

PEMANFAATAN ABU TERBANG (*FLY-ASH*) DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN UTAMA GEOPOLIMER ALTERNATIF PENGGANTI SEMEN TRADISIONAL (OPC)

Fadhil Muhammad Fajri^{1,2} dan R. Jachrizal Sumabrata^{1,2}

¹Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat

²Center for Sustainable Infrastructure - Faculty Engineering, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat
E-mail: fadhilmfajri@gmail.com

Abstrak. Keadaan dunia hingga saat ini menunjukkan pertanda terhadap manusia bahwa bumi perlahan-lahan memburuk. Salah satu pertanda tersebut yaitu perubahan iklim global, yang penyebabnya masih tidak banyak masyarakat yang menganggap serius masalah ini. Salah satu penyebab utama perubahan iklim dan pemanasan global yaitu emisi gas rumah kaca yang tidak hentinya diproduksi. 76% emisi rumah kaca berasal dari emisi *carbon dioxide* (CO₂)^[2]. Dengan dasar kontrobusi emisi CO₂ dari produksi semen sebesar 5-7%^[4] yang berarti kontribusinya cukup besar, salah satu teknologi yang ikut berperan dalam menurunkan tingkat emisi CO₂ adalah Geopolimer. Geopolimer merupakan teknologi alternatif yang telah menjadi perhatian khusus di kalangan peneliti dan industri karena sifat ramah lingkungannya yang menghasilkan tingkat emisi CO₂ rendah dalam proses pembuatannya. Pemanfaatan geopolimer sebagai prekursor alternatif semen tradisional (OPC) ini bisa dianggap memenuhi kriteria untuk digunakan pada kegiatan konstruksi umum berdasarkan karakterisasi melalui Tes Kuat Tekan, Kuat Lentur, XRD, XRF, SEM, dan AAS.

Kata Kunci: *fly ash*, geopolimer, prekursor alternatif beton, reduksi emisi CO₂, *silica fume*

I. PENDAHULUAN

Keadaan dunia hingga saat ini menunjukkan pertanda terhadap manusia bahwa bumi perlahan-lahan memburuk. Salah satu pertanda tersebut yaitu perubahan iklim global, yang kenyataannya masih tidak banyak masyarakat yang menganggap serius masalah ini. Memang jika masyarakat memandang dampak yang ditimbulkan sehari-harinya seperti tidak ada yang berubah, namun jika masyarakat terus mengabaikan masalah perubahan iklim global, dalam jangka panjang, dampak yang akan timbul tidak bisa diremehkan sama sekali. Variabilitas cuaca, peningkatan aktivitas vulkanik, pencairan gunung es abadi, peningkatan turbulensi udara pada troposfer, gurun pasir makin gersang, sedimentasi, wabah penyakit, ketidakstabilan emosi manusia, semua hal tersebut merupakan dampak perubahan iklim global jika manusia terus meremehkannya. Karena itu, sekecil apapun, sulit apapun hal yang dapat meminimalisasi perubahan iklim global, manusia sebagai penduduk bumi harus memulai pergerakan tersebut.

Salah satu penyebab utama perubahan iklim dan pemanasan global yaitu emisi gas rumah kaca yang tidak hentinya diproduksi. 76% emisi rumah kaca

berasal dari emisi *carbon dioxide* (CO₂) (Princiotta, 2011). Semakin tingginya konsentrasi emisi CO₂ di atmosfer membuat negara-negara di dunia setuju berkomitmen untuk mengurangi emisi CO₂ dengan ikut meratifikasi persetujuan dalam sebuah protokol yang dikenal dengan nama Protokol Kyoto (Gleeson dan Loq, 2011). Dengan protokol ini, teknologi-teknologi baru lebih mendukung penurunan tingkat emisi CO₂ agar lebih ramah lingkungan. Dengan dasar kontrobusi emisi CO₂ dari produksi semen sebesar 5-7% (J.Duchesne, et al, 2010), yang berarti kontribusinya cukup besar, salah satu teknologi yang ikut berperan dalam menurunkan tingkat emisi CO₂ adalah Geopolimer. Geopolimer merupakan teknologi alternatif yang telah menjadi perhatian khusus di kalangan peneliti dan industri karena sifat ramah lingkungannya yang menghasilkan tingkat emisi CO₂ rendah dalam proses pembuatannya.

Geopolimer merupakan polimer anorganik berbasah dasar aluminosilikat (SiO₂ dan Al₂O₃) yang diaktifasi oleh larutan basa kuat (Zaharaki, et al, 2010). Teknologi ini pertama kali dikembangkan oleh Josep Davidovits pada tahun 1970-an (Xu, et al, 2002), sedangkan pemakaian terminologi dari geopolimer diperkenalkan pada tahun 1978 (Davidovits, 1994).

