

Sodium sebagai Aktivator *Fly Ash*, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer

Januarti Jaya Ekaputri

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Intitut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Email: januarti_je@yahoo.com

Triwulan

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Intitut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Email: triwulan_marwan@yahoo.com

Abstrak

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton geopolimer sangat bergantung pada sifat material pozolan dan larutan aktivator yang digunakan pada campuran pastanya. Dalam paper ini disampaikan beberapa cara untuk memanfaatkan Lumpur Sidoarjo (*Lusi*) dan trass sebagai material substitusi fly ash di dalam campuran pasta untuk dianalisa sifat mekaniknya. Larutan NaOH yang dicampur dengan Na_2SiO_3 digunakan sebagai aktivator yang konsentrasinya divariasikan dari 8M sampai 14M. Perbandingan berat Na_2SiO_3 terhadap berat larutan NaOH juga bervariasi dari 0.5 sampai 2.5. Tes kuat tekan, tes belah dan tes porositas dilakukan untuk membandingkan setiap benda uji dari komposisi yang berbeda. Hasil studi menunjukkan bahwa kuat tekan beton dipengaruhi oleh konsentrasi NaOH, perbandingan Na_2SiO_3 terhadap larutan NaOH dan penyusun material dasar bindernya.

Kata-kata Kunci: Beton geopolimer, fly ash, trass, Lumpur Sidoarjo.

Abstract

Some previous studies showed that the compressive strength of geopolymer concrete was dependent on pozzolanic materials used and the concentration of activator solution in the mixture. The effort to use Sidoarjo Mud and trass as an additive material in the mixture was investigated in this study to analyze the mechanical properties of the concrete. NaOH solution mixed with Na_2SiO_3 was used as the activator solution varied from 8 M to 14 M. Ratio of Na_2SiO_3 to NaOH solution by mass were also varied from 0.5 to 2.5 Trass and Sidoarjo Mud were introduced as fly ash substitution in the mixture. Compressive strength test of cylindrical specimens, splitting test and porosity test were carried out comprehensively to compare the specimens from each composition. The results showed that the strength of geopolymer concrete was influenced by the concentration of NaOH solution and the ratio of Na_2SiO_3 to NaOH in the alkali solution and the composition of the binder.

Keywords: Geopolymer concrete, fly ash, trass, Sidoarjo Mud.

1. Pendahuluan

Saat ini, pengurangan penggunaan jumlah semen portland harus menjadi prioritas para praktisi dan produsen semen. Beton geopolimer mulai diperkenalkan sebagai beton ramah lingkungan sebagai solusi beton inovasi untuk mengurangi emisi CO₂ akibat penggunaan semen portland. Material dasar pembentuk pasta geopolimer adalah sumber pozolan baik dari alam maupun pozolan buatan. Material yang bersifat pozolan mengandung silika dan alumina dapat digunakan sebagai binder (pengikat). Diantaranya adalah *fly ash*, metakaolin dan abu sekam atau material vulkanik (Davidovits, 2008). *Fly ash* kelas F, salah satu material dasar yang paling banyak digunakan, didapatkan dari

sisia pembakaran batu bara. Beton geopolimer berbasah dasar *fly ash* terbentuk dari reaksi polimerisasi akibat reaksi alkali-aluminosilikat yang menghasilkan material kuat berstruktur seperti zeolit (Davidovits, 2005). Dalam campurannya, sumber silika dan alumina direaksikan dengan larutan alkali sebagai aktivatornya. Untuk itu, diperlukan komposisi aktivator yang tepat sehingga bisa membentuk pasta geopolimer untuk mengikat agregat menjadi beton geopolimer. Aktivator yang umumnya digunakan adalah campuran Na_2SiO_3 dan NaOH dengan konsentrasi 8M sampai 14M. Perbandingan antara Na_2SiO_3 dan NaOH bisa diambil antara 0.4 sampai 2.5 (Hardjito et al., 2004).

Di sisi lain, Lumpur Sidoarjo (Lusi) sebagai salah satu sumber pozolan yang menumpuk sebagai material yang belum diolah menjadi salah satu perhatian di kalangan akademisi untuk mengurangi volumenya di lapangan (Ekaputri dan Triwulan, 2006). Menurut penelitian sebelumnya, material ini dalam kondisi kering bisa digunakan sebagai pengisi pada beton geopolimer. Kesulitan yang dihadapi pada saat pengecoran adalah waktu pengikatannya yang sangat cepat serta workabilitas yang rendah karena tingginya daya serap lumpur terhadap air (Triwulan et al., 2007). Diperlukan upaya untuk mengaktifkan Lusi sebagai bahan pozolan alam. Salah satu cara yang paling umum adalah dengan mengkalsinasi (membakar) Lusi pada suhu yang tepat untuk mengubah sifatnya menjadi reaktif dan bisa berikatan dengan alkali.

Selain *fly ash*, material lain yang bersifat pozolan adalah trass, yang dihasilkan dari letusan gunung berapi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa material vulkanik memiliki silika dan alumina yang cukup reaktif jika dicampur dengan semen portland (Hossain, 2003). Sifat pozolanik yang dikandung dalam trass diharapkan bisa memberikan efek positif pada kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash*.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan alternatif sumber pozolan yang bisa dimanfaatkan untuk membuat beton geopolimer di samping upaya untuk mengurangi volume Lusi dan memanfaatkan *fly ash* sebagai sumber utama pembuatan beton geopolimer. *Fly ash* sebagai material dasar binder akan dicampurkan dengan beberapa alternatif sumber pozolan lainnya seperti Lusi dalam kondisi kering, Lusi yang sudah dikalsinasi (dibakar) dan trass dari sumber vulkanik.

