

Pengaruh Konsentrasi SiO₂ pada Larutan Aktivator Terhadap Kuat Tekan dan Ketahanan Api Geopolymer berbasis Metakaolin

Wiwik Dwi Pratiwi, Wahyu Wiyati, Dian Wahyu Winata
 Jurusan Teknik Bangunan Kapal
 Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
 Surabaya, Indonesia
 e-mail: pratiwinoval@gmail.com

Abstract— Geopolymer merupakan material binder yang memiliki potensi aplikasi yang luas. Penggunaan geopolymer untuk konstruksi di lingkungan laut merupakan peluang yang besar karena geopolymer memiliki sifat ketahanan terhadap penetrasi klorida yang relatif baik. Penelitian ini meninjau pengaruh perbandingan konsentrasi SiO₂ di dalam larutan aktivator terhadap kuat tekan dan ketahanan api geopolymer berbasis metakaolin. Untuk uji tekan, pasta dicetak dengan cetakan akrilik berdiameter 20 mm dengan tinggi 40 mm. Setelah 24 jam, benda uji dikeluarkan dari cetakan, kemudian disimpan di dalam wadah tertutup dalam keadaan terbungkus kain basah. Pengujian dilakukan pada umur 7 dan 28 hari. Pada uji ketahanan api, spesimen berukuran panjang 100 mm, lebar 20 mm, dan tebal 3 mm dibakar dengan nyala Bunsen. Penelitian ini menghasilkan kesimpulan bahwa kuat tekan dan ketahanan api geopolymer meningkat jika konsentrasi SiO₂ dalam larutan aktivator meningkat hingga nilai tertentu, namun pada konsentrasi SiO₂ yang terlalu tinggi geopolymer tidak bisa mengeras.

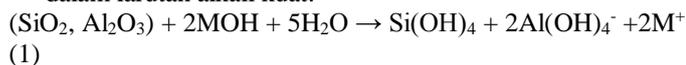
Keywords— geopolymer, kuat tekan, metakaolin, ketahanan api

I. PENDAHULUAN

Geopolymer adalah material yang berasal dari hasil reaksi antara material yang kaya akan aluminium dan silikat (disebut sebagai material aluminosilikat) dengan aktivator alkali. Hasil reaksi tersebut adalah bahan yang bersifat mengikat bahan lain (binder). Aktivator alkali yang biasa digunakan dalam pembuatan geopolymer adalah larutan NaOH yang dicampurkan dengan cairan natrium silikat atau *waterglass*. Bahan aluminosilikat bisa berupa bahan alam misalnya metakaolin, trass, feldspar atau limbah misalnya fly ash, blast furnace slag, limbah pertambangan [1].

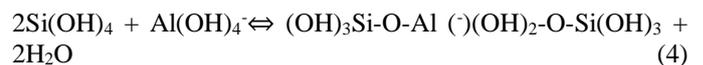
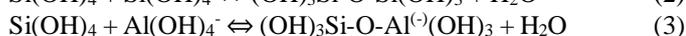
Mekanisme geopolymerisasi terdiri atas:

(i) Pelarutan Si dan Al dari material aluminosilikat padat dalam larutan alkali kuat.

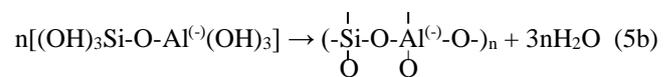
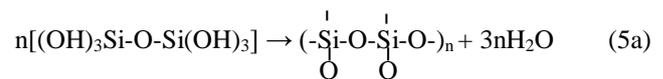


M adalah notasi yang mewakili Na dan K.

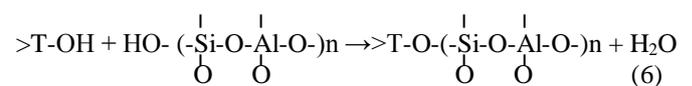
(ii) Pembentukan oligomer Si dan atau Si-Al dalam fase cairan.



Keberadaan silikat terlarut memperkuat pembentukan oligomer (iii) Poli kondensasi oligomer membentuk polimer.