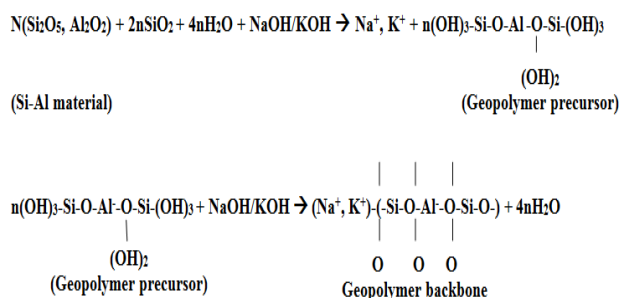
Dalam sintesis geopolimer material yang dapat digunakan sebagai bahan dasar (prekursor) adalah material yang mengandung unsur utama silikat (Si) dan alumina (Al), material tersebut berasal dari mineral aluminosilikat, seperti kaolin atau pozolan dan limbah industri yakni *fly ash* (abu terbang) (Adriansyah, 2012), Kedua jenis prekursor inilah yang sering digunakan dalam memahami karakteristik pengembangan geopolimer saat ini (Provis dan Deventer, 2007). Walau begitu, penggunaan abu terbang sebagai prekursor geopolimer memberikan perhatian khusus karena harganya yang murah dan memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan metakaolin dan dapat membantu mengatasi masalah pencemaran lingkungan akibat penumpukan limbah abu terbang (Adriansyah, 2012).

Salah satu sifat mekanik yang digunakan untuk menilai kualitas geopolimer adalah kuat tekan. Geopolimer berpotensi menghasilkan peningkatan kekuatan tekan dengan cara mengganti sebagian kecil prekursor yang digunakan, yakni abu terbang dengan prekursor lain, yaitu *silica fume* (Thokchom, et al, 2011). Proses sintesis geopolimer tersebut dapat menggunakan metoda terpisah karena menghasilkan tingkat kekuatan yang lebih baik (Rattanasak, and Chindaprasirt, 2009). Keuntungan lain dari penggunaan metoda ini adalah mampu mengontrol kinerja dari geopolimer (Adriansyah, 2012).

II. PEMBAHASAN

A. Geopolimer

Geopolimer merupakan polimer anorganik yang disintesis menggunakan campuran materi aluminosilikat (SiO_2 dan Al_2O_3) dan larutan basa kuat (Zaharaki, et al, 2010). Proses geopolimerisasi yang terjadi pada geopolimer terdiri dari disolusi dan polikondensasi (Provis dan Deventer, 2007), di mana prekursor geopolimer yang mengalami proses disolusi pada permukaan partikel abu terbang akan menghasilkan ion Si^{4+} dan Al^{3+} , ion-ion ini mengalami proses hidrolisis membentuk *species* $\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ yang kemudian terkondensasi menjadi polimer aluminosilikat dengan struktur jaringan (*cross-link*) 3 dimensi yang terdiri dari ikatan Si-O-Al dan Si-O-Si dengan mengeliminasi molekul air seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Proses geopolimerisasi (Rickard et al., 2011)

Dalam sintesis geopolimer, rasio Si/Al merupakan salah satu parameter penting dalam terbentuknya struktur akhir pada geopolimer. Semakin besar perbandingan rasio Si/Al, maka sifat mekanik yang dihasilkan akan semakin besar juga. Davidovits membagi struktur geopolimer menjadi 3 jenis berdasarkan rasio Si/Al, yaitu: (1) Si/Al = 1 membentuk *polysialate* (-Si-O-Al-O-); (2) Si/Al = 2 membentuk *polysialate-siloxo* (-Si-O-Al-O-Si-O-); (3) Si/Al = 3 membentuk *polysialate-disiloxo* (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-) (Alvarez-Ayuso, et al, 2008). Weng et. al mengatakan bahwa proses sintesis geopolimer menggunakan dua jenis aktivator, yaitu larutan alkali hidroksida (NaOH) dan larutan alkali silikat (Na_2SiO_3) akan menghasilkan struktur geopolimer berupa *polysialate-siloxo* dan *polysialate-disiloxo* (Weng, 2007). Berdasarkan perbandingan rasio Si/Al tersebut, Davidovits juga mengelompokkan aplikasi dari geopolimer yang terbentuk seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Si/Al dan aplikasi (Davidovits, 1994)

Perbandingan Si/Al	Aplikasi
1	- Batu bata - Keramik - Pelindung api
2	- Semen dan beton dengan kadar CO_2 rendah
3	- Komposit serat gelas tahan api - Peralatan pengecoran logam - Komposit tahan panas, 200°C hingga 1000°C - Alat untuk proses aeronautika hitanium
>3	- Penutup/segel untuk industri, 200°C hingga 1000°C - Alat untuk aeronautika SPF aluminium
20-35	- Komposit serat tahan panas dan tahan api

Proses sintesis geopolimer menggunakan 2 jenis bahan baku (prekursor), yaitu sumber material dan larutan alkali. Pada sumber material harus memiliki kandungan utama silika (SiO_2) dan aluminium (Al_2O_3) yang dapat berasal dari mineral alam, seperti kaolin maupun limbah buangan dari industriterbang, *silica fume*, ampas biji besi (*blast furnace slag*) dan lain-lain. Sedangkan, larutan alkali yang digunakan dalam mengaktivasi prekursor geopolimer berupa *sodium hydroxide* (NaOH), *potassium hydroxide* (KOH), *sodium silicate* (Na_2SiO_3) dan *potassium silicate* (K_2SiO_3) (Adriansyah, 2012).

