

Kajian Karakteristik Kimia dan Fisika Abu Layang yang Menjadi Penentu Kekuatan Mekanik Perekat Geopolimer Berbahan Dasar Abu Layang

Diah Kartika Sari¹; Endang Purwanti Setyaningsih¹; Hamzah Fansuri*¹ dan Tri Eddy Susanto²

¹Departemen Kimia, Fakultas Ilmu Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Kampus ITSSukolilo, Surabaya 60111 Indonesia

²Product and Application Development, PT Semen Indonesia, Gresik, Jawa Timur 61122

*E-mail: h.fansuri@chem.its.ac.id

Abstrak

Konversi abu layang menjadi geopolimer merupakan salah satu cara yang tepat untuk mengurangi permasalahan limbah abu batubara yang merupakan limbah B3 dan setiap tahunnya terus menerus meningkat produksinya. Pada penelitian ini digunakan abu layang dari PLTU Pacitan, Semen Gresik, Petrokimia Gresik, dan Australia sebagai bahan dasar pembuatan geopolimer. Metode pembuatan geopolimer ini mengacu pada penelitian sebelumnya. Kuat tekan geopolimer yang diukur pada usia 7 hari setelah curing secara berurutan adalah sebesar 46,71; 42,6; 42,6; 9,55 MPa. Hasil analisis terhadap sifat fisika kimia yang meliputi komposisi fasa dan kristalinitas, morfologi dan ukuran partikel serta komposisi unsur penyusun abu layang menunjukkan bahwa faktor yang memiliki pengaruh paling kuat pada penelitian ini adalah ukuran partikel abu layang. Abu layang dengan ukuran partikel terbesar menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan terendah. Kandungan kalsium yang tinggi menghasilkan setting time yang pendek dan semua geopolimer yang memiliki kuat tekan tinggi terbuat dari abu layang dengan kandungan Fe_2O_3 yang tinggi pula.

Kata Kunci: Geopolimer, abu layang, kuat tekan.

I. Pendahuluan

Abu layang (fly ash) merupakan salah satu limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) yang diperoleh dari hasil pembakaran batubara. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu penghasil abu layang dan abu dasar (bottom ash) dalam jumlah yang sangat

besar. Di Indonesia, produksi abu layang dan abu dasar dari tahun ke tahun semakin meningkat seiring dengan peningkatan jumlah PLTU [1].

Pada saat ini, telah banyak upaya yang dilakukan untuk meningkatkan penggunaan abu layang. Salah satu contohnya adalah pemanfaatan abu layang sebagai bahan

baku geopolimer yang selanjutnya dapat digunakan dalam berbagai aplikasi misalnya sebagai pengganti Semen Portland.

Geopolimer merupakan polimer anorganik aluminosilikat. Berbagai bahan aluminosilikat seperti abu layang, kaolin, abu sekam padi dan sebagainya dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan geopolimer. Abu layang sebagai bahan baku pembuatan geopolimer memiliki keistimewaan dibandingkan bahan lain yang berasal dari alam seperti kaolin. Abu layang adalah limbah dari PLTU yang jika tidak dimanfaatkan maka akan menjadi masalah karena sifatnya yang merupakan limbah B3 [2]. Sebaliknya, kaolin adalah bahan alam yang jika digunakan maka akan dapat merusak keseimbangan/kelestarian alam.

Di balik kelebihan tersebut, abu layang memiliki kelemahan utama yaitu sifat-sifatnya sangat ditentukan oleh jenis batubara yang digunakan oleh PLTU, cara pengolahan sebelum pembakaran, cara pembakaran dan cara pengolahan limbah pasca pembakaran. Oleh karena itu abu layang yang dihasilkan memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang sangat beragam. Sifat-

sifat fisika-kimia tersebut akan mempengaruhi proses geopolimerisasi dari abu layang [3].