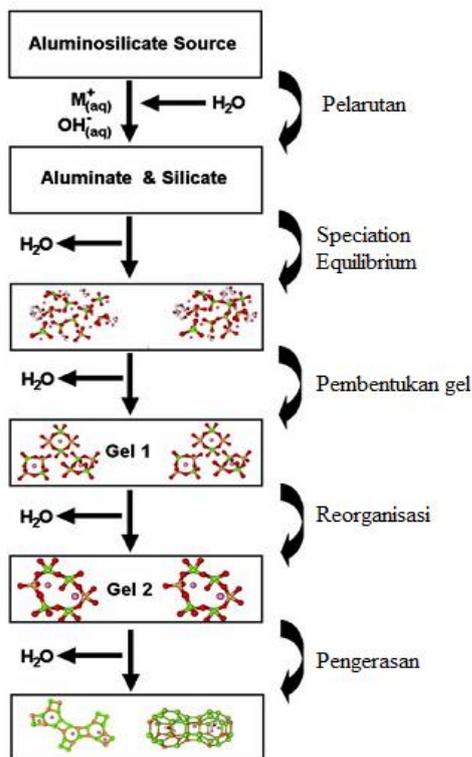
(iv) Pengikatan partikel-partikel padatan di dalam kerangka geopolymer dan pengerasan seluruh sistem menjadi struktur akhir polimer padat. Karena kerangka geopolymer dikembangkan dalam fase cair, maka terjadi interaksi antara cairan dengan bagian yang aktif dari permukaan padatan, yang mana mungkin terjadi reaksi pengikatan terhadap partikel-partikel tak larut dalam struktur akhir geopolymer sebagaimana tercantum dalam persamaan reaksi (6):



di mana >T menunjukkan permukaan Si atau Al.

Mekanisme geopolymerisasi juga bisa diilustrasikan pada Gambar 1. Tahap pembentukan gel merupakan tahap yang sangat menentukan sifat mekanik geopolymer. Semakin banyak gel yang terbentuk, maka kekuatan semakin tinggi [2].

Larutan aktivator merupakan larutan alkali kuat yang berfungsi untuk menarik ion-ion aluminium dan silikon dari padatannya. Bisa dikatakan, bahwa larutan tersebut berfungsi sebagai pelarut material aluminosilikat sebagaimana telah diterangkan pada persamaan (1) di atas. Larutan aktivator yang banyak digunakan adalah campuran antara larutan basa kuat, NaOH atau KOH, dengan cairan natrium silikat. Komposisi dan jenis larutan aktivator sangat mempengaruhi sifat geopolymer yang dihasilkan.



Gambar 1. Mekanisme geopolymerisasi [3]

Potensial aplikasi geopolimer mencakup banyak bidang karena memiliki sifat: kekuatan tekan yang tinggi, mempunyai ketahanan abrasi tinggi, khususnya jika dicampur dengan pengisi PTFE, bahan yang waktu settingnya bisa diatur, tahan api (sampai 1000°C) tanpa menghasilkan asap beracun jika dipanaskan, mempunyai rentang yang lebar untuk sifat ketahanan asam dan garam, bukan subyek dari reaksi alkali agregat, bahan adhesive terhadap beton lama dan beton baru, baja, gelas dan keramik, memiliki kemampuan cetak yang bagus, dan memiliki sifat protektif terhadap baja penguat karena memiliki pH tinggi dan laju penetrasi klorida yang rendah [4]. Sifat geopolimer yang beragam tersebut tidak dihasilkan dengan formulasi tunggal. Faktor-faktor yang mempengaruhi sifat geopolimer adalah rasio Si/Al [5], rasio SiO₂/Na₂O [2], [6]–[11] dan metode curing [12]–[14]. Tabel 1 menampilkan aplikasi geopolimer berdasarkan rasio Si/Al dalam strukturnya,

Aplikasi geopolimer untuk binder konstruksi di lingkungan laut merupakan suatu peluang yang layak dipertimbangkan karena memiliki sifat yang tahan terhadap penetrasi ion chloride dibandingkan dengan semen Portland [15]–[17]. Pemakaian geopolimer sebagai matriks untuk komposit yang digunakan dalam perkapalan juga merupakan hal yang perlu diteliti karena geopolimer memiliki keunggulan yaitu tahan api, yang mana hal ini tidak dimiliki oleh komposit dengan matriks polimer organik. Kasus kebakaran kapal yang terjadi dengan cepat karena banyak bagian yang menggunakan komposit polimer organik yang mudah terbakar merupakan pelajaran berharga sekaligus tantangan untuk mengembangkan komposit yang tahan api.