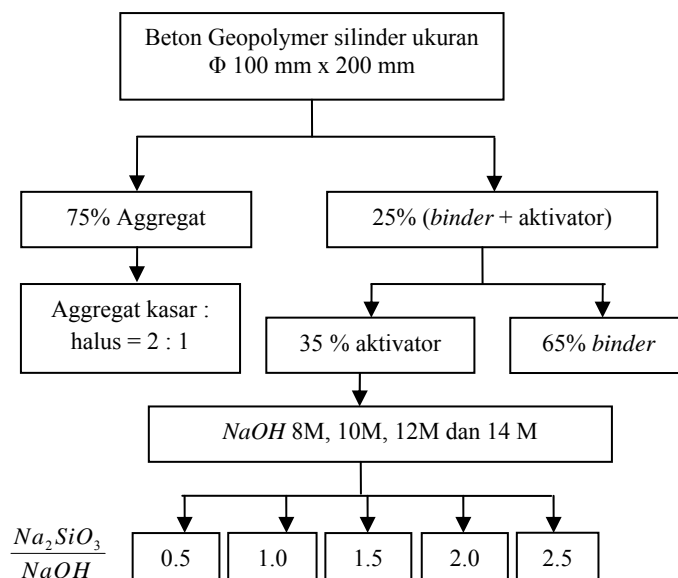
2. Material

Spesimen yang dibuat adalah beton berbentuk silinder berukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Bahan beton terdiri dari *binder*, larutan aktivator dan agregat diaduk dalam molen dengan urutan: batu pecah-pasir-*binder*-aktivator-tambahan air (jika diperlukan). Campuran beton dengan komposisi seperti pada **Gambar 1**, kemudian dicetak dalam cetakan berbentuk silinder. Sehari setelah pengecoran, beton dikeluarkan dari cetakannya dan diangin-anginkan pada suhu ruang.

Berdasarkan jenis *bindernya*, ada 4 variasi beton yang dibuat, yaitu:

- Binder tipe A berbahan dasar *fly ash* murni, yang akan dijadikan binder acuan.
- Binder tipe B dengan komposisi 75% *fly ash*: 25% Lusi kering. Berdasarkan penelitian sebelumnya (Triwulan, 2007), Lusi yang dikeringkan berperan sebagai pengisi pada pasta geopolimer.
- Binder tipe C dengan komposisi 75% *fly ash*: 25% Lusi bakar. Komposisi ini dipilih agar diketahui perubahan sifat Lusi kering dari kristal menjadi amorf setelah mengalami proses kalsinasi (pembakaran).
- Binder tipe D dengan komposisi 75% *fly ash*: 25% trass.

Komposisi kimia *fly ash*, Lusi dan trass dirangkum dalam **Tabel 1**. Komposisi kimia Lusi kering berubah setelah proses kalsinasi karena adanya perubahan mineral dan berat pada materialnya. Kenaikan oksida besi yang terkandung dalam Lusi bakar disebabkan material ini setelah dikalsinasi kemudian dihaluskan dalam mesin *ball mill* yang bahannya terbuat dari besi. Kemungkinan adanya besi yang ikut tercampur dalam Lusi bakar ini menyebabkan kandungan oksida besi meningkat sekitar 20%.



Gambar 1. Komposisi campuran beton dalam perbandingan berat

Tabel 1. Komposisi kimia *binder* (%) dengan analisa XRF

Bahan	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SO ₃	SO ₂	LOI
<i>Fly Ash</i>	52.2	38.6	2.9	0.7	0.5	0.4	0.5	1.2	-	1.4
Lusi Kering	53.1	18.3	5.6	2.1	3.0	1.4	2.9	-	3.0	10.2
Lusi Bakar	46.0	14.0	25.5	5.6	-	3.0	-	2.6	-	3.3
Trass	87.5	0.2	1.9	1.7	0.8	0.41	0.9	0.5	-	6.2

2.1 *Fly ash* sebagai binder utama

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam kelas F (ASTM C 618-03) berasal dari Jawa Power Paiton, Probolinggo, Jawa Timur. Gambar 2 adalah *fly ash* yang diamati dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Gambar itu menunjukkan bahwa partikel *fly ash* berbentuk *spherical* berukuran kurang dari 45µm. Gambar 3 adalah hasil analisa XRD yang menunjukkan bahwa material ini bersifat amorf yang banyak mengandung silika dan alumina.

2.2 Lumpur sidoarjo (Lusi) dalam binder tipe B dan tipe C

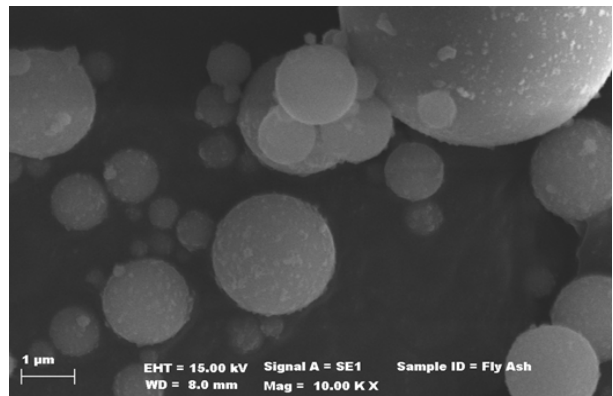
Lusi diambil dari Porong, Sidoarjo dan dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C. Kemudian Lusi kering ini dihaluskan sehingga lolos saringan no. 200 (75µ). Berdasarkan data dari Differential Thermal Analysis (DTA), yang diperlihatkan pada Gambar 4, Lusi yang dioven harus dibakar terlebih dahulu. Dibutuhkan sekurangnya suhu 70°C untuk mengaktifkan oksida silika dan alumina dalam Lusi kering. Hasil analisa XRD yang ditampilkan pada Gambar 5 menunjukkan bahwa komposisi mineral yang terkandung dalam Lusi akan berubah jika dibakar pada suhu yang tepat. Lusi kering oven kemudian dibakar pada suhu 800°C-850°C selama minimal 2 jam, kemudian dihaluskan sehingga lolos saringan no 200. Lusi kering dan Lusi bakar yang digunakan dalam campuran binder tipe B dan tipe C adalah sebanyak 25% menggantikan berat *fly ash*. Dalam pembuatan beton tipe B dan C ini, diperlukan tambahan air sebanyak 80%-100% dari berat Lusi (Triwulan et al, 2007).