Pada penelitian ini dilakukan kajian sifat fisika-kimia dari abu layang yang dihasilkan dari empat sumber berbeda dan kaitannya dengan geopolimer yang dihasilkan. Sifat-sifat Fisika-kimia abu layang dikaji menggunakan XRD, XRF dan SEM, sedangkan sifat geopolimer yang dihasilkan dikaji dari kuat tekan tekannya..

II. Metode Penelitian

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah gelas plastik, sendok plastik, botol timbang, neraca analitik, oven, mixer, plastik klip dan cetakan geopolimer berbentuk silinder dengan rasio diameter:tinggi yaitu 1:2. Peralatan yang digunakan untuk karakterisasi adalah mesin penguji kuat tekan (universal testing machine), X-Ray Diffraction (XRD Xpert PANalytical), Scanning Electron Microscopy (SEM Zeiss EVO tipe MA 10) dan X-Ray Fluorescence (XRF PANalytical minipal 4).

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah abu layang dari PLTU Pacitan, Semen Gresik, Petrokimia Gresik, dan Australia; natrium hidroksida (NaOH) p.a., natrium silikat (Na_2SiO_3) teknis (water glass), aluminium hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dan air terdemineralisasi (aqua DM).

2.2. Preparasi Abu Layang

Abu layang diayak menggunakan ayakan 100 mesh dan dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam. Abu layang yang telah dikeringkan selanjutnya dikarakterisasi dengan XRD untuk mengetahui sifat-sifat kristal dan fasanya, XRF untuk mengetahui komposisi unsur dan SEM untuk mengetahui morfologi dan bentuk partikel abu layang.

2.3. Pembuatan Geopolimer

Pembuatan geopolimer dalam penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada penelitian sebelumnya [3]. Pembuatan geopolimer dimulai dengan mencampurkan abu layang dengan larutan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dan basa pengaktif. Larutan $\text{Al}(\text{OH})_3$ dibuat dengan melarutkan 3,4 gram serbuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ ke dalam 24,5 mL

aqua DM. Pencampuran bahan-bahan tersebut dilakukan dengan mixer selama 4 menit. Selanjutnya pasta geopolimer yang terbentuk dimasukkan ke dalam cetakan geopolimer. Pasta yang telah dimasukkan ke dalam cetakan kemudian didiamkan selama 24 jam hingga mengeras. Geopolimer yang telah mengeras selanjutnya dimasukkan ke dalam plastik klip lalu dipanaskan di dalam oven selama 24 jam pada suhu 55°C .

III. Hasil Pembahasan

3.1 Pembuatan Geopolimer

Pembuatan geopolimer diawali dengan pembuatan basa pengaktif yang merupakan campuran dari natrium silikat dengan larutan NaOH. Pertama-tama pellet NaOH dilarutkan ke dalam aqua DM kemudian diperam minimal 6 jam untuk mengembalikan suhu dari larutan NaOH tersebut karena reaksi pelarutan NaOH bersifat eksotermis. Pemeraman selama 6 jam juga dilakukan untuk menyetimbangkan kondisi larutan NaOH yang dapat bereaksi dengan CO_2 di udara. Setelah 6 jam berlalu, dilakukan penambahan larutan natrium silikat dan

diperlakukan sama seperti pada pembuatan larutan NaOH.

Komposisi bahan dalam pembuatan geopolimer disajikan pada Tabel 1. Komposisi tersebut mengacu pada penelitian terdahulu yang telah dilaporkan

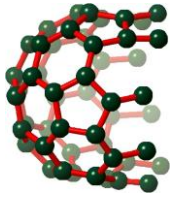
oleh Fansuri dkk. [3] yang menggunakan abu layang dari PT IPMOMI di Probolinggo. Hasil pengamatan pada pembuatan geopolimer dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi bahan dalam pembuatan geopolimer