Berdasarkan Tabel 1 bisa disimpulkan bahwa untuk aplikasi komposit tahan api diperlukan Si/Al sebesar 3 atau lebih.

TABEL 1. APLIKASI GEOPOLYMER [5]

Rasio Si/Al	Struktur dan Aplikasi
Si:Al = 1 : 1	Struktur molekul 3 dimensi (3D) Bata, keramik, perlindungan api
Si:Al = 2 : 1	Struktur molekul 3 dimensi (3D) Semen dan beton dengan emisi CO ₂ yang rendah pada tahap produksinya Enkapsulasi limbah radioaktif dan limbah beracun
Si:Al = 3 : 1	Struktur molekul 2 dimensi (2D) dengan rantai silang Komposit berpenguat serat gelas untuk perlindungan api Komposit tahan api Peralatan untuk pekerjaan pengecoran (<i>founndry</i>)
Si:Al > 3 : 1	Struktur molekul 2 dimensi (2D) dengan rantai silang <i>Sealant</i> untuk industr pada temperature 200 – 600°C
35<Si:Al<20	Struktur molekul 2 dimensi (2D) dengan rantai silang Komposit berpenguat serat yang tahan panas dan tahan api (<i>high tech</i>)

Modifikasi Si/Al bisa dilakukan dengan menggunakan bahan baku yang berbeda dan menggunakan aktivator natrium silikat dengan konsentrasi Si yang berbeda. Metakaolin merupakan bahan baku yang mempunyai reaktifitas lebih tinggi dibandingkan dengan bahan aluminosilikat yang lain yang ditandai dengan kelarutan Si dan Al yang tinggi di dalam larutan NaOH [18], namun demikian rasio Si/Al dalam metakaolin hanya sekitar 1. Untuk menaikkan rasio Si/Al pada geopolimer berbasis metakaolin bisa dilakukan dengan mencampurkan bahan baku yang memiliki kandungan Si lebih tinggi atau menggunakan aktivator dengan konsentrasi Si yang lebih tinggi.

Penelitian ini mempelajari pengaruh pengaruh konsentrasi SiO₂ di dalam larutan aktivator terhadap kuat tekan dan ketahanan api geopolimer yang dibuat dari metakaolin. Kenaikan konsentrasi SiO₂ di dalam larutan aktivator memberikan efek pada kenaikan Si/Al geopolimer.

II. MATERIAL DAN METODE

A. Material

Bahan baku dalam penelitian ini adalah metakaolin hasil kalsinasi kaolin Belitung pada temperatur 700°C selama 5 jam. Larutan aktivator dibuat dari cairan natrium silikat, NaOH flake dan air demineralisasi. Cairan natrium silikat yang digunakan mempunyai grade 58°Baume, diproduksi oleh PT Kasmaji Mojokerto, Jawa Timur Indonesia dengan komposisi Na₂O 18%, SiO₂ 36%, dan H₂O 46% (dalam % berat). Komposisi metakaolin yang ditentukan dengan teknik X ray fluorescence (XRF) tercantum ditampilkan pada Tabel 2.

Untuk pengujian tahan api, dibuat komposit geopolimer dengan filler pasir silika Lampung lolos ayakan No.80 mesh dan serat polipropilen multi filamen (PPMF) panjang 12.5mm buatan Fosroc.

TABEL 2. KOMPOSISI OKSIDA METAKAOLIN DIUKUR DENGAN XRF

Oksida	% berat
SiO ₂	50.26
Al ₂ O ₃	43.00
MgO	0.12
CaO	0.04
Na ₂ O	0.04
K ₂ O	0.57
Cr ₂ O ₃	0.01
MnO ₂	0.01
Fe ₂ O ₃	0.73
TiO ₂	0.28
LOI*	4.72

*LOI : loss of ignition

B. Metode

Untuk mempelajari pengaruh konsentrasi SiO₂ di dalam larutan aktivator terhadap kuat tekan geopolimer, maka dibuat geopolimer dengan komposisi rasio molar Na/Al = 1 (konstan) dan H₂O/Na₂O = 11 (konstan). Komposisi tersebut merupakan jumlah total komponen yang terdapat di dalam metakaolin dan larutan aktivator. Larutan aktivator dibuat dengan mencampurkan cairan natrium silikat dengan larutan NaOH. Perbandingan antara bagian-bagian dalam larutan aktivator tersebut diatur sehingga sehingga diperoleh konsentrasi rasio molar SiO₂ terhadap Na₂O yang bervariasi yaitu: 0,5; 1; 1,25; 1,5; 1,75 dan 2.