Walaupun begitu, dalam perkembangan geopolimer saat ini, penggunaan prekursor geopolimer lebih banyak menggunakan material limbah, seperti abu terbang (Xu dan Deventer, 2002), karena membantu mengurangi pencemaran abu terbang dan terhitung murah dengan sifat mekanik yang dihasilkan tinggi (Kong, 2007). Pemanfaatan limbah sebagai material prekursor dalam suatu teknologi telah banyak dilakukan oleh peneliti saat ini. Hal ini tidak saja

menguntungkan secara ekonomi dalam proses pembuatannya, tetapi juga membawa dampak terhadap lingkungan. Sebagai teknologi ramah lingkungan yang diaplikasikan untuk material konstruksi, khususnya beton, maka dalam penelitian ini juga menggunakan prekursor yang berasal dari limbah buangan industri, yakni abu terbang dan *silica fume*. Geopolimer berbahan abu terbang telah banyak digunakan dalam pengembangan geopolimer saat ini. Keuntungan dari pemakaian ini akan menghasilkan peningkatan ekonomi dalam teknologi geopolimer dan mengurangi pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh abu terbang (Adriansyah, 2012).

1. Abu terbang

Abu terbang merupakan produk limbah dari pembakaran batubara yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan industri dengan ukuran partikel antara 0.5 sampai 100 μm , dengan bentuk partikel *solid spheres*, *pleospheres*, *clathrospheres*, dan *cenospheres (hollow spheres)* (Wang, 2008). Saat ini, jumlah limbah abu terbang terus mengalami peningkatan karena pemakaian batubara sebagai sumber energi untuk bahan bakar memiliki harga yang lebih murah dibandingkan dengan minyak bumi dan gas, yakni berkisar \$1 - \$2 *permillion btu* untuk harga batu bara dan \$4 - \$12 *permillion btu* untuk harga minyak dan gas (Katzer, 2011). Panias *et. al* menyatakan bahwa jumlah abu terbang yang dihasilkan pada tahun 2010 diperkirakan mencapai 800 juta ton (D, and P, 2006). Walaupun begitu, semakin besar limbah abu terbang, hanya sekitar 20-30% yang digunakan sebagai *filler* (pengisi) pada pembuatan beton dan sisanya ditimbun ke dalam tanah yang dapat merusak ekosistem di sekitarnya (Xu dan Deventer, 2002).

Abu terbang memiliki komposisi yang heterogen dengan unsur utama SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , dan sebagian kecil unsur penyusun lain. Berdasarkan ASTM C618, abu terbang dapat dibagi ke dalam 2 jenis, yaitu abu terbang jenis F dan abu terbang jenis C. Kedua jenis tersebut yang membedakan adalah besarnya kandungan CaO .

Tabel 2. Komposisi abu terbang jenis F dan C (Siddiqui, and Khan, 2011)

Parameter	Class F fly ash	Class C fly ash
Silicon dioxide (%)	45-64.4	23.1-50.5
Calcium oxide (%)	0.7-7.5	11.6-29.0
Aluminum oxide (%)	19.6-30.1	13.3-21.3
Iron oxide (%)	3.8-23.9	3.7-22.5
Sodium oxide (%)	0.3-2.8	0.5-7.3
Magnesium oxide (%)	0.7-1.7	1.5-7.5
Potassium oxide (%)	0.7-2.9	0.4-1.9
Loss on ignition (%)	0.4-7.2	0.3-1.9

Abu terbang jenis F merupakan abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran batu bara *anthracute* atau *bituminous* dengan kandungan CaO yang rendah, yaitu di bawah 10%. Biasanya, abu terbang memiliki mineral dengan gasa kristalin berupa *mullite*, *quartz*, *hematite*, dan *magnetite*. Sedangkan, abu terbang jenis C

dihasilkan dari proses pembakaran batu bara *lignite* atau *sub-bituminous* dengan kandungan CaO di atas 10%. Abu terbang jenis C memiliki fasa kristalin dengan mineral berupa *quartz*, *lime*, *mullite*, *gehlenite*, *anhydrite* (Siddiqui dan Khan, 2011). Perbedaan kedua jenis abu terbang ini dapat dilihat pada Tabel 2.