Bahan	Satuan	Nilai
Abu Layang	g	260,0
NaOH pelet	g	28,0
Serbuk Al(OH) ₃	g	3,4
Waterglass (Na ₂ SiO ₃)	g	80,0
Aqua DM total	ml	61,3

Tabel 2. Hasil pengamatan pada pembuatan geopolimer

No	Nama Sampel	<i>Setting time</i>	Keterangan
1	PLTU Pacitan	48 jam (2 hari)	Agak kental dan mudah dicetak
2	Semen Gresik	24 jam (1 hari)	Kental dan mudah dicetak
3	Petrokimia Gresik	24 jam (1 hari)	Agak kental dan mudah dicetak
4	Australia	168 jam (7 hari)	Kental dan mudah dicetak



Setting time adalah waktu yang dibutuhkan oleh pasta geopolimer untuk mengeras dan dapat dikeluarkan dari cetaknya. *Setting time* geopolimer dari abu layang Semen Gresik dan Petrokimia Gresik sama-sama 24 jam namun, geopolimer dari abu layang Semen Gresik lebih cepat mengeras daripada geopolimer dari abu layang Petrokimia Gresik. Geopolimer dari abu layang PLTU Pacitan dan Australia memiliki *setting time* yang jauh lebih panjang yaitu, secara berurutan, 48 dan 168 jam. Perbedaan *setting time* ini kemungkinan terjadi karena adanya perbedaan tipe abu layang sebagaimana telah dilaporkan oleh Purwantoro dkk. [4]. Abu layang tipe C memiliki kandungan kalsium lebih dari 10% yang dapat menyebabkan *setting time* yang cepat. Kemungkinan lainnya adalah rasio $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$ yang tidak sesuai dengan abu layang yang digunakan pada pembuatan geopolimer [5].

Gambar 1 menunjukkan proses pencetakan dan pemeraman pasta geopolimer dari empat sumber abu layang yang berbeda-beda. Pemeraman dilakukan hingga geopolimer bisa dikeluarkan dari cetakan silinder dan dilakukan *curing* pada suhu 55 °C selama 24 jam. *Curing* dilakukan untuk memfasilitasi reaksi

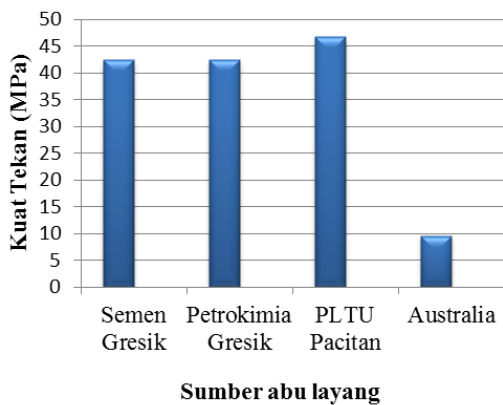
geopolimerisasi abu layang sehingga kuat tekan akan meningkat [6]. Selain itu, *curing* juga dapat mencegah timbulnya retakan pada geopolimer, menjaga perbedaan suhu geopolimer dengan lingkungan sekitar, dan juga meningkatkan kuat tekan. Pada proses *curing*, geopolimer dibungkus dengan plastik untuk mengurangi kehilangan air atau penguapan selama *curing* berlangsung hingga pengujian kuat tekan dilakukan seperti yang dilaporkan oleh Ekaputri dkk. [7].



Gambar 1. Pencetakan dan pemeraman pasta geopolimer dari abu layang: (A) Australia, (B) Semen Gresik, (C) PLTU Pacitan dan (D) Petrokimia Gresik.

3.2 Kuat Tekan Geopolimer

Pengukuran kuat tekan dilakukan pada geopolimer yang telah berusia 7 hari setelah *curing*, sesuai dengan metode SNI 1974 tahun 2011 [8]. Kuat tekan geopolimer merupakan indikasi mutu sebuah struktur dimana semakin tinggi kekuatan tekannya, semakin tinggi pula mutu geopolimer yang dihasilkan. Data kuat tekan geopolimer disajikan pada Gambar 2 dan data nilai kuat tekan rata-rata disajikan pada Tabel 3.