Pada pengujian ketahanan api, dibuat geopolimer dengan komposisi metakaolin dan larutan aktivator yang sama dengan uji tekan, ditambahkan pasir silika dengan perbandingan metakaolin:pasir silika=10:3 serta serat propilen sebanyak 1,5% volume.

Untuk mengetahui kuat tekan geopolimer, maka dibuat pasta dengan cara mencampur metakaolin dengan larutan aktivator dan diaduk dengan mixer kurang lebih selama 3 menit. Pasta kemudian dituang ke dalam cetakan berbahan akrilik berbentuk silinder dengan diameter 20 mm, tinggi 40 mm. Setelah 24 jam, spesimen dikeluarkan dari cetakan kemudian dibungkus dengan kain basah dan dimasukkan dalam wadah plastik yang tertutup rapat. Uji tekan dilaksanakan pada umur 7 hari dan 28 hari.

Sifat ketahanan api diuji dengan membuat specimen berukuran panjang 100 mm, lebar 20 mm, dan tebal 3 mm. Spesimen dibakar dengan nyala Bunsen selama 2 menit, kemudian ditimbang untuk mengetahui perubahan massa sebelum dan sesudah dibakar. Pengujian ini mengadopsi prosedur di dalam ASTM D635.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Komposisi Campuran dan Pencetakan

Sampel pasta geopolimer dibuat dari metakaolin dan larutan aktivator dengan ketentuan sebagaimana diuraikan pada bagian II di atas. Perlu diingat, karena komposisi geopolimer mempunyai Na/Al=1 (konstan) sementara sumber Al hanya dari aluminium, maka jumlah Na₂O yang digunakan untuk semua sampel adalah sama. Dalam hal ini Na₂O berasal dari cairan natrium silikat dan dari NaOH. Perbedaan rasio molar SiO₂ terhadap Na₂O di dalam aktivator disebabkan karena jumlah cairan natrium silikat yang digunakan berbeda-beda.

Berdasarkan batasan-batasan tersebut, dibuat campuran

dengan komposisi sebagaimana tertera pada Tabel 3. Sampel A sampai F merupakan sampel pasta uji tekan, sedangkan sampel G sampai L merupakan sampel untuk uji ketahanan api.

TABEL 3. KOMPOSISI CAMPURAN PASTA GEOPOLYMER

Sampel	mol SiO ₂ : Na ₂ O	Perbandingan berat			komposisi larutan aktivator, %berat			Serat poli propilen, % volume
		Meta-kaolin	Larutan aktivator	Pasir	SiO ₂	Na ₂ O	H ₂ O	
A	0,50	100	122,3		10,3	21,4	68,3	
B	1,00	100	134,9		18,8	19,4	61,9	
C	1,25	100	141,2		22,4	18,5	59,1	
D	1,50	100	147,6		25,7	17,7	56,6	
E	1,75	100	153,9		28,8	17,0	54,2	
F	2,00	100	160,2		31,6	16,3	52,1	
G	0,50	100	122,3	30	10,3	21,4	68,3	1,5
H	1,00	100	134,9	30	18,8	19,4	61,9	1,5
I	1,25	100	141,2	30	22,4	18,5	59,1	1,5
J	1,50	100	147,6	30	25,7	17,7	56,6	1,5
K	1,75	100	153,9	30	28,8	17,0	54,2	1,5
L	2,00	100	160,2	30	31,6	16,3	52,1	1,5

Pada proses pencetakan, semakin tinggi rasio SiO₂/Na₂O, campuran semakin pekat sehingga *workability* turun. Sampel F dan sampel L dengan SiO₂/Na₂O = 2 atau konsentrasi SiO₂ sebesar 31,6% ternyata tidak mengeras walaupun sudah didiamkan selama 48 jam, sehingga tidak dilakukan uji tekan maupun uji ketahanan api. Meskipun tidak dilakukan pengujian setting time, namun dari pengamatan bisa dikatakan bahwa semakin tinggi konsentrasi SiO₂ maka semakin lama waktu yang dibutuhkan hingga pasta menjadi massa yang keras (*setting atau hardening*). Hal ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya [19].