2. Silica fume

Silica fume merupakan material limbah industri yang dihasilkan dari proses peleburan *silica* dan *ferrosilicon* yang juga dikenal dengan nama *microsilica* (Siddique, 2011). *Silica fume* memiliki ukuran partikel yang sangat halus dengan ukuran partikel rata-rata ≈ 100 nm, ukuran tersebut 100 kali lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran partikel dari semen^[21]. Kandungan utama *silica fume* adalah SiO_2 dalam bentuk *amorphous* sebesar 95% (Siddique, 2011), dan sebagian unsur lain dalam jumlah kecil, seperti Fe, Al, Ca, Mg, K, Na, dan S.

Silica fume memiliki warna putih dan abu-abu dan memiliki 3 jenis produk, yaitu *undensified silica fume (as produced)*, *slurry*, dan *densified silica fume*. Namun, yang paling banyak digunakan dalam *undensified silica fume* dan *densified silica fume*. Kedua jenis tersebut yang membedakan adalah *bulk density* (kepadatan di mana *densified silica fume* merupakan modifikasi dari *undensified* dengan meningkatkan kepadatan sehingga *densified silica fume* memiliki kepadatan yang lebih tinggi dibandingkan *undensified silica fume* (Adriansyah, 2012). Penambahan *silica fume* dalam pembuatan beton memiliki 3 fungsi, yaitu (1) menghaluskan ukuran pori dan meningkatkan kepadatan pada matriknya; (2) bereaksi dengan *lime* (CaO) bebas; (3) menghaluskan ikatan antarmuka pasta semen dan agregat, sehingga dari penambahan *silica fume* ini tentunya akan meningkatkan kekuatan pada beton (Siddique, 2011). Namun, pemakaian *silica fume* dalam geopolimer telah dilaporkan Thokchom *et. al* di mana penambahan *silica fume* menurunkan kekuatan pada pasta geopolimer (Thokchom, et al, 2011).

B. Larutan Alkali

Larutan alkali dalam sintesis geopolimer mempunyai peran yang sangat penting dalam proses geopolimerisasi. Larutan alkali yang digunakan terdiri dari campuran larutan NaOH dan natrium silikat (Na_2SiO_3) (Adriansyah, 2012). Weng *et. al* mengatakan bahwa hidroksida (NaOH) dan larutan alkali silikat (Na_2SiO_3) akan menghasilkan struktur geopolimer berupa *polysialate-siloxo* dan *polysialate-disiloxo* (Kong, et al, 2007).

1. Natrium hidroksida (NaOH)

Logam alkali yang digunakan pada sintesis geopolimer adalah natrium hidroksida (NaOH) dan kalium hidroksida (KOH). NaOH memiliki massa molekul relatif 40 gram/mol dengan bentuk *pellet* atau *flake* dapat mencapai kemurnian 97-98% dan mengalami reaksi *exothermic* (panas) ketika dilarutkan

dalam air atau asam (Adriansyah, 2012). Namun, pemakaian natrium hidroksida dalam proses sintesis geopolimer lebih banyak disukai karena menghasilkan ion Si^{4+} dan Al^{3+} lebih tinggi dibandingkan dengan kalium hidroksida^[11]. Sedangkan, Panagiotopouou *et. al* menyatakan bahwa penggunaan NaOH dalam proses sintesis geopolimer akan menghasilkan ion Si^{4+} dan Al^{3+} yang tinggi dibandingkan dengan KOH pada material prekursor yang lebih reaktif (Panagiotopoulou, *et al*, 2007).

Konsentrasi larutan NaOH merupakan faktor yang sangat berpengaruh dalam sintesis geopolimer. Semakin tingginya konsentrasi larutan NaOH pada proses sintesis geopolimer akan menghasilkan tingkat kekuatan tekan yang semakin tinggi pula. Hal ini disebabkan oleh tingkat geopolimerisasi berupa disolusi terhadap permukaan partikel abu terbang yang terbentuk dari ikatan kovalen Si-O-Si dan Al-O-Al (Pacheco-Torgal, *et al*, 2008), semakin tinggi sehingga menghasilkan monomer silika dan alumina dalam jumlah tinggi yang dibutuhkan dalam pembentukan struktur geopolimer.

Pengaruh konsentrasi larutan NaOH dalam geopolimer ini telah banyak dilaporkan oleh para peneliti. Goni *et. al* menyatakan bahwa semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH untuk mendisolusi permukaan abu terbang, maka semakin tinggi pula jumlah kelarutan Si dan Al yang dihasilkan (Gonu, *et al*, 2003). Sedangkan, Somna *et. al* menggunakan konsentrasi larutan NaOH antara 9.5 M hingga 16.5 M di mana konsentrasi larutan NaOH pada 9.5M-14.0M memberikan kekuatan tekan pada geopolimer antara 20-23 MPa dengan proses pengerasan di temperatur kamar. Namun, semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH, akan menurunkan kekuatan tekan pada geopolimer (Somna, *et al*, 2011).