Gambar 2. Kuat tekan geopolimer pada usia 7 hari

Kuat tekan geopolimer ditentukan oleh komposisi (yang dinyatakan sebagai rasio molar $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}$ dan *Solid:Liquid* (S/L)), waktu dan kondisi *curing* dan usia geopolimer. Pada penelitian ini, faktor-faktor S/L, waktu dan kondisi *curing*, usia geopolimer serta faktor-faktor penentu lainnya dibuat sama sehingga yang menjadi penentu kuat

tekan geopolimer hanyalah komposisi yang sangat bergantung kepada abu layang yang digunakan. Dari empat abu layang yang digunakan, geopolimer dari abu layang Australia yang menghasilkan kuat tekan pada usia 7 hari yang paling rendah sedangkan geopolimer lainnya memiliki kuat tekan yang setara. Jika dikaitkan dengan waktu setting maka geopolimer dengan waktu setting lebih dua hari menghasilkan kuat tekan yang rendah.

Tabel 3. Nilai kuat tekan geopolimer pada usia 7 hari

Nama sampel	Kuat Tekan (MPa)
Semen Gresik	42,46
Petrokimia Gresik	42,46
PLTU Pacitan	46,71
Australia	9,55

Untuk mendapatkan informasi lebih dalam mengenai sifat-sifat abu layang yang mempengaruhi komposisi (rasio-rasio molar $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2:\text{Na}_2\text{O}$, $\text{H}_2\text{O}:\text{Na}_2\text{O}$) maka dilakukan karakterisasi abu layang. Karakterisasi tersebut meliputi komposisi fasa dan kekristalan, komposisi unsur penyusun abu layang dan morfologi partikel-partikel abu layang. Ketiga sifat

fisika dan kimia ini menentukan jumlah dan keadaan spesies-spesies ionik pembentuk geopolimer yaitu SiO_4^{4-} dan AlO_4^{5-} beserta kereaktifannya di dalam campuran dalam proses pembuatan geopolimer.

3.3 Komposisi Fasa dan Kekristalan Abu Layang

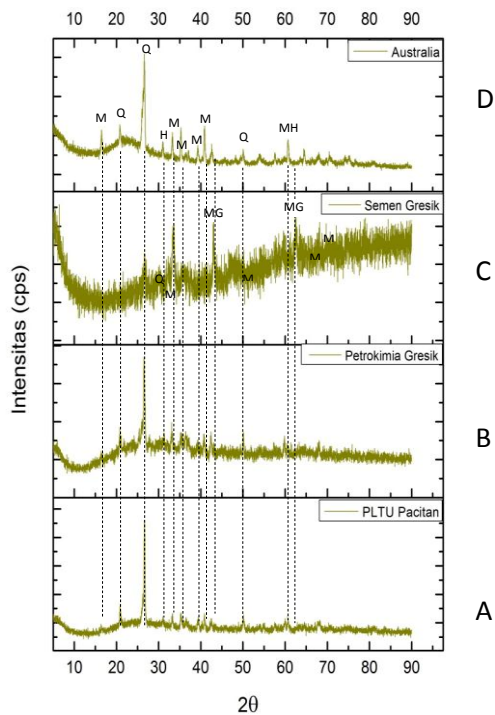
Komposisi fasa dan kekristalan abu layang diamati menggunakan XRD. Difraktogram hasil pengamatan disajikan pada Gambar 4. Difraktogram tersebut menunjukkan adanya fasa-fasa kwarsa (Q), mullit (M), *hercynite* (H), magnetit (MG) dan maghemit (MH). Tingkat kekristalan abu layang (Tabel 4) yang diukur dari intensitas relatif puncak-puncak difraksinya menunjukkan bahwa abu layang Semen Gresik adalah yang memiliki tingkat kekristalan terendah sedangkan abu layang lainnya relatif sama.