2.2.1 Trass dalam binder tipe D

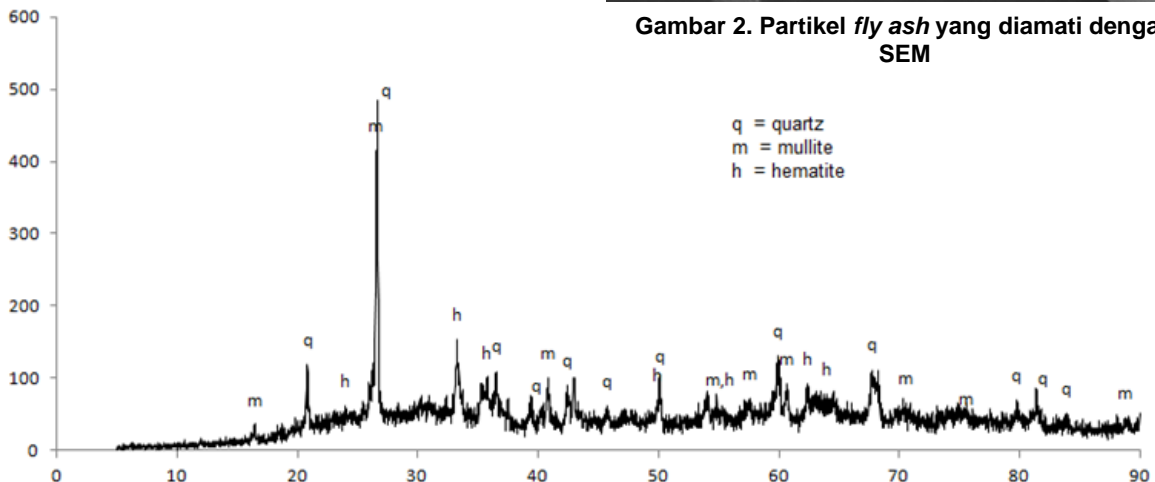
Trass dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 1 diambil dari PT Semen Gresik yang berasal dari Pasuruan. Bahan ini dihaluskan sehingga lolos saringan no 200. Trass termasuk dalam pozolan kelas N (ASTM C 618-03). Trass yang digunakan dalam campuran binder tipe D adalah sebanyak 25% menggantikan berat *fly ash*.

2.2.2 Alkali aktivator

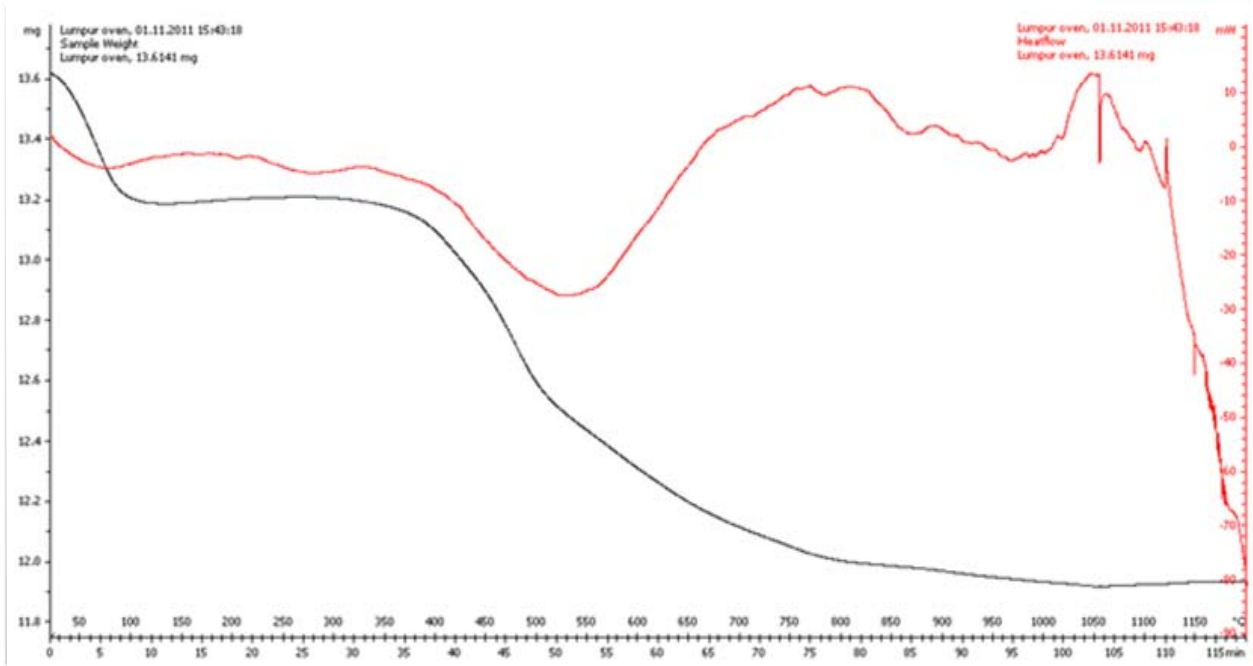
Aktivator yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Na₂SiO₃ dan NaOH. Na₂SiO₃ mengandung 96% sodium silikat yang berbentuk gel sedangkan NaOH berbentuk serbuk dengan kandungan sodium hidroksida sebesar 98%. NaOH dicampurkan dengan air suling sehingga berkonsentrasi 8M sampai 14M. Larutan ini kemudian dicampurkan dengan Na₂SiO₃ dengan perbandingan antara Na₂SiO₃ dan larutan NaOH adalah 0.5; 1.0; 1.5; 2.0 dan 2.5. Sebelum digunakan untuk membuat pasta, larutan aktivator ini didiamkan selama sehari sehingga suhunya mencapai suhu ruang.