2. Natrium silikat (Na_2SiO_3)

Natrium silikat digunakan pada proses sintesis untuk mempercepat terjadinya reaksi geopolimerisasi dan sekaligus meningkatkan sifat mekanik pada geopolimer. Natrium silikat, ketika bereaksi dengan air, membentuk *orthosilicic acid* ($\text{Si}(\text{OH})_4$) dan natrium hidroksida (NaOH). Sehingga, dapat diketahui bahwa penambahan natrium silikat akan memberikan suplai *soluble silica* dan ion OH^- , yang berguna dalam proses geopolimerisasi (Adriansyah, 2012). Xu dan Deventer (2002), menyatakan bahwa penggunaan *waterglass* (Na_2SiO_3) meningkatkan disolusi pada permukaan partikel abu terbang.

C. Metode Sintesis Geopolimer

Dalam berbagai publikasi tentang geopolimer, sangat sulit ditemukan penjelasan metoda sintesis yang digunakan, diperkirakan metoda sintesis yang digunakan pada umumnya adalah metoda secara langsung (N) (Adriansyah, 2012). Chindaprasirt *et. al* mengangkat masalah ini sebagai salah satu parameter

dalam penelitiannya dengan membandingkan tingkat kekuatan tekan yang dihasilkan antara metoda sintesis secara terpisah (S) dengan metoda sintesis secara langsung (N) (Somna, *et al*, 2011).

Proses metoda sintesis secara langsung digunakan dengan cara mencampurkan seluruh prekursor larutan alkali, yaitu NaOH, Na_2SiO_3 (*waterglass*) dan air (*distilled water; aquades*) dalam satu wadah, kemudian didiamkan selama 24 jam untuk menghilangkan reaksi *exothermic* (panas). Setelah satu hari, larutan alkali yang terbentuk dicampur dengan abu terbang, kemudian diaduk sampai homogen. Pasta geopolimer yang terbentuk dituang ke dalam cetakan. Sedangkan pada metoda sintesis terpisah, proses pencampuran dalam larutan alkali dengan mencampurkan NaOH ke dalam air terlebih dahulu, larutan NaOH yang terbentuk ini didinginkan selama 24 jam untuk menghilangkan reaksi eksotermis. Setelah satu hari, larutan NaOH dicampurkan ke dalam abu terbang, diaduk hingga homogen. Campuran homogen yang didapat lalu ditambahkan dengan Na_2SiO_3 dan diaduk lagi. Pasta geopolimer yang terbentuk dituangkan dalam cetakan (Adriansyah, 2012).

Dari kedua hasil metoda sintesis geopolimer tersebut, dihasilkan kekuatan tekan yang tertinggi berasal dari metoda sintesis secara terpisah. Hal ini disebabkan karena disolusi permukaan partikel abu terbang yang diawalki dengan larutan NaOH pada metoda sintesis terpisah menghasilkan Si dan Al terlarut yang tinggi (Rattanasak dan Chindaprasirt, 2009). Diagram alir penelitian tesis yang dibahas pada *review paper* ini ditunjukkan pada Gambar 2.

D. Karakterisasi Geopolimer

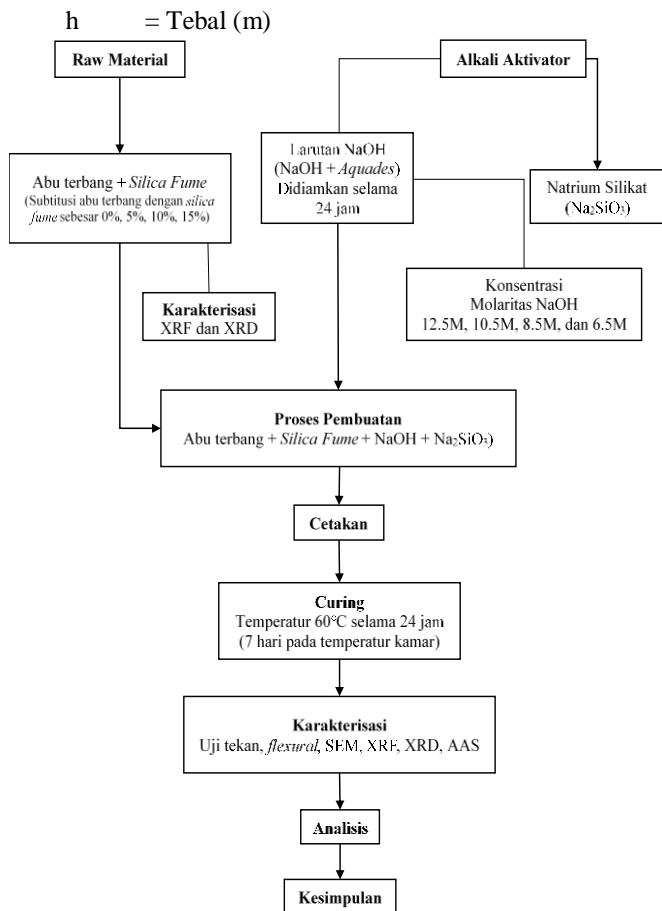
Teknik karakterisasi digunakan untuk mengetahui karakteristik dari suatu material. Teknik karakterisasi yang dibahas pada *review paper* ini berdasarkan Tesis "Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Penambahan Silica Fume Terhadap Karbonasi dan Kekuatan Pasta Geopolimer" (Adriansyah, 2012).