Fasa kwarsa mendominasi fasa kristal pada abu layang PLTU Pacitan dan Petrokimia Gresik. Fasa magnetit mendominasi abu layang Semen Gresik, sedangkan mullit mendominasi fasa kristal abu layang Australia. Fasa amorf aluminosilikat terlihat pada ke empat abu layang yang ditunjukkan oleh gundukan pada 2 θ antara 15 dan 40 $^\circ$.

Perbedaan kekristalan dan fasa yang dikandung menentukan kereaktifan abu layang dan pada akhirnya menentukan pula jumlah spesies SiO_4^{4-} dan AlO_4^{5-} yang ada dalam campuran pasta geopolimer saat terjadi geopolimerisasi. Hal ini berpengaruh terhadap jumlah maupun rasio ion-ion tersebut. Tidak semua Si dan Al pada abu layang akan larut pada saat pencampuran dengan larutan pengaktif. Xu dan van de Venter [9] melaporkan bahwa Si dan Al dalam fasa amorf lebih mudah melarut dalam kondisi basa yang kuat. Abu layang yang memiliki fasa amorf lebih banyak akan lebih reaktif sehingga ia lebih mudah mengalami pelarutan Si dan Al dalam larutan alkalin walaupun dalam laporan yang lainnya ditunjukkan bahwa keberadaan fasa kristalin tidak berpengaruh secara signifikan terhadap sifat geopolimer yang dihasilkan [10].

Kekristalan tertinggi ditunjukkan oleh abu layang Petrokimia Gresik dan yang terendah adalah abu layang Semen Gresik. Jika kekristalan merupakan faktor utama yang menentukan kereaktifan geopolimer maka seharusnya geopolimer dari abu layang Australia bukanlah yang kekutan tekan-nya paling rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kekristalan abu layang tidak secara langsung terkait

dengan kuat tekan geopolimer yang dihasilkan sebagaimana dilaporkan oleh Atmaja dkk [10]. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh komposisi fasa di mana abu layang Australia memiliki komposisi fasa yang sama dengan abu layang PLTU Pacitan.



Gambar 4. Difraktogram sinar-X abu layang: A) PLTU Pacitan, B) Petrokimia Gresik, C) Semen Gresik dan D) Australia

3.4 Morfologi Abu Layang

Reaktivitas abu layang dimungkinkan juga terpengaruh oleh bentuk dan ukuran partikel. Abu layang berukuran lebih kecil tentu lebih reaktif

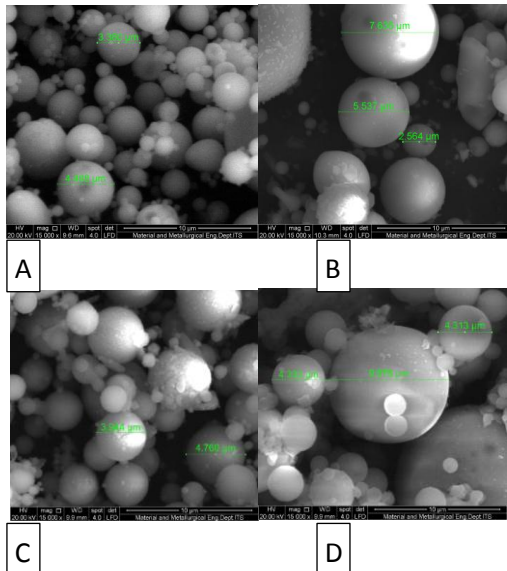
daripada yang berukuran lebih besar. Demikian pula dengan bentuk partikelnya, semakin kasar partikelnya, semakin tinggi luas permukaannya sehingga abu layang semakin reaktif.