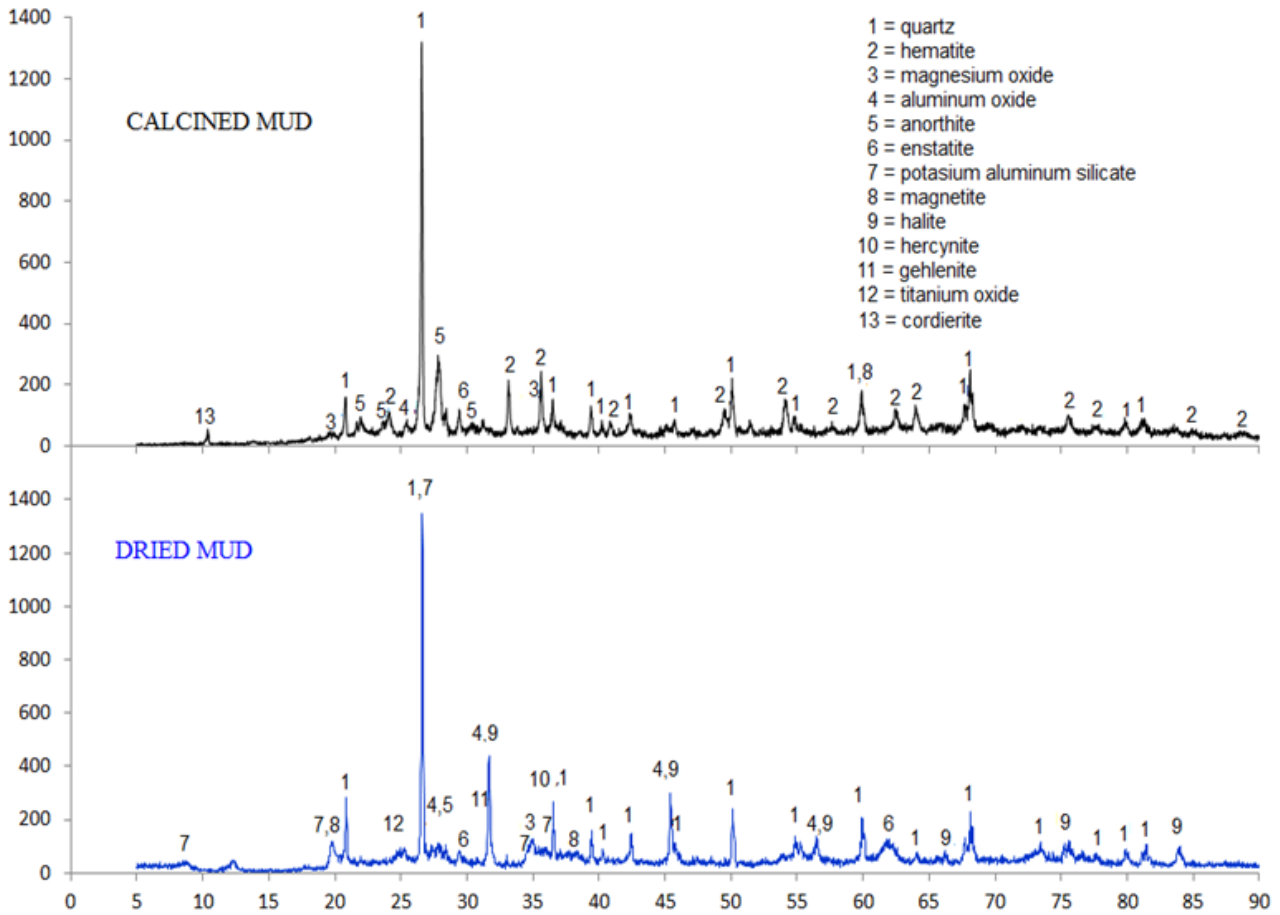
Gambar 2. Partikel *fly ash* yang diamati dengan SEM



Gambar 3. Analisa XRD terhadap *fly ash*



Gambar 4. Analisa DTA terhadap lusi kering



Gambar 5. Analisa XRD terhadap lusi oven dan lusi bakar

2.2.3 Agregat

Agregat halus (pasir) yang digunakan adalah pasir sungai dari Lumajang dengan berat jenis 2670 kg/m^3 . Agregat kasar berupa batu pecah berukuran maksimum 20 mm dengan berat jenis 2700 kg/m^3 . Perbandingan berat antara pasir dan batu pecah adalah 1:2.

3. Pengujian di Laboratorium

Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan, ITS, Surabaya. Hasil pengujian yang dievaluasi merupakan rerata dari 3 benda uji. Sifat mekanik beton diuji dengan tes kuat tekan (ASTM C 39-03) pada spesimen berumur 3, 7, 14, 21 dan 28 hari, kuat belah (ASTM C496-03) pada spesimen berumur 28 hari dan porositas untuk menganalisa pori pada beton berumur 28 hari (Gambar 6).