1. Kuat tekan, adalah besarnya beban yang dapat ditahan oleh geopolimer per satu satuan luas. Beban maksimum (kg) yang didapatkan dalam pengujian ini dikalkulasikan dengan luas permukaan sampel (cm^2) sehingga didapatkan kuat tekan (kg/cm^2). Pengukuran kuat tekan pasta geopolimer berbahan abu terbang dilakukan sesuai dengan standar ASTM C39.
2. Kekuatan lentur, pengukuran kuat lentur pasta geopolimer dilakukan sesuai dengan standar ASTM D790. Nilai normal *bending stress* dapat dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

dimana:

- P = Besar tekanan/pembebanan (N)
L = Panjang span (mm)
b = Lebar (mm)



Gambar 2. Diagram alir penelitian (Adriansyah, 2012)

menggunakan teknik analisis ini, dapat dilihat unsur yang terlarut pada geopolimer, yaitu Na^+ dan Ca^{2+} .

E. Hasil Penelitian

Bahan yang digunakan sebagai prekursor alterternatif beton antara lain abu terbang yang berasal dari Suralaya, *silica fume* dari jenis *undesified*, Natrium hidroksida dari merck (NaOH 99%), natrium silikat dari merck (Na_2SiO_3) dengan kandungan 8.5 Na_2O , 28.5 SiO_2 , 63 H_2O dan air (*disrilled water*). Berikut data yang didapat berdasarkan metode penelitian yang dilakukan (Adriansyah, 2012).

1. Telah dilakukan sintesis geopolimer berbahan abu terbang dengan variasi *silica fume* 0%, 5%, 10% dan 15% pada konsentrasi larutan NaOH 6.5M, 8.6M, 10.5M, dan 12.5M menggunakan proses metoda terpisah serta proses *curing* pasta geopolimer pada temperatur 60°C selama 24 jam dan 7 hari pada temperatur ruang.
2. Hasil Uji XRF dan XRD terhadap analisis prekursor awal abu terbang dan *silica fume* menunjukkan bahwa komposisi kimia abu terbang PLTU Suralaya termasuk abu terbang jenis C dengan kandungan CaO 19.26% ($\text{CaO} > 10\%$) sedangkan hasil uji XRD menunjukkan abu terbang memiliki fasa amorf pada $2\theta = 15-38^\circ$ dengan fasa kristalin terdiri dari mineral *quartz*, *mullite*, *magnetite*, dan *lime free*, untuk *silica fume* memiliki fasa amorf pada $2\theta = 15-40^\circ$ dengan fasa kristalin mineral dari *quartz* dan *magnetite*.
3. Pengujian sifat mekanik berupa kekuatan tekan dan kekuatan lentur terhadap pasta geopolimer menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi larutan NaOH maka semakin besar kekuatan tekan yang dihasilkan yaitu 60,4 MPa pada konsentrasi 12.5M. akan tetapi kekuatan tekan menurun ketika ditambahkan *silica fume* 5%, 10% dan 15%, hal yang sama juga terjadi dengan kekuatan lentur pasta geopolimer. Penurunan ini disebabkan oleh banyaknya rongga (*void*) yang terdapat pada pasta geopolimer akibat terperangkapnya udara.
4. Pengujian morfologi dilakukan pada pecahan pasta geopolimer yang telah mengalami uji tekan pada sampel uji berdasarkan konsentrasi larutan NaOH tanpa *silica fume* dan variasi *silica fume* pada konsentrasi larutan NaOH 10.5M, menunjukkan bahwa struktur permukaan dengan variasi *silica fume* memiliki *void* yang lebih banyak dibandingkan dengan tanpa *silica fume*. Sedangkan untuk terbentuknya struktur kristal karbonat belum begitu tampak pada pasta geopolimer yang berumur 7 hari.
5. Pengujian AAS untuk melihat kelarutan sisa Na^+ dan Ca^{2+} pasta geopolimer dalam *aquades* menunjukkan tingkat kelarutan untuk Ca^{2+} semakin sedikit dengan meningkatnya konsentrasi larutan NaOH , sebaliknya, untuk Na^+ , tingkat kelarutan tidak begitu mencolok setiap konsentrasi tetapi disimpulkan bahwa kelarutan Na^+ lebih besar