Tabel 4. Kekristalan relatif abu layang yang digunakan dalam pembuatan geopolimer

Nama Sampel	Kekristalan relatif (%)
Petrokimia Gresik	100,0
Australia	71,4
PLTU Pacitan	70,0
Semen Gresik	38,9

Morfologi ke empat abu layang yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada foto SEM (Gambar 5). Abu layang Australia, dibandingkan dengan abu layang lainnya, memiliki ukuran partikel yang sangat beragam dan partikel terbesarnya relatif paling besar. Dari segi bentuk, semua abu layang memiliki bentuk partikel bundar dengan permukaan yang mulus. Seperti yang kita tahu, bahwa abu layang adalah padatan/serbuk partikel yang berbentuk bulat (*spherical*). Abu layang memiliki ukuran yang berbeda-beda dan heterogen karena saat melalui daerah

pembakaran (*burning zone*) pada pembangkit listrik setiap partikel batubara mengalami perubahan sifat kimia dan sifat fisika yang berbeda.



Gambar 5. Foto SEM abu layang: (A) PLTU Pacitan, (B) Petrokimia Gresik, (C) Semen Gresik dan (D) Australia

Dapat dilihat pada Gambar 5 yang mana merupakan hasil analisis SEM. Abu layang dari PLTU Pacitan dan Semen Gresik didominasi oleh partikel yang berukuran $\leq 5 \mu\text{m}$. Sedangkan untuk abu layang dari Petrokimia gresik dan Australia didominasi oleh partikel yang berukuran $\leq 6 \mu\text{m}$ untuk Petrokimia Gresik dan $\leq 10 \mu\text{m}$ untuk Australia. Hal tersebut menandakan bahwa abu layang Australia memiliki ukuran partikel terbesar di antara ke empat abu layang yang diteliti. Ukuran partikel yang besar ini kemungkinan besar

menjadi penyebab kurang reaktifnya abu layang Australia sehingga geopolimer yang dihasilkannya memiliki kuat tekan terendah pada usia 7 hari.

3.5 Komposisi Unsur Penyusun Abu Layang

Pada umumnya abu layang mengandung unsur-unsur Si, Al, Fe sebagai penyusun utama dan unsur-unsur Mg, Ca, S dan lainnya sebagai komponen pendukung dengan jumlah yang bervariasi. Biasanya unsur-unsur tersebut dilaporkan dalam bentuk oksida. Informasi komposisi unsur abu layang ini sangat penting karena dasar pembuatan geopolimer adalah dari kandungan komposisi unsurnya sehingga perlu dilakukan analisis XRF.

Hasil analisis XRF untuk ke empat abu layang ditampilkan pada Tabel 5. Berdasarkan ASTM C 618, abu layang diklasifikasikan menjadi tiga tipe, yaitu tipe C, F dan N. Kriteria masing-masing klasifikasi dapat dilihat pada Tabel 6. Selain oksida-oksida di atas, ASTM C 618 juga mempertimbangkan kandungan CaO dalam abu layang yang digolongkan pada kelas F jika kandungan CaO kurang dari 10% dan digolongkan sebagai klas C jika lebih dari 10%. Berdasarkan penggolongan tersebut maka ke empat abu

layang digolongkan sebagai tipe F, C atau N seperti ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 5. Hasil analisa komposisi abu layang menggunakan XRF.

No	Senyawa	Kandungan (%)			
		PLTU Pacitan	Semen Gresik	Petrokimia Gresik	Australia
1	MgO	0	1,60	0	0
2	Al ₂ O ₃	19,50	6,20	19,80	22,90
3	SiO ₂	49,40	17,30	36,10	68,30
4	P ₂ O ₅	1,00	0	1,10	0,82
5	SO ₃	1,70	0,40	0,40	0
6	K ₂ O	1,03	1,07	1,27	0,36
7	CaO	8,75	30,90	9,18	0,40
8	TiO ₂	1,56	0,97	1,88	4,43
9	V ₂ O ₅	0,05	0,05	0,066	0,19
10	Cr ₂ O ₃	0,02	0	0,03	0,041
11	MnO	0,25	0,36	0,2	0
12	Fe ₂ O ₃	16,50	34,4	24,1	1,34
13	ZnO	0,07	0,09	0,07	0,15
14	MoO ₃	0	4,1	5,10	0
15	BaO	0,20	0,55	0,3	0