Geopolymerisasi difahami sebagai suatu proses yang terdiri atas 4 langkah: (1) pelarutan Si dan Al dari padatan aluminosilikat di dalam larutan alkali; (2) pembentukan oligomer; (3) pembentukan polimer dari penggabungan oligomer-oligomer; (4) ikatan antara kerangka polimer dengan permukaan padatan yang aktif.

Pada proses pelarutan, OH⁻ di dalam aktivator memutuskan ikatan kovalen Si-O-Si dan Si-O-Al yang ada pada padatan aluminosilikat. Silikon dan aluminium yang larut dalam larutan alkali aktivator berbentuk gugus Si-OH dan Al-OH. Si-OH dan Al-OH kemudian berkondensasi membentuk gel. Gel satu dengan gel lain bergabung membentuk gel yang lebih besar atau polimer. Semakin banyak ketersediaan silika dan alumina yang terlarut maka semakin besar ukuran gel terbentuk sehingga derajat polimerisasi gel semakin besar [2].

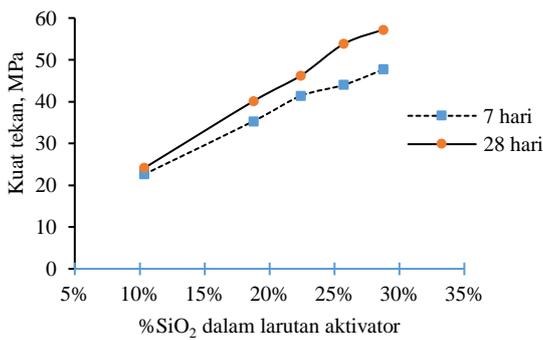
Sesuai dengan asas Le Chatelier yang menyatakan jika dalam suatu reaksi ditambahkan zat di ruas kiri maka reaksi mengalami pergeseran ke ruas kanan, maka untuk reaksi pelarutan yang ditunjukkan pada persamaan reaksi (1) dapat dikatakan: (a) semakin tinggi konsentrasi larutan NaOH, maka semakin banyak Si dan Al yang mampu dilarutkan dan (b) jika di dalam larutan sudah ada spesi Si, maka proses pelarutan Si berlangsung lebih lambat. Dalam sistem yang diteliti, semua sampel menggunakan larutan dengan konsentrasi NaOH yang sama yaitu H₂O/Na₂O = 11 (konstan), sehingga yang memberikan pengaruh pada proses pelarutan pada sistem yang diteliti bisa diasumsikan hanya perbedaan konsentrasi Si di dalam larutan aktivator. Semakin tinggi konsentrasi Si di dalam

aktivator memberikan hambatan yang semakin besar pula bagi proses pelarutan Si dari padatan aluminosilikat. Permukaan padatan yang mengalami pelarutan menjadi permukaan yang aktif dan siap berikatan, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan reaksi No. 6.

Pada kondisi yang ekstrim, hambatan itu cukup besar sehingga permukaan padatan yang aktif sangat sedikit sehingga ikatan antara polimer yang terbentuk pada fase larutan dengan permukaan aktif sangat lemah, akibatnya campuran sulit untuk mengeras (setting). Hal ini teramati pada sampel F dan L.

B. Hasil Uji Tekan dan Uji Ketahanan Api

Hasil uji tekan pasta geopolimer tercantum pada Gambar 2. Dari gambar tersebut tampak ada dua hal yang bisa digarisbawahi. Yang pertama, semakin tinggi konsentrasi SiO₂ di dalam larutan aktivator, maka kuat tekan semakin tinggi, baik untuk umur 7 maupun 28 hari. Yang kedua, kenaikan kekuatan geopolimer dari umur 7 hari menjadi 28 hari mengalami peningkatan sejalan dengan naiknya konsentrasi SiO₂.