4. Hasil dan Pembahasan

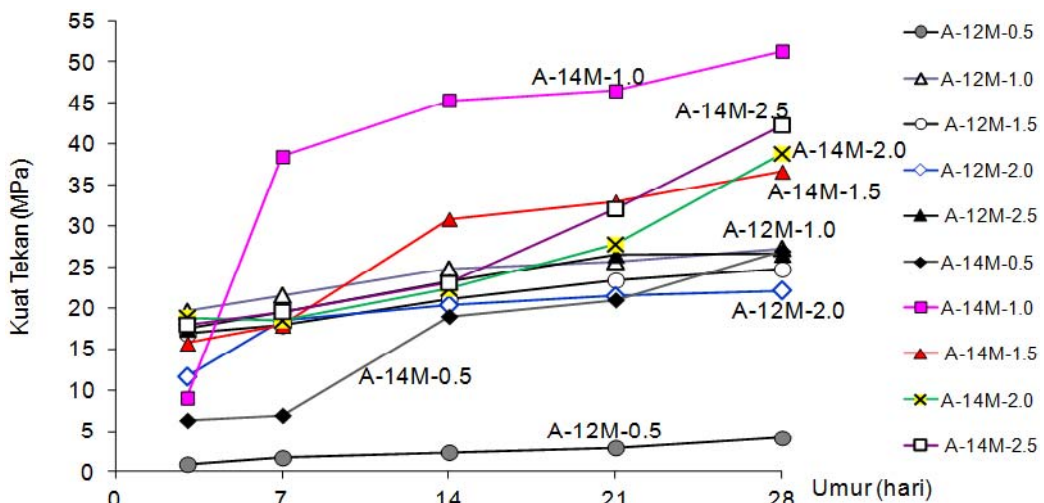
Kode spesimen dibuat berdasarkan urutan: Jenis Binder - Molaritas NaOH - Perbandingan Na_2SiO_3 dan NaOH. Jenis binder terdiri dari campuran A, B, C dan D. Molaritas NaOH bervariasi 8M, 10M, 12M dan 14M. Perbandingan Na_2SiO_3 dan NaOH bervariasi 0,5; 1; 1,5; 2 dan 2,5.

4.1 Pengaruh larutan aktivator

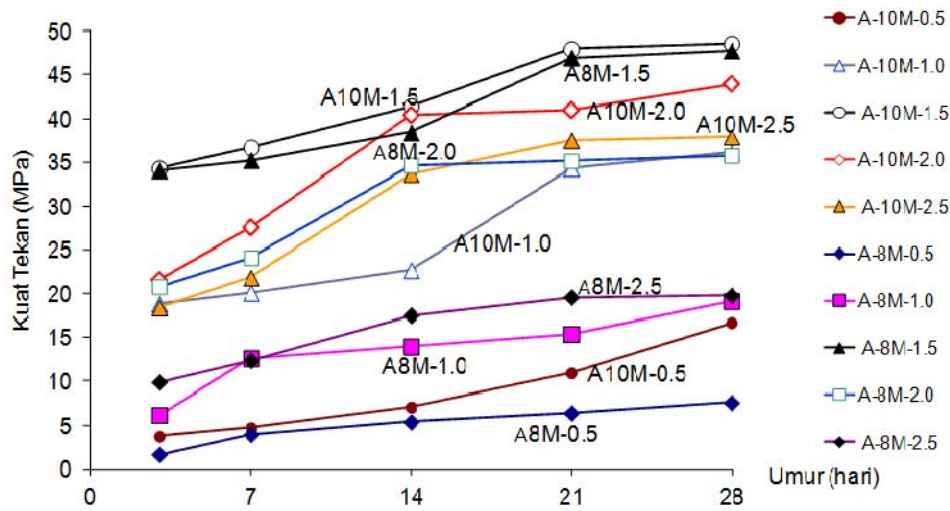
Pada Gambar 7 dan Gambar 8, ditampilkan hasil kuat tekan beton tipe A berbahan dasar binder dari fly ash murni. Terlihat bahwa beton tipe A yang dibuat dengan larutan NaOH 14M memberikan kuat tekan yang paling tinggi dibandingkan beton lainnya. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Provis pada tahun 2005 (Provis dan Van Deventer, 2009) yang menyatakan bahwa NaOH berperan dalam pembentukan formasi zeolit. Namun demikian, peran Na_2SiO_3 dalam larutan aktivator juga berperan dalam meningkatkan kuat tekan karena mempercepat terjadinya reaksi pada proses polimerisasi. Beton yang mengandung sedikit Na_2SiO_3 dalam larutan NaOH pekat tidak dapat mencapai kuat tekan yang tinggi. Larutan aktivator juga mempengaruhi workabilitas beton pada saat pengecoran yang menyebabkan beton tidak padat. Larutan yang terlalu pekat akibat konsentrasi NaOH atau kandungan Na_2SiO_3 dapat menurunkan kuat tekan karena kesulitan saat pengadukan dan pengecoran (Ekaputri et al., 2007). Dengan demikian, untuk pembuatan beton struktural, beton tipe A ini direkomendasikan jika perbandingan berat Na_2SiO_3 dan NaOH adalah di antara 1.0-2.5 dengan konsentrasi NaOH di antara 8M-14M.