3. *X-Ray Diffraction* (XRD), ditujukan untuk mengetahui struktur kristal dan derajat kristalisasi abu terbang, *silica fume*, dan senyawa dari pasta geopolimer yang telah terbentuk.
4. *X-Ray Fluorescence* (XRF), digunakan secara luas untuk menentukan komposisi unsur dari suatu material secara kualitatif dan kuantitatif. Analisis XRF hanya efektif untuk unsur dengan berat molekul tinggi tetapi kurang akurat untuk unsur yang lebih ringan dari kalsium. Kelemahan ini disebabkan oleh jumlah elektron yang terlalu sedikit yang menyebabkan pancaran energinya lebih rendah dan sulit dideteksi. Selain itu, analisis XRF tidak bisa mendeteksi unsur yang jumlahnya sangat sedikit. Untuk analisis unsur yang berat molekulnya ringan dengan jumlah sedikit, biasanya menggunakan analisis lain, misalnya AAS.
5. *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *scanning* geopolimer dan dianalisis morfologinya. Alat ini menggunakan *magnetic lense*, sehingga mudah mengontrol perbesaran yang diinginkan. Berbeda dengan mikroskop optik yang menggunakan lensa yang perbesarannya terbatas. Dengan SEM juga dapat diperoleh informasi kimia dan spesimen dengan menggunakan EDX.
6. *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), teknik analisis untuk menetapkan konsentrasi suatu unsur (logam) dan semi logam yang terlarut. Dengan

- berdasarkan konsentrasi larutan NaOH, yaitu 12.5M.
- Pembuktian adanya karbonasi dilanjutkan dengan mengujian FTIR untuk mengetahui ikatan kimia, yaitu O-C-O, hasil yang didapat menunjukkan bahwa indikasi terjadinya karbonasi berdasarkan pita vibrasi ulur O-C-O yang terbentuk pada konsentrasi larutan NaOH, yaitu 6.5M, 8.6M, 10.5M, dan 12.5M tanpa %Sf belum begitu terlihat pada umur 7 hari. Namun, pada pasta geopolimer, konsentrasi larutan NaOH 10.5M pada variasi %Sf dari 5%, 10%, dan 15% sudah memiliki pita vibrasi ulur O-C-O yang kecil.
 - Pengujian XRD dilakukan pada sampel pasta geopolimer untuk mengetahui jenis senyawa karbonasi yang terbentuk. Hasil pengujian XRD pada pasta geopolimer dengan konsentrasi larutan NaOH 10.5M pada 0%Sf dan 10%Sf menunjukkan terbentuknya fasa mineral kristalin dari CaCO_3 (*Calcite*). Tapi, fasa kristalin untuk mineral NaCO_3 belum begitu terlihat.

III. KESIMPULAN

Dengan tujuan mengurangi emisi CO_2 di bumi, langkah yang terbaik adalah melalui industri, terutama dalam konstruksi, karena dalam produksi semen sebagai bahan utama dalam konstruksi, emisi CO_2 yang dihasilkan cukup signifikan dibanding dengan emisi dari industri lainnya, yaitu sebesar 5-7%. Karena itu bahan alternatif dari semen sangat diharapkan dapat digunakan secara luas. Geopolimer merupakan polimer anorganik yang dapat digunakan sebagai alternatif pengganti semen. Dengan sifat menghasilkan emisi CO_2 yang lebih sedikit, geopolimer yang memanfaatkan limbah industri sebagai prekursor, yaitu *fly ash* (abu terbang) dan *silica fume*, dan dengan bantuan larutan alkali natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3), dapat berkontribusi dalam memperlambat kerusakan permukaan bumi dan atmosfer. Selain itu, berdasarkan karakterisasi melalui tes kuat tekan, kuat lentur, XRD, XRF, SEM, dan AAS dapat diambil kesimpulan bahwa pasta geopolimer hasil penelitian cukup memenuhi kriteria untuk digunakan pada kegiatan konstruksi umum. Kuat tekan dan kuat lentur mencapai maksimum ketika konsentrasi larutan NaOH 12.5M, walaupun saat penambahan *silica fume* kuat tekan menurun karena pembentukan *void*.

IV. PENGHARGAAN

Penulis berterima kasih kepada Hary Olya Adriansyah atas data dan *draft* skripsi (2012). Penulis juga berterima kasih kepada Centre of Sustainable Infrastructure Development (CSID) FT Universitas Indonesia atas pendanaan untuk mengikuti *Symposium II UNIID 2017* dan Bapak R. Jachrizal Sumabrata yang telah membimbing Penulis dalam menyelesaikan *review paper* ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriansyah, H. O., 2012, *Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Penambahan Silica Fume Terhadap Karbonasi dan Kekuatan Pasta Geopolimer*, Tesis Magister Departemen Metalurgi dan Material; Fakultas Teknik; Universitas Indonesia, Depok: Universitas Indonesia.
- Alvarez-Ayuso, E.; Querol, X.; Plana, F.; Alastuey, A.; Moreno, N.; Izquierdo, M.; Font, O.; Moreno, T.; Diez, S.; Vazquez, E.; Barra, M., 2008, *Environmental, Physical and Structural Characterisation of Geopolymer Matrices Synthesised From Coal (CO) Combustion Fly Ashes*. *Journal of Hazardous Materials*, 154, 175-183.
- Boddy, A. M.; Hooton, R. D.; Thomas, M. D. A., 2003, *The Effect of the Silica Content of Silica Fume in Its Ability to Control Alkali-Silica Reaction*. *Cement & Concrete Research*, 33, 1263-1268.
- D., P.; P., G. I., 2006, *Development of Inorganic Polymeric Materials Based on Fired Coal Fly Ash*. *Acta Metallurgica Slovaca*, 12, 321-327.
- Davidovits, J., 1994, *Geopolymers: Man-Made Rocks Geosynthesis and the Resulting Development of Very Early High Strength Cement*. *J. Mater. Educ.*, 16, 91-139.
- Gleeson, B.; Loq, N., 2001, *Governing for the Environment*. Palgrave. p 271
- Gonu, S.; A., G.; P., L. M.; A., M., 2003, *Activation of the Fly Ash Pozzolanic Reaction by Hydrothermal Conditions*. *Chemistry Concrete Research*, 39, 1339-1405.
- J. Duchesne; Duong, L.; Bostrom, T.; Frost, R., 2010, *Microstructure Study of Early In Situ Reaction of Fly Ash Geopolymer Observed by Environmental Scanning Electron Microscopy (ESEM)*. *Waste Biomass Valor*, 1, 367-377
- Katzer, J. R., 2011, *Coal and Coal/Biomass-Based Power Generation*. In *Global Climate Change – The Technology Challenge*, Princiotta, F. T., Ed. Springer Springer+Business Media B.V. 2011: New York.
- Kong, D. L. Y.; Sanjayan, J. G.; Sagoe-Crengsil, K., 2007, *Comparative Performance of Geopolymers Made With Metakaolin and Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures*. *Cement & Concrete Research*, 37, 1583.
- Pacheco-Torgal, F.; Castro-Gomes, J.; Jalali, S., 2008, *Alkali-Activated Binders: A Review. Part 2. About Materials and Binders Manufacture*. *Construction and Building Materials*, 22, 1315-1322.
- Panagiotopoulou, C.; Kontori, E.; Perraki, T.; Kakali, G., 2007, *Dissolution of Aluminosilicate Minerals and By-Products in Alkaline Media*. *J Mater Sci*, 42, 2967-2973.
- Princiotta, F. T., 2011, *Global Climate Change – The Technology Challenge*. Springer. p 433
- Provis, J. L.; Deventer, J. S. J. V., 2007, *Geopolymerisation*

- Kinetics. 2. Reaction Kinetic Modelling. Chemical Engineering Science*, (62), 2318-2329.
- Rattanasak, U.; Chindaprasirt, P., 2009, *Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer. Minerals Engineering*, 22, 1073-1078.
- Rickard, W. D. A.; Williams, R.; Temuujin, J.; Riessen, A. V., 2011, *Assessing the Suitability of Three Australian Fly Ashes as an Aluminosilicate Source for Geopolymers in High Temperature Applications. Materials Science and Engineering A*, 528, 3390-3397.
- Siddique, R., 2011, *Review – Utilization of Silica Fume in Concrete: Review of Hardened Properties. Resource, Conservation and Recycling*, 24, 1086-1093.
- Siddique, R.; Khan, M. I., 2011, *Supplementary Cementing Materials*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011: New York.
- Somna, K.; Jaturapitakkul, C.; Kajitvichyanukul, P.; Chindaprasirt, P., 2011, *NaOH – Activated Ground Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. Fuel*, 90, 2118-2124.
- Thokchom, S.; Dutta, D.; Ghosh, S., 2011, *Effect of Incorporating Silica Fume in Fly Ash Geopolymers. World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60.
- Wang, S., 2008, *Application of Solid Ash Based Catalyst in Heterogenous Catalys. Environ Sci. Technol*, (42), 7055-7063.
- Weng, L.; Sagoe-Crentsil, K., 2007, *Dissolution Processes, Hydrolysis and Condensation Reaction During Geopolymer Synthesis: Part I – Low Si/Al Ratio System. J mater Sci*, 42, 2997-3006.
- Xu, H.; Deventer, J. S. J. V., 2002, *Microstructural Characterisation of Geopolymers Synthesised from Kaolinite/Stilbite Mixtures Using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX, TEM/EDX, and HREM. Cement & Concrete Research*, 32, 1705-1716.
- Zaharaki, D.; Komnitsas, K.; Perdikatsis, V., 2010, *Use of Analytical Techniques for Identification of Inorganic Polymer Gel Composition. J Mater Sci*, 45, 2715-2724