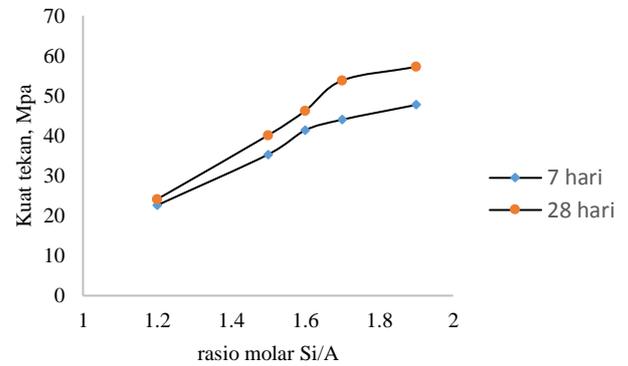
Gambar 3. Hubungan antara %SiO₂ di dalam larutan aktivator dengan kuat tekan pasta geopolimer (Na/Al =1; H₂O/Na₂O=11)

Kenaikan konsentrasi SiO₂ di dalam larutan aktivator berdampak pada ukuran oligomer yang lebih besar. Pada proses kondensasi, oligomer-oligomer tersebut bergabung menjadi polimer. Gabungan oligomer yang berukuran lebih besar menghasilkan polimer dengan derajat polimerisasi yang lebih tinggi. Secara umum, ikatan antar molekul yang berukuran besar lebih kuat dibandingkan molekul berukuran kecil [2]. Ikatan kimia yang lebih kuat berarti diperlukan energi yang lebih besar untuk memutuskannya. Implikasi dari prinsip ini adalah semakin tinggi derajat polimerisasi geopolimer, maka kuat tekan pasta geopolimer semakin kuat.

Kenaikan konsentrasi SiO₂ dalam larutan dalam sistem yang diteliti berkaitan dengan kenaikan rasio molar Si/Al. Sumber Al hanya berasal dari metakaolin sementara sistem menggunakan metakaolin yang sama sehingga Al yang digunakan pada semua sampel pada Tabel 3 mempunyai jumlah yang sama. Sebagai akibatnya, kenaikan konsentrasi SiO₂ berdampak pada kenaikan rasio molar Si/Al. Hasil perhitungan Si/Al tertera pada Tabel 4.

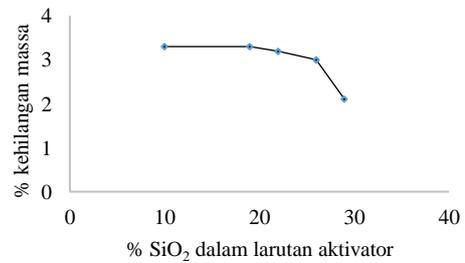
TABEL 4. NILAI Si/Al SAMPEL GEOPOLIMER

Sampel	Rasio molar Si/Al dalam geopolimer
A dan G	1,2
B dan H	1,5
C dan I	1,6
D dan J	1,7
E dan K	1,9
F dan L	2,0



Gambar 4. Hubungan antara rasio molar Si/Al dengan kuat tekan pasta geopolimer (Na/Al =1; H₂O/Na₂O=11)

Gambar Hasil uji ketahanan api tercantum pada Gambar 4. Pada gambar tersebut nampak bahwa semakin tinggi %SiO₂ di dalam aktivator maka semakin kecil berat sampel yang hilang karena pembakaran.



Gambar 5. Hubungan antara %SiO₂ dalam larutan aktivator dengan kehilangan berat pada uji ketahanan api

Baik sifat kekuatan mekanik (kuat tekan) maupun sifat termal (ketahanan api) geopolimer keduanya ditentukan oleh ikatan kimia di dalam struktur geopolimer. Hal ini juga ditunjukkan oleh sifat ketahanan api yang naik yakni persen massa hilang karena pembakaran semakin kecil.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari penelitian ini diambil kesimpulan:

1. Semakin tinggi konsentrasi SiO₂ di dalam larutan aktivator atau semakin tinggi rasio molar Si/Al pada geopolimer metakaolin maka semakin tinggi pula kuat tekan dan ketahanan api geopolimer.

- Peningkatan Si/Al pada geopolimer metakaolin dalam sistem yang diteliti melalui modifikasi larutan aktivator terbatas sampai nilai Si/Al=1,9 yaitu dicapai dengan menaikkan konsentrasi SiO₂ dalam larutan aktivator sampai 28,8%. Penambahan konsentrasi selanjutnya menimbulkan campuran tidak mengeras selama 48 jam dan *workability* buruk atau sulit dilakukan pencetakan.