Gambar 6. Pengujian kuat tekan, belah dan porositas di laboratorium



Gambar 7. Kuat tekan pada beton A dengan larutan aktivator 12M dan 14M



Gambar 8. Kuat tekan pada beton A dengan larutan aktivator 8M dan 10M

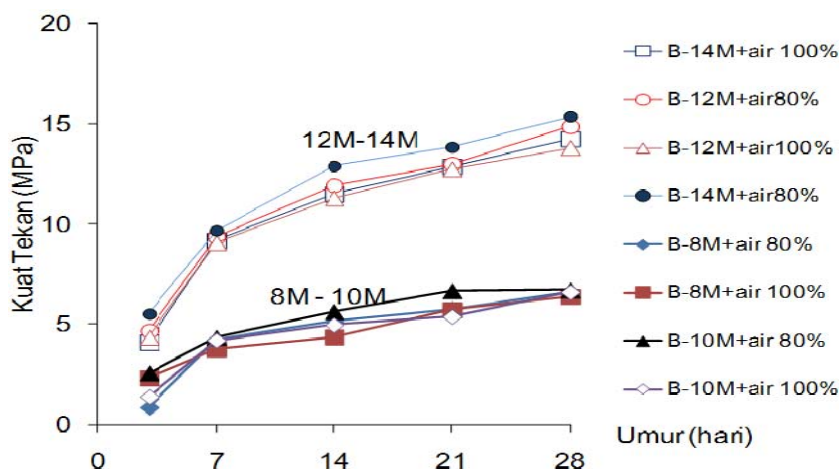
4.1.1 Pengaruh lusi kering

Pada Gambar 9, terlihat bahwa penggantian 25% berat *fly ash* dengan Lusi kering menyebabkan kuat tekan beton menjadi turun. Hal ini disebabkan karena pada campuran *binder* B, Lusi kering hanya bersifat sebagai pengisi (*filler*) sehingga mengurangi daya ikat *binder* terhadap agregat. Penambahan air untuk meningkatkan workabilitas pada beton tipe B menyebabkan konsentrasi larutan aktivator menurun yang mengurangi kuat tekan beton. Konsentrasi larutan aktivator sangat berpengaruh pada daya ikat *binder*. Hal ini ditunjukkan oleh beton B yang terbuat dari larutan NaOH 12M dan 14M dengan perbandingan berat Na_2SiO_3 dan NaOH sebesar 2.5 yang dipertahankan konstan. Secara umum kuat tekan beton berkurang sebesar 62% pada larutan NaOH 12M dan 14M serta berkurang sebesar 83% pada larutan NaOH 8M dan 10M. Sehingga untuk penggunaan beton non-struktural, beton tipe B dengan larutan aktivator NaOH 12M sampai 14M bisa direkomendasikan. Beton tipe ini tidak bisa digunakan untuk pembuatan elemen beton struktural.

4.1.2 Pengaruh lusi bakar

Kuat tekan beton tipe C pada Gambar 10 menunjukkan bahwa kemampuan *binder* C mengikat agregat meningkat jika Lusi dibakar terlebih dahulu. Lusi bakar menyebabkan oksida dalam bentuk silika dan alumina yang terkandung dalam Lusi menjadi aktif. Oksida ini berperan dalam proses polimerisasi yang bereaksi dengan larutan aktivatornya.

Penggantian *fly ash* sebesar 25% dengan Lusi bakar secara umum hanya menurunkan kuat tekan beton sebesar 47% pada larutan NaOH 14M dan 33% pada larutan NaOH 12M. Untuk beton tipe C ini, disarankan menggunakan tambahan air maksimal 80% terhadap berat Lusi bakar. Beton struktural bisa dibuat dari tipe beton C dengan konsentrasi larutan NaOH 12M-14M dan perbandingan berat Na_2SiO_3 dan NaOH sebesar 2.5 yang dipertahankan konstan.



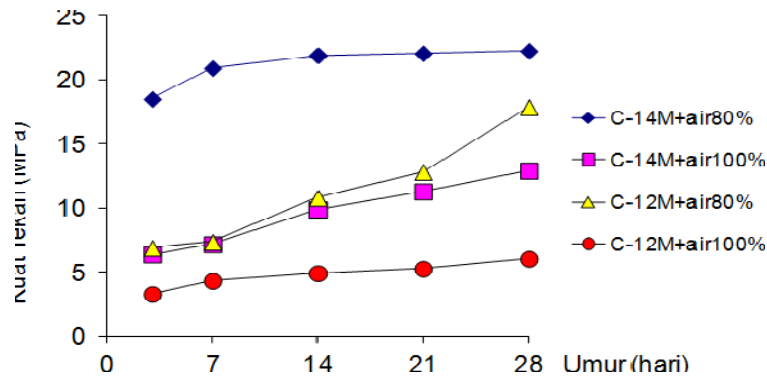
Gambar 9. Kuat tekan pada beton B

4.1.3 Pengaruh trass

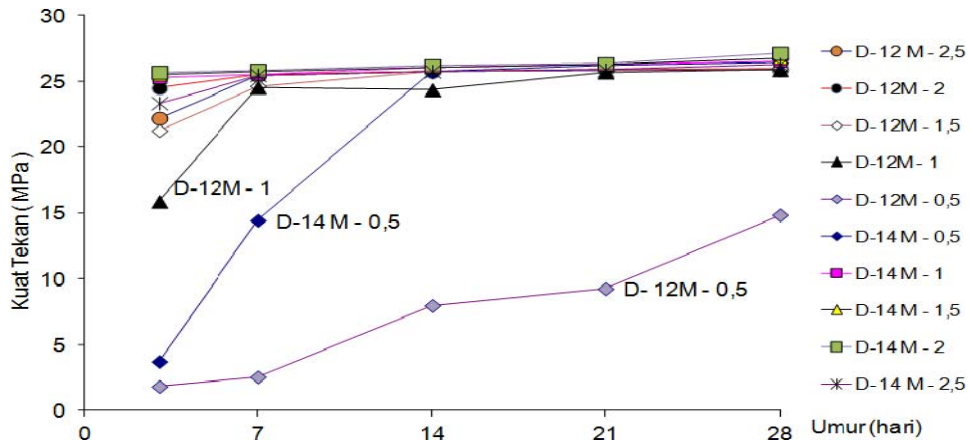
Pada Gambar 11 dan Gambar 12 diperlihatkan bahwa kuat tekan beton tipe D sangat tergantung pada konsentrasi larutan aktivator. Beton mencapai kuat tekan sesungguhnya hanya dalam waktu 3-7 hari setelah pengecoran jika larutan NaOH 12M – 14M digunakan. Selain itu, semakin banyak Na_2SiO_3 dalam larutan, semakin cepat beton mencapai titik kekuatan optimumnya. Beton dengan larutan NaOH 8M-10M masih menunjukkan kecenderungan kenaikan nilai kuat tekan walaupun umur beton melewati 28 hari.

Dalam hal ini, terbukti bahwa trass sebagai material vulkanik bereaksi lambat dalam alkali yang rendah. Hal ini sesuai dengan penelitian Hossain (2003) yang menyarankan penggunaan suhu tinggi pada curing beton berbahan material vulkanik untuk meningkatkan reaksi pozolaniknya.