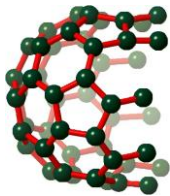
Tabel 6. Pengelompokan kelas abu layang berdasarkan ASTM C 618 2005

Persyaratan	Komposisi (%)		
	Kelas N	Kelas F	Kelas C
(SiO ₂) + (Al ₂ O ₃) + (Fe ₂ O ₃), min	70	70	50
Belerang trioksida (SO ₃), maks	4	5	5
kelembaban, maks	3	3	3
Susut bakar, maks	10	6	6

Sumber: Wardani [11]

Tabel 7. Klasifikasi tipe abu layang yang digunakan dalam pembuatan geopolimer berdasarkan data XRF

Keterangan	PLTU Pacitan	Semen Gresik	Petrokimia Gresik	Australia
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	85,4	57,9	80,0	92,5
klasifikasi	Tipe F	Tipe C	Tipe F	Tipe F



Menurut Zerfu dan Ekaputri [12], geopolimer terbaik hanya dapat dihasilkan dari abu layang tipe F. Dalam penelitian ini, abu layang yang diklasifikasikan dalam tipe F adalah abu layang dari PLTU Pacitan, Petrokimia Gresik dan Australia dengan kuat tekan secara berurutan sebesar 46,71; 42,46; dan 9,55 MPa. Geopolimer dari abu layang Australia memiliki kuat tekan terendah di antara geopolimer dengan abu layang dari PLTU Pacitan dan Petrokimia Gresik meskipun abu layang Australia adalah tipe F. Oleh karena itu, hasil analisis komposisi penyusun abu layang ini menguatkan kesimpulan pada bagian morfologi abu layang bahwa penentu kekuatan geopolimer adalah morfologi dan ukuran partikel abu layang yang digunakan. Akibat dari ukuran partikel yang besar maka laju reaksi pelarutan ion-ion SiO_4^{4-} dan AlO_4^{5-} dari partikel-partikel abu layang menjadi lebih lambat sehingga laju setting geopolimer dari abu layang Australia menjadi sangat lambat. Selain itu, lambatnya reaksi ini juga menghasilkan proses/reaksi geopolimerisasi juga berlangsung dengan lambat sehingga kekuatan geopolimer yang dihasilkan pada usia 7 hari masih sangat rendah.

Lambatnya waktu setting geopolimer dari abu layang Australia juga disebabkan oleh kandungan kalsium yang rendah. Abu layang Australia hanya mengandung CaO sebesar 0,4 % sedangkan yang lainnya lebih dari 8%. Abu layang dari Semen Gresik bahkan mengandung CaO hingga 31%.

Komposisi unsur-unsur penyusun abu layang lainnya tampak tidak terlalu berpengaruh terhadap kuat tekan geopolimer yang dihasilkan. Kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 yang tinggi pada abu layang Australia ternyata menghasilkan geopolimer yang lebih lemah daripada yang dibuat dengan abu layang Semen Gresik dengan kandungan SiO_2 paling rendah. Di lain pihak, semua abu layang yang menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan tinggi mengandung Fe_2O_3 yang tinggi pula. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk dapat membuktikan peran kandungan Fe_2O_3 ini terhadap kuat tekan geopolimer yang dihasilkan dari abu layang.