B. Saran

Untuk mendapatkan geopolimer metakaolin dengan Si/Al yang lebih tinggi, maka langkah modifikasi aktivator sebagaimana dilakukan dalam penelitian ini bisa dikombinasikan dengan menggunakan penambahan bahan baku yang memiliki kadar silika lebih tinggi, misalnya abu sekam padi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada: Kepala dan Teknisi Laboratorium Kimia Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang memberikan fasilitas dalam pencetakan spesimen; Kepala dan Teknisi Bengkel Konstruksi Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya yang menyediakan fasilitas untuk kalsinasi kaolin, Kepala dan Teknisi Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil ITS yang memberikan fasilitas untuk pengujian tekan geopolimer; Ibu Dr. Eng. Januari Jaya Ekaputri ST, MT yang membantu menyediakan kaolin dari Belitung, PT Kasmaji yang menyediakan cairan natrium silikat, dan semua pihak yang membantu terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- F. Pacheco-Torgal, J. Castro-Gomes, and S. Jalali, "Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 7, pp. 1305–1314, 2008.
- M. Criado, A. Fernandez-Jimenez, A. G. de la Torre, M. A. G. Aranda, and A. Palomo, "An XRD study of the effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, pp. 671–679, 2007.
- P. Duxson, S. W. Mallicoat, G. C. Lukey, W. M. Kriven, and J. S. J. van Deventer, "The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 292, no. 1, pp. 8–20, 2007.
- P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, and J. S. J. van Deventer, "The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete,'" *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 12, pp. 1590–1597, 2007.
- J. Davidovits, "30 years of successes and failures in geopolimer applications. Market trends and potential breakthroughs," *Keynote Conf. Geopolymer Conf.*, pp. 1–16, 2002.
- J. J. Trochez, R. M. De Gutiérrez, J. Rivera, and S. A. Bernal, "Synthesis of Geopolymer from Spent FCC : Effect of SiO₂/Al₂O₃ and Na₂O/SiO₂ Molar Ratios," *Mater. Constr.*, vol. 65, no. 317, pp. 1–11, 2015.
- P. De Silva and K. Sagoe-Crensil, "The Role of Al₂O₃, SiO₂ and Na₂O on the Amorphous → Crystalline Phase Transformation in Geopolymer Systems," *J. Aust. Ceram. Soc. Vol.*, vol. 45, no. 1, pp. 63–71, 2009.
- M. Criado, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, "Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio. Part I: FTIR study," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 106, no. 1–3, pp. 180–191, 2007.
- A. S. De Vargas, D. C. C. Dal Molin, A. C. F. Vilela, F. J. D. Silva, B. Pavão, and H. Veit, "The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 6, pp. 653–660, 2011.
- M. A. Soleimani, R. Naghizadeh, A. R. Mirhabibi, and F. Golestanifard, "Effect of calcination temperature of the kaolin and molar Na₂O/SiO₂ activator ratio on physical and microstructural properties of metakaolin based geopolymers," *Iran. J. Mater. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 43–51, 2012.
- P. De Silva, K. Sagoe-Crensil, and V. Sirivivatnanon, "Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 4, pp. 512–518, 2007.
- G. Kovalchuk, A. Fernández-Jiménez, and A. Palomo, "Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II," *Fuel*, vol. 86, no. 3, pp. 315–322, 2007.
- M. Criado, A. Fernández-jiménez, and A. Palomo, "Alkali activation of fly ash . Part III : Effect of curing conditions on reaction and its graphical description," *Fuel*, vol. 89, no. 11, pp. 3185–3192, 2010.
- M. CRIADO, A. PALOMO, and A. FERNANDEZJIMENEZ, "Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products," *Fuel*, vol. 84, no. 16, pp. 2048–2054, 2005.
- F. U. A. Shaikh, "Effects of alkali solutions on corrosion durability of geopolimer concrete," vol. 2, no. 2, pp. 109–123, 2014.
- A. F. Æ. I. Garcá and A. Palomo, "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials," pp. 3055–3065, 2007.
- D. R. Tobergte and S. Curtis, "Experimental Evaluation of the Durability of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete in the Marine Environment," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- C. Panagiotopoulou, E. Kontori, T. Perraki, and G. Kakali, "Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2967–2973, 2007.
- P. De Silva and K. Sagoe-Crensil, "The Effect of Al₂O₃ and SiO₂ On Setting and Hardening of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O Geopolymer Systems," *J. Australia Ceram. Soc.*, vol. 1, pp. 39–46, 2008.
- P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, and J. S. J. Van Deventer, "Understanding the relationship between geopolimer composition, microstructure and mechanical properties," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 269, no. 1–3, pp. 47–58, 2005.

Halaman ini sengaja dikosongkan