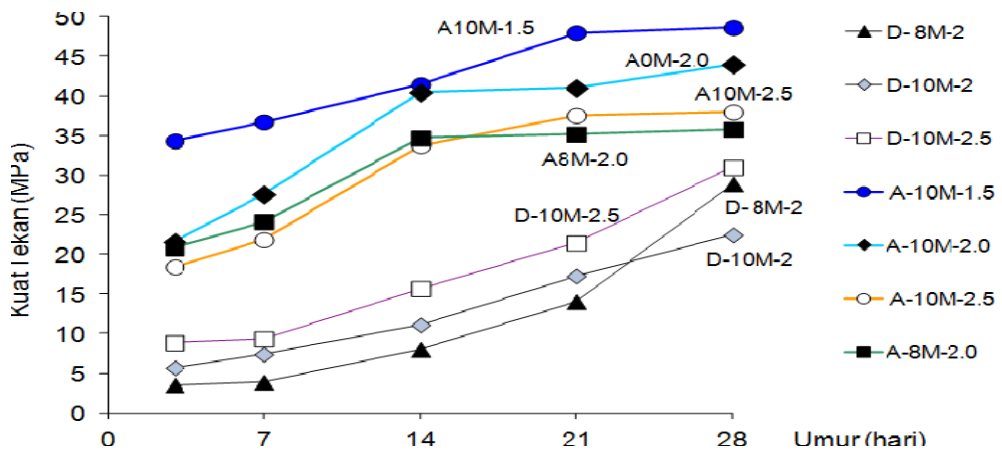
Berdasarkan hasil pengujian untuk beton tipe D ini, direkomendasikan bahwa untuk beton struktural, trass dapat digunakan sebagai campuran asalkan perbandingan berat Na_2SiO_3 dan NaOH berkisar antara 2 -2.5, sedangkan konsentrasi larutan NaOH yang disarankan adalah 10M-14M.



Gambar 10. Kuat tekan pada beton C



Gambar 11. Kuat tekan pada beton D dengan larutan aktivator 12M dan 14M



Gambar 12. Kuat tekan pada beton D dengan larutan aktivator 8M dan 10M

4.1.4 Kuat belah beton

Pada Tabel 2 dan Tabel 3 disajikan perbandingan antara kuat belah beton terhadap kuat tekannya pada umur 28 hari. Pada beton konvensional, kuat belah beton biasanya berkisar antara 10% dari kuat tekannya. Kemampuan belah beton geopolimer yang lebih rendah daripada beton konvensional ini menunjukkan bahwa beton geopolimer mempunyai sifat yang lebih getas. Ada kecenderungan pengurangan sifat getas terjadi jika Na_2SiO_3 ditambahkan ke dalam campuran.

Pada beton A, kuat belah paling tinggi dihasilkan oleh beton dengan perbandingan berat Na_2SiO_3 dan larutan NaOH berkisar antara 1.0-2.5. Sama halnya dengan beton D, perbandingan berat Na_2SiO_3 dan larutan NaOH antara 1.0-2.5 juga memberikan kuat belah tertinggi.

Tabel 2. Hubungan kuat tekan dan belah beton A

Kode	Tekan f_c' (MPa)	Belah f_t (MPa)	f_t/f_c'
A8-0.5	7.58	0.20	0.03
A8-1.0	19.13	1.48	0.08
A8-1.5	47.78	2.32	0.05
A8-2.0	35.76	2.24	0.06
A8-2.5	19.79	1.51	0.08
A10-0.5	16.7	1.73	0.10
A10-1.0	36.11	2.74	0.08
A10-1.5	48.59	3.20	0.07
A10-2.0	43.94	3.08	0.07
A10-2.5	37.95	2.99	0.08

Tabel 3. Hubungan kuat tekan dan belah beton D

Kode	Tekan f_c' (MPa)	Belah f_t (MPa)	f_t/f_c'
D12-0.5	14.84	0.15	0.01
D12-1.0	25.88	0.45	0.02
D12-1.5	26.00	1.49	0.06
D12-2.0	25.92	1.98	0.08
D12-2.5	25.88	1.81	0.07
D14-0.5	26.41	0.25	0.01
D14-1.0	45.52	0.70	0.02
D14-1.5	47.08	1.75	0.04
D14-2.0	55.41	2.08	0.04
D14-2.5	26.28	2.36	0.09

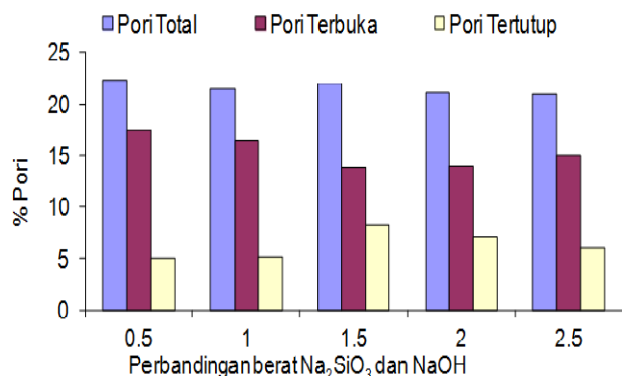
4.1.5 Pengaruh konsentrasi larutan aktivator pada porositas beton

Tes porositas beton geopolimer bertujuan untuk mengetahui besarnya pori terbuka dan pori tertutup yang ada di dalam matriks beton tersebut. Pori terbuka yaitu pori yang bersifat permeable (dapat ditembus, baik oleh udara ataupun air). Pori tertutup adalah pori yang bersifat impermeable (tidak dapat ditembus). Pori yang tertutup lebih baik dari pada pori yang terbuka karena pori yang tertutup memiliki tekanan hidrostatik yang

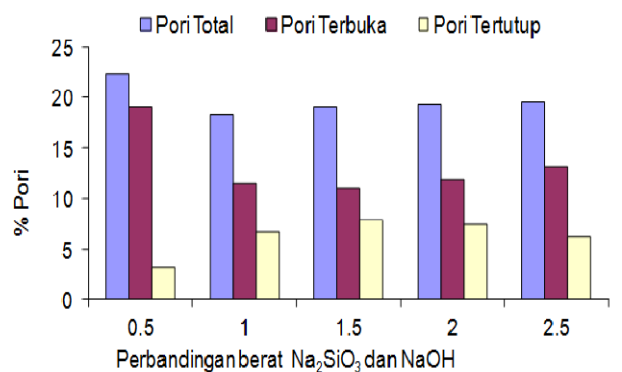
menambah kuat tekan *binder* dan terhindar dari retak, sedangkan pori yang terbuka membuat *binder* menjadi keropos sehingga menurunkan kuat tekan *binder*.

Semakin tinggi molaritas, jumlah total pori semakin sedikit tetapi jumlah pori tertutup semakin banyak. Hal ini dipengaruhi oleh kekentalan yang dimiliki oleh NaOH dalam campuran setiap komposisi (Ekaputri et al., 2010). Kepekatan berhubungan dengan semakin berkurangnya air yang dicampurkan dalam larutan. Pada saat proses curing dilakukan, air yang berada dalam *binder* akan menguap sehingga rongga yang dulunya ditempati oleh air menjadi kosong. *Binder* yang menggunakan larutan NaOH 10M lebih pekat jika dibandingkan dengan *binder* yang menggunakan larutan 8M. Oleh sebab itu, diperkirakan jumlah air yang berada dalam rongga *binder* 10M lebih sedikit jika dibandingkan dengan *binder* yang menggunakan larutan NaOH 8M dan hal itu menyebabkan jumlah total pori *binder* 8M relatif lebih banyak jika dibandingkan dengan *binder* 10M.

Berdasarkan Gambar 13 dan Gambar 14, terlihat bahwa ada titik optimum yang menunjukkan pori tertutup paling besar, yaitu pada perbandingan antara Na_2SiO_3 dan larutan NaOH 1.5. Pada titik ini beton A mempunyai kuat tekan paling tinggi. Hal ini membuktikan bahwa ada hubungan erat antara porositas dan kuat tekan pada beton geopolimer.



Gambar 13. Prosentase pori dalam beton A dengan larutan NaOH 8M



Gambar 14. Prosentase pori dalam beton A dengan larutan NaOH 10M

5. Kesimpulan

1. Semakin tinggi perbandingan berat Na_2SiO_3 dan larutan NaOH tidak selalu menghasilkan kuat tekan dan kuat belah yang tinggi pula, sedangkan semakin tinggi molaritas yang digunakan, maka semakin tinggi pula kuat tekan dan kuat belah yang dihasilkan. Beton geopolimer yang menggunakan molaritas 14M menghasilkan kuat tekan yang lebih besar jika dibandingkan dengan beton geopolimer dengan molaritas yang lebih rendah.
2. Rekomendasi dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

Jenis Binder	Komposisi Beton	NaOH (Molar)	$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}}$	$f_c'_{\text{maks}28\text{hari}}$ (MPa)	Pemanfaatan beton
A	(100% Fly Ash) + aktivator + agregat	8-14	1-2.5	51.3	Struktural
B	(75%Fly Ash +25% LK)+aktivator+ agregat	12-14	2.5	15.4	Non-Struktural
C	(75%Fly Ash +25% LB)+aktivator+ agregat	12-14	2.5	22.3	Struktural
D	(75%Fly Ash +25% Trass)+aktivator+ agregat	10-14	2-2.5	28.3	Struktural

3. Berdasarkan hasil tes kuat belah beton geopolimer didapatkan bahwa setiap beton yang memiliki kuat tekan tinggi, juga memiliki kuat belah yang relative tinggi pula di setiap molaritas aktivatornya. Walaupun demikian, ditemukan bahwa beton geopolimer bersifat lebih getas daripada beton konvensional.
4. Berdasarkan hasil tes porositas, dapat disimpulkan bahwa beton yang memiliki prosentase pori tertutup optimum mengindikasikan perilaku mikrostruktur yang baik. Hasil tes porositas ini berhubungan erat dengan hasil tes tekan dan belah. Semakin banyak jumlah pori tertutup dalam beton, dan semakin sedikit jumlah pori terbukanya, maka semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan.

Daftar Pustaka

- ASTM C618-03, 2003, *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*, ASTM International, US.
- ASTM C39-03, 2003, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International, US.
- ASTM C496-03, 2003, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimen*, US: ASTM International.
- Davidovits, J., 2005, *Green Chemistry and Sustainable Development Solutions*, Perancis: Geopolymer Institute.
- Davidovits, J., 2008, *Geopolymer: Chemistry and Applications*, Perancis: Geopolymer Institute.
- Ekaputri, J.J., Maekawa, K., dan Ishida, T., 2010, *The Use of Geopolymerization Process for Boron Fixation in Fly Ash*, Jinan, China: *Proceeding the 7th International Symposium on Cement & Concrete (ISCC2010) and the 11th International Conference on Advance in Concrete Technology and Sustainable Development*.
- Ekaputri, J.J., dan Triwulan, 2006, *The Efforts to Use Porong Mud as an Additive Material for Geopolymer Concrete*, Surabaya: Seminar Nasional Tentang Usaha Pemanfaatan Lumpur Porong sebagai Bahan Bangunan. KLH-ITS.
- Ekaputri, J.J. dan Triwulan, 2006, Study on Porong Mud-Based Geopolymer Concrete, *Jurnal HAKI (Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia)*, Vol. 7 No 2.
- 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. 124-139.
- Hardjito, D., Wallah S.E and Rangan, B.V, 2004, *Factor Influencing The Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete*, *Civil Engineering Dimension*. 6. Issue: 2, hal. 88.
- Hossain, Khandaker M. Anwar, 2003, *Blended Cement Using Volcanic Ash and Pumice*, *Cement and Concrete Research*. 33. Hal. 1601–1605.
- Provis, J.L, and Van Deventer, J.S.J, 2009, *Activating Solution Chemistry For Geopolymers, Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, Woodhead Publishing, Abingdon UK, hal.50-71.
- Triwulan, Ekaputri, J. J dan Adiningtyas, T, 2007, Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dan Lumpur Porong Kering sebagai Pengisi, *TORSI Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil*, 27(3), hal. 33 – 46.