Kesimpulan

Geopolimer yang dibuat dari abu layang dari PLTU Pacitan, Semen Gresik, Petrokimia Gresik, dan Australia memiliki

kuat tekan secara berurut-urut sebesar 46,71; 42,46; 42,46; 9,55 MPa. Ukuran partikel abu layang tampaknya merupakan faktor penentu utama terhadap kuat tekan geopolimer sehingga geopolimer dari abu layang Australia yang ukuran partikel rata-ratanya adalah yang terbesar, memiliki kuat tekan terlemah. Kandungan kalsium terlihat mempengaruhi *setting time*. Abu layang dengan kandungan kalsium rendah membutuhkan *setting time* yang lebih panjang daripada abu layang lainnya. Kandungan besi (Fe_2O_3) tampaknya juga memiliki pengaruh yang penting di mana semua abu layang dengan kandungan Fe_2O_3 yang tinggi menghasilkan geopolimer dengan kuat tekan tinggi.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dapat dilaksanakan atas dukungan dana penelitian dari Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi melalui skema PDUPT tahun 2018. Penulis juga mengucapkan teruma kasi kepada para penyedia abu layang yaitu PLTU Pacitan, PT. Semen Gresik, PT. Petrokimia Gresik dan Centre for Fuels and Energy, Curtin University of Technology, Western Australia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Harijono, D (2006). Fly Ash dan Pemanfaatannya, Prosiding Seminar Nasional Batubara Indonesia, Yogyakarta:UGM
- [2] [Bakrie, A.M. Mustafa Al, Kamarudin, H., Bnhussain, M., Nizar, I. K., Rafiza, A.R. and Zarina, Y. (2012) The Processing, Characterization, and Properties of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. Sci., Vol. 30. lal. 90-97.
- [3] Fansuri, H., Swastika, N. dan Atmaja, L. (2008) Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton, Akta Kimindo, Vol. 3 No. 2, hal. 61-66
- [4] Purwantoro, A., Suyanto, W., Antoni., Hardjito, Dj. (2016) Pengaruh Penambahan Boraks dan Kalsium Oksida Terhadap Setting Time dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Tipe C. Universitas Kristen Petra.
- [5] Satria, J., Sugiarto, A., Antoni., Hardjito, Dj. (2016) Karakteristik Beton Geopolimer Berdasarkan Variasi Waktu Pengambilan Fly Ash, Universitas Kristen Petra.
- [6] Ferdy (2010) Pengaruh Temperatur dan Waktu Curing Terhadap Kuat Tekan Pasta Geopolimer Berbahan Dasar Abu

Terbang, Skripsi, Teknik Material dan Metalurgi. Universitas Indonesia.

[7] Ekaputri, J. J., Triwulan. dan Damayanti, O. (2007) Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Jawa Power Paiton Sebagai Material Alternatif, Jurnal PONDASI, Vol. 13 No.2, hal 124-134.

[8] Badan Standardisasi Nasional (2011) SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

[9] Xu, H. and van Deventer, J. S. J. (2002) Microstructural characterization of geopolymers synthesized from kaolinite/stabile mixture using XRD, MASNMR, SEM/EDX, TEM/EDX and HREM, Cement and Concrete research, Vol. 32, hal. 1705-1716.

[10] Atmaja, L., Fansuri, H. and Maharani, A. (2011) Crystalline Phase Reactivity In The Synthesis Of Fly Ash-Based Geopolymer, Indonesian Journal of Chemistry, Vol. 11 No. 1, hal. 90-95.

[11] Wardani (2008). Pemanfaatan Limbah Batubara (Fly Ash) Untuk Stabilisasi Tanah Maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya Dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

[12] Zerfu, K. and Ekaputri, J.J. (2016) Review on Alkali-activated Fly Ash Based Geopolymer Concrete, Materials Science Forum, Vol. 841 Agustina, F. T. 2007. *Ekstraksi Fe (II)-1,10-Fenantrolin Menggunakan Metode Cloud Point Dengan Surfaktan Tween 80*. Surakarta: Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret.