sementara itu, peningkatan kadar abu sekam padi menurunkan kuat tekan mortar geopolimer dan terak EAF cenderung menghasilkan kuat tekan menengah.

Peningkatan temperatur pengerasan dari temperatur ruang menjadi 60 °C dapat meningkatkan kuat tekan mortar secara berarti, namun dengan kemampooterapan yang masih sangat memerlukan kajian lebih lanjut. Dari karakterisasi mikrostruktur mortar dapat dihipotesiskan bahwa rendahnya kekuatan mekanik geopolimer abu sekam padi disebabkan oleh tingkat amorfosititas yang rendah. Hal ini pada gilirannya disebabkan oleh temperatur pembakaran sekam yang tinggi pada saat abu tersebut diproduksi. Dengan demikian, interaksi antara kondisi pembakaran, amorfosititas abu, serta karakteristik mekanik dan mikrostruktur geopolimer yang dihasilkan merupakan masalah yang sangat menarik untuk

UCAPAN TERIMA KASIH

Riset yang melahirkan karya tulis ini didanai oleh program Asahi Glass Foundation Research Grant 2015-2016, yang dikelola oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Institut Teknologi Bandung. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Rekayasa Struktur Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung, atas bantuan akses penggunaan peralatan uji di laboratorium tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Leila Chennoufi, Hilary Hoagland-Grey, Milena Breisinger, dan Emmanuel Boulet, "Cement Manufacturing Plant Guidelines", The Inter-American Development Bank, (2010)
2. Benjamin C. McLellan, Ross P. Williams, Janine Lay, Arie van Riessen, dan Glen D. Corder, "Costs and Carbon Emissions for Geopolymer Pastes in Comparison to Ordinary Portland Cement", *J. Clean Prod.* 19 [9-10] 1080-1090 (2011)
3. John L. Provis dan Jannie S.J. van Deventer, "Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications", CRC Press, Boca Raton, 2009
4. Joseph Davidovits, "Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials", *J. Therm. Anal.* 37 1633-1656 (1991)
5. J.G.S. van Jaarsveld, Jannie S.J. van Deventer, dan G.C. Lukey, "The Characterization of Source Materials in Fly Ash-Based Geopolymers", *Mater. Lett.* 57 1272-1280 (2003)
6. K. Komnitsas, D. Zaharaki, dan V. Perdikatsis, "Geopolymerization of Low Calcium Ferronickel Slag", *J. Mater. Sci.* 42 3073-3082 (2007)
7. S. Detphan dan P. Chindaprasirt, "Preparation of Fly Ash and Rice Husk Ash Geopolymers", *Int. J. Min. Met. Mater.* 16 [6] 720-726 (2009)
8. A. Allahverdi dan E. Najafi Kani, "Construction Wastes as Raw Materials for Geopolymer Binders", *Int. J. Civ. Eng.* 7 [3] 154-160 (2009)
9. Muchtar Aziz, Ngurah Ardha, dan Lili Tahli, "Karakterisasi Abu Terbang PLTU Suralaya dan Evaluasinya untuk Refraktori Cor", *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara* [36] 1-8 (2006)
10. Stanislav V. Vassilev, David Baxter, Lars K. Andersen, dan Christina G. Vassileva, "An Overview of the Chemical Composition of Biomass", *Fuel* 89 913-933 (2010)
11. Pavel Rovnanik, "Effect of Curing Temperature on the Development of Hard Structure of Metakaolin-Based Geopolymer", *Constr. Build. Mater.* 24 1176-1183 (2010)
12. Iara J. Fernandes, Daiane Calheiro, Amanda G. Kieling, Carlos A.M. Moraes, Tatiana L.A.C. Rocha, Feliciane A. Brehm, dan Regina C.E. Modolo, "Characterization of Rice Husk Ash Produced Using Different Combustion Techniques for Energy", *Fuel* 165 351-359 (2016)