

PENELITIAN RANCANGAN CAMPURAN BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH PLTU SURALAYA–BANTEN TERHADAP KUAT TEKAN DAN KUAT LENTUR

Harianto Hardjasaputra¹ dan Esteriana Ekawati²

^{1,2}*Program Studi Teknik Sipil, Univ. Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard, Tangerang, Banten
Email: hardja@yahoo.com*

Abstrak: The Earth Summit 1997 di Kyoto, Jepang, mendeklarasikan perlunya dilakukan tindakan nyata dan terukur untuk pengurangan emisi gas CO₂ sampai sebesar 21%, agar bumi kita terhindar dari pemanasan global yang membawa dampak terjadinya perubahan iklim di dunia ini. Dari hasil-hasil penelitian ternyata industri semen dan industri bahan bangunan yang berbasis semen di seluruh dunia berkontribusi sekitar 8-10 % dari keseluruhan emisi CO₂ di dunia ini. Angka ini cukup tinggi dan bila tidak dilakukan tindakan khusus akan terus meningkat seiring dengan sangat pesatnya pembangunan fisik di berbagai belahan dunia, yang memerlukan banyak bahan semen. Merujuk pada besarnya sumbangan industri semen terhadap total emisi CO₂, maka diperlukan inovasi untuk melakukan penelitian penggunaan bahan-bahan alternatif pengganti semen. Pada penelitian ini dilakukan studi untuk mengembangkan rancangan campuran beton geopolimer, yaitu beton yang berbasis non-semen. Beton geopolimer yang dikembangkan pada penelitian ini berbasis 100% *fly ash* yang khusus diambil dari limbah PLTU Suralaya–Banten. Dari hasil uji XRF dan SEM *fly ash* yang digunakan, peneliti melakukan studi berbagai rancangan campuran beton geopolimer dengan variasi 8M, 12M, dan 16M, dan variasi alkali/*fly ash* 0,45, 0,50, 0,55 dan 0,60 dengan rasio antara Na₂SiO₃ dan NaOH adalah 2. Studi perkembangan kuat tekan beton geopolimer terhadap waktu menunjukkan bahwa hasil rancangan campuran beton geopolimer tersebut dapat mencapai kuat tekan f_c' 50,27 MPa dan kuat lentur f_{cr} 7,66 MPa. Hasil menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis *fly ash* yang dihasilkan dapat digunakan sebagai beton struktural.

Kata kunci: beton geopolimer, kuat tekan, kuat lentur, *fly ash*

RESEARCH DESIGN OF GEOPOLIMER CONCRETE BASED ON PLTU SURALAYA-BANTEN FLY ASH ON COMPRESSIVE AND FLEXIBLE STRENGTH

Abstract: The Earth Summit 1997 in Kyoto, Japan, declared the need for real and measurable action to reduce CO₂ emissions by 21%. Thus the earth is protected from global warming that brings impacts of climate change in the world. Previous studies result in that cement and cement-based building materials industries around the world contribute approximately 8-10% of the total CO₂ emissions in the world. This number is slightly high and it will increase if special actions are not carried out along with very rapid development across the world, which requires a lot of cement material. Referring to the excessive contribution of the cement industry to total CO₂ emissions, therefore, innovation is needed in order to conduct research on the alternative materials use for cement replacement. This study is conducted to develop a mixture of geopolimer concrete design, namely non-cement based concrete. The geopolimer concrete developed in this research is based on 100% *fly ash* which is specially taken from Suralaya - Banten PLTU waste. From the results of XRF and SEM *fly ash* tests, a study conducted several various designs of mixed geopolimer concrete with variations of 8M, 12M, and 16M, and variations of alkali or *fly ash* of 0.45, 0.50, 0.55 and 0.60 with the ratio between Na₂SiO₃ and NaOH of 2. The study on the compressive strength development of geopolimer concrete towards time indicates that the design result of the geopolimer concrete mixture can achieve a compressive strength of f_c' 50.27 MPa and a flexible strength of f_{cr} 7.66 MPa. The result shows that the *fly ash* based geopolimer concrete produced can be used as structural concrete.

Keywords: geopolimer concrete, compressive strength, flexible strength, *fly ash*

PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material yang sering digunakan dalam dunia konstruksi. Penggunaan beton dalam konstruksi bangunan telah banyak mengalami penyempurnaan yang berhubungan dengan kekuatan, fungsi, umur, manfaat dan biaya dari suatu perencanaan. Namun, industri beton sering disorot oleh para pencinta lingkungan. Hal yang sering dikritisi adalah besarnya sumber daya alam seperti batu kapur, bahan bakar fosil, listrik dan gas alam, yang digunakan untuk memproduksi semen dan emisi gas karbon dioksida (CO₂) yang dilepaskan pada proses produksi semen. Untuk memproduksi 1 ton semen Portland membutuhkan sekitar 4 GJ energi dan melepaskan 1 ton CO₂ ke atmosfer (Mehta, 2001).

Produksi global dari semen setiap tahun meningkat seiring dan belum ada tanda untuk menurun. Peningkatan produksi semen ini berdampak pada peningkatan emisi CO₂ yang kemudian berpengaruh pada pemanasan global. The Earth Summit 1997 di Kyoto, Jepang, mendeklarasikan perlunya dilakukan tindakan nyata dan terukur untuk pengurangan emisi gas CO₂ sampai sebesar 21%, agar bumi kita terhindar dari pemanasan global yang membawa dampak terjadinya perubahan iklim di dunia ini. Dari hasil-hasil penelitian ternyata industri semen dan industri bahan bangunan yang berbasis semen di seluruh dunia berkontribusi sekitar 8-10 % dari keseluruhan emisi CO₂ di dunia ini. Persentasi ini cukup tinggi dan akan meningkat seiring dengan pesatnya pembangunan fisik di berbagai belahan dunia, terutama industri yang memerlukan banyak bahan semen.

Merujuk pada besarnya sumber daya dan energi yang dibutuhkan dan besarnya sumbangan industri semen terhadap total emisi CO₂ di dunia, maka diperlukan suatu bahan alternatif pengganti semen yang dalam proses pembuatannya memerlukan energi yang lebih sedikit dan ramah lingkungan. Alternatif pengganti semen ini dapat digunakan sebagian atau juga sepenuhnya.

Beton geopolimer adalah beton yang 100% tidak menggunakan semen. *Fly ash* adalah salah satu material yang sering digunakan untuk membuat binder dan ketersediannya banyak di seluruh dunia. *Fly ash* adalah limbah hasil pembakaran batu bara yang dikategorikan sebagai limbah bahan

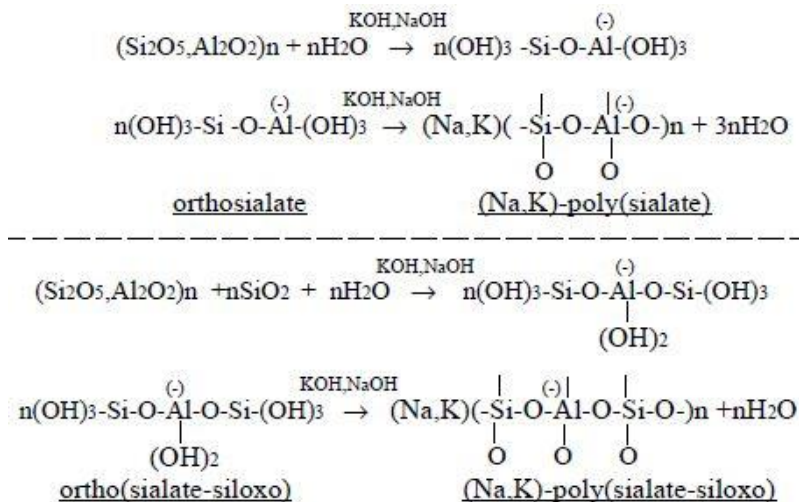
berbahaya dan beracun (B3) yang keberadaannya dapat mencemari lingkungan dan perlu dimanfaatkan. Penggunaan *fly ash* sebagai alternatif pengganti semen memberikan dampak positif karena mengurangi penggunaan semen, yang juga berarti mengurangi polusi CO₂ akibat produksi semen.

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah pengguna batu bara yang paling dominan, dibandingkan sektor industri lainnya seperti industri kertas, briket, tekstil, semen, besi dan baja. Berdasarkan data, kebutuhan batu bara PLTU Suralaya unit 1-8 setiap jam dibutuhkan 1.565 ton batu bara (Zulkarnain, 2016). Konsumsi batu bara PLTU Suralaya dapat mencapai 13.709.400 ton batu bara, dan dapat menghasilkan 685.470 ton/tahun abu batu bara (jika diasumsikan 5% dari total konsumsi batu bara). Jumlah tersebut terdiri dari 85-90% *fly ash* dan sisanya abu dasar. Untuk memanfaatkan limbah batu bara, PLTU Suralaya menjual abu batu bara ke industri-industri yang bergerak di bidang konstruksi, namun tingkat penggunaannya masih rendah.

Menimbang masih banyaknya limbah *fly ash* yang belum dimanfaatkan dan isu lingkungan yang diakibatkan oleh produksi semen, maka teknologi geopolimer menjadi salah satu pertimbangan yang cukup untuk aplikasi industri beton sebagai alternatif pengikat selain semen Portland. Penelitian ini dilakukan studi untuk mengembangkan rancangan campuran beton geopolimer berbasis *fly ash* yang dapat digunakan sebagai beton struktural.

GEOPOLIMER

Geopolimer adalah istilah yang menggambarkan sintesis bahan aluminosilikat, yang terbuat dari bahan baku, yang berpotensi untuk digunakan sebagai pengganti semen Portland dalam produksi beton struktural dan non-struktural (Austroads, 2016). Ada dua penyusun utama geopolimer, yaitu sumber material dan larutan alkali. Sumber material geopolimer berbasis alumina-silika harus kaya akan silika (Si) dan aluminium (Al). Pemilihan material tersebut bergantung pada faktor seperti ketersediaan, biaya, jenis aplikasi, dan permintaan pengguna. Sementara itu, larutan alkali biasanya berbasis sodium dan potasium. Alkali yang biasanya paling umum digunakan dalam geopolimerisasi adalah kombinasi natrium hidroksida (NaOH) atau kalium



Gambar 1. Proses Geopolimerisasi di dalam Reaksi Oksida Aluminosilikat (Davidovits, 1991)

hidroksida (KOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) atau kalium silikat. Geopolimer dibuat dengan mencampurkan material aluminosilikat, seperti *fly ash*, slag, sekam padi, kaolin, lumpur merah, meta kaolin, dan bahan lainnya, dengan larutan alkali sebagai *reactive agent*. Unsur-unsur kimia dalam material aluminosilikat bila dicampur dengan larutan alkali akan menghasilkan pasta geopolimer dengan kekuatan yang mengikat.

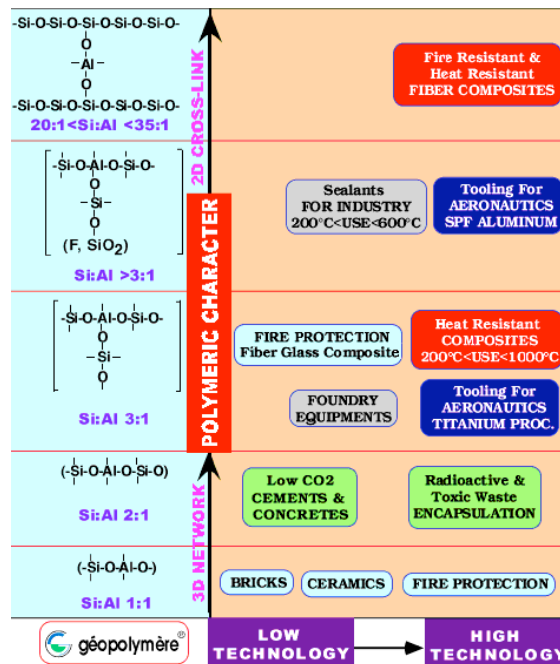
Tidak seperti beton konvensional yang mengalami proses hidrasi, beton geopolimer mengalami proses geopolimerisasi, yaitu proses menggabungkan banyak molekul kecil (oligomer) ke dalam jaringan terikat kovalen. Proses ini diawali dengan *alkalinasi*, dengan rantai utama silika dan aluminium bertransformasi dengan medium alkali. Selanjutnya, dengan medium alkali tersebut molekul besar terdepolimerisasi menjadi molekul yang kecil. Depolimerisasi adalah proses memisahkan senyawa makromolekuler menjadi senyawa yang lebih sederhana. Kemudian, terjadi pembentukan gel dari molekul kecil (oligo-sialates) akibat sebelumnya ada medium air sehingga tidak mengalami polimerisasi. Setelah terbentuk gel, terjadi proses polikondensasi, yaitu monomer-monomer bergabung membentuk suatu molekul yang lebih besar. Molekul-molekul tersebut membentuk suatu jaringan (*reticulation, networking*) dan akhirnya membentuk geopolimer yang solid (*geopolymer solidification*) (Geopolymer Institute, 2016).

Proses geopolimerisasi beton geopolimer dapat dilihat pada Gambar 1. Pada persamaan tersebut terlihat bahwa pada reaksi pembentukan senyawa geopolimer juga menghasilkan air. Air tersebut akan dikeluarkan selama proses *curing* dan saat periode pengeringan, karena ini berguna untuk *performance* geopolimer. Air dalam campuran geopolimer tidak berperan dalam reaksi kimia yang terjadi; air menyediakan *workability* kepada campuran selama *handling*.

Banyak peneliti telah melakukan studi pembuatan beton geopolimer dengan proporsi campuran beton yang berbeda dan menghasilkan kekuatan beton yang bermacam-macam pula. Dari hasil studi literatur, ada beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan beton geopolimer yaitu sebagai berikut:

- Karakteristik *fly ash*. *Fly ash* kalsium tinggi (HCFA) memiliki masalah pada *setting time* yang lebih cepat (Hanjitsuwan et al., 2014)
- Konsentrasi Alkali Hidroksida. Hardjito dan Rangan (2005) melakukan penelitian mengenai campuran beton dan menyimpulkan bahwa semakin tinggi konsentrasi molaritas sodium hidroksida, maka semakin tinggi kuat tekan beton geopolimer. Di lain pihak, Cheng dan Chiu (2003) melakukan penelitian menggunakan 10 M potassium hidroksida (KOH) dan menunjukkan kekuatan tekan tertinggi 60 MPa, tapi kekuatan menurun pada peningkatan konsentrasi KOH dari 10 M ke 15 M. Hal ini mungkin karena kelebihan ion K^+ di dalam rantai utama.

$$\frac{W}{Gs} = \frac{\text{Air dalam NaOH} + \text{Air dalam Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Free Water}}{\text{NaOH solid} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 \text{ solid} + \text{fly ash}} \quad (1)$$



Gambar 2. Tipe-tipe Geopolimer dan Aplikasinya (Davidovits, 2002)

- c. Rasio sodium silikat terhadap sodium hidroksida. Meningkatnya rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ memperlambat proses geopolimerisasi dan menghasilkan panas lebih kecil (Kumar et al., 2016).
- d. Rasio Si/Al. Davidovits telah mengusulkan batas sintesis tertentu untuk pembentukan produk geopolimer yang kuat. Jika kandungan Al_2O_3 meningkat, dengan kata lain rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ rendah, maka menghasilkan kuat tekan beton geopolimer yang rendah. Di bawah ini diberikan rasio Si/Al beserta aplikasi dari geopolimer di berbagai bidang.
- e. Suhu dan waktu curing. Pada suhu ruangan, reaksi *fly ash* sangat lambat sehingga reaksi dapat dipercepat dengan meningkatkan suhu.

Water/geopolimer solid. Efek rasio water/geopolimer solid pada geopolimer sama dengan *water/cement* beton konvensional, yaitu mempengaruhi kekuatan beton. Water/geopolimer solid dapat dihitung dengan:

STUDI EXPERIMENTAL

Persiapan material

- a. Agregat
 - Agregat ini didapat dari agen yang menjual bahan bangunan di Tangerang. Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah

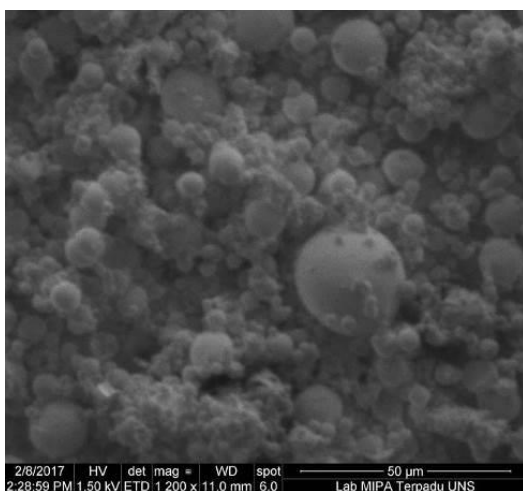
berukuran maksimal 10 mm dengan berat jenis SSD 2,57. Agregat halus yang digunakan adalah pasir bangka yang lolos ayakan No. 30 (600 μm), dengan berat jenis SSD 2,50.



Gambar 3. Pasir Bangka dan Kerikil

b. Fly ash

Fly ash yang digunakan untuk pembuatan pasta geopolimer pada penelitian ini berasal dari PLTU Suralaya, Banten. Fly ash yang digunakan mengandung 38,79% SiO₂, 21,84% Fe₂O₃, 18,51% Al₂O₃, dan 12,23% CaO, yang dianalisis menggunakan XRF. Dari hasil SEM dapat dilihat bahwa ukuran fly ash umumnya bulat (spherical). Fly ash yang digunakan lolos saringan No. 200 (0,075 mm).



Gambar 5. Gambar SEM Fly Ash dengan Perbesaran 1200x

Tabel 1. Komposisi Kimia Fly ash PLTU Suralaya

Formula	Konsentrasi
SiO ₂	38,79%
Fe ₂ O ₃	21,84%
Al ₂ O ₃	18,51%
CaO	12,23%
SO ₃	2,41%
TiO ₂	1,76%
K ₂ O	1,66%
P ₂ O ₅	0,93%
Cl	0,67%
MnO	0,35%
SrO	0,31%
ZrO ₂	0,13%
Nd ₂ O ₃	0,10%
ZnO	0,07%
BaO	0,05%
SnO ₂	0,03%
NiO	0,02%

c. Alkali aktivator.

Adapun jenis aktivator yang digunakan dalam penelitian ini adalah sodium silikat dan sodium hidroksida. Sodium silikat yang digunakan adalah waterglass dengan 38,28% SiO₂ dan 16,36% Na₂O. Sodium hidroksida yang digunakan adalah NaOH pellet 99% pure analyse yang diperoleh dari toko kimia. Untuk larutan NaOH, NaOH pellet diaduk dicampurkan dengan air dan diaduk hingga seluruh pellet larut. Larutan didiamkan selama 24 jam sebelum digunakan.



a)



b)

Gambar 7. a) NaOH, b) Natrium Silikat

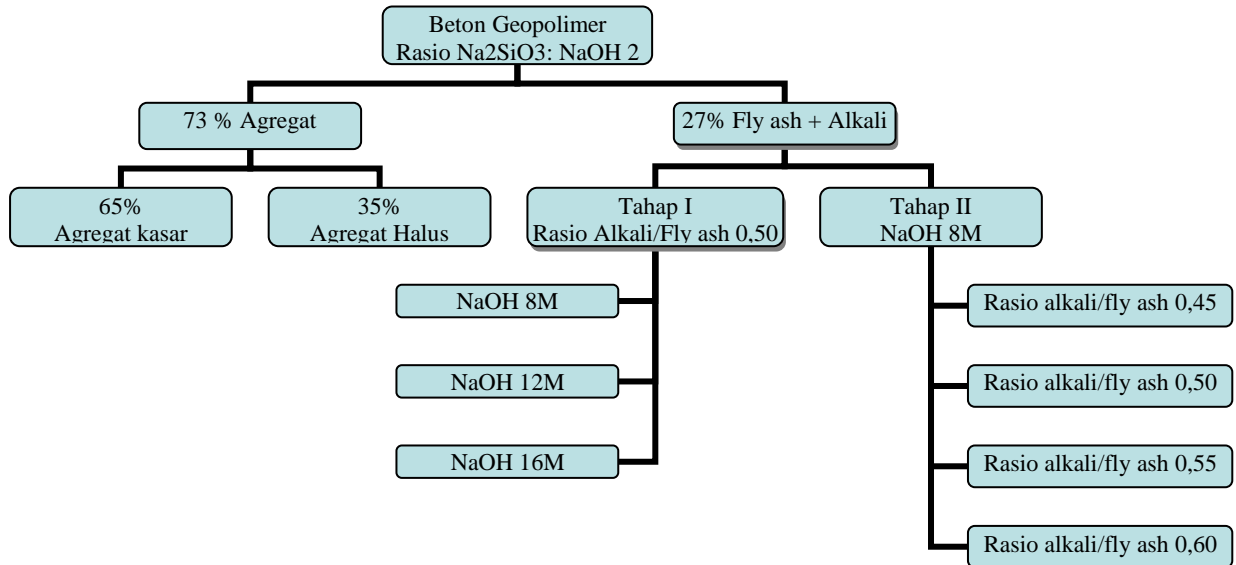
Rancangan campuran

Untuk seluruh mix design, beton geopolimer terdiri atas 73% agregat dan 27% semen geopolimer. Rasio perbandingan berat Na₂SiO₃ dan NaOH adalah 2. Penelitian ini dilakukan dalam 2 tahap; Tahap I variasi konsentrasi NaOH (8M, 12M dan 16M) untuk mengetahui bagaimana pengaruh perbedaan konsentrasi dalam campuran dan Tahap II variasi rasio larutan alkali/fly ash (0,45, 0,50, 0,55 dan 0,50) untuk mengetahui bagaimana pengaruh rasio alkali/fly ash dengan konsentrasi yang sama dalam campuran terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer.

Pada Tahap I, rasio alkali/fly ash adalah 0,50. Hasil yang optimal pada Tahap I

digunakan untuk dikembangkan pada Tahap II, dan konsentrasi 8M digunakan untuk seluruh *mix design* pada Tahap II. Di Tahap II, rasio alkali/*fly ash* 0,50 (8M) digunakan sebagai acuan perbandingan pada tahap II. Berikut adalah proporsi *mix design* beton geopolimer untuk Tahap I dan Tahap II.

Dari *mix design* tersebut, benda uji yang dibuat berjumlah 51 benda uji dengan macam variasi seperti pada Tabel 2. Benda uji berbentuk silinder berukuran 100 x 200 mm dan balok berukuran 60 x 60 x 300 mm.



Gambar 10. Rancangan Campuran Beton Geopolimer

Tabel 2. Proporsi Campuran Beton Geopolimer Tahap I dan Tahap II

Mix design	Agregat		Fly ash	Na ₂ SiO ₃	NaOH
	Kasar	Halus			
Tahap I-Variasi konsentrasi NaOH					
GC1-8M	1091	588	414	138	69
GC2-12M	1091	588	414	138	69
GC3-16M	1091	588	414	138	69
Tahap II – Variasi rasio alkali/ <i>fly ash</i>					
GC1-AF0,45	1091	588	428,3	128,5	64,2
GC1-AF0,55	1091	588	400,6	146,9	73,5
GC1-AF0,60	1091	588	388,125	155,25	77,625

Tabel 3. Jumlah Benda Uji

Mix design	Benda Uji					
	Kuat Tekan				Kuat Lentur	
	3	7	14	28	7	28
GC1-8M	1	1	1	1	2	2
GC2-12M	1	1	1	1	2	2
GC3-16M	1	1	1	1	2	2
GC1-AF0,45	1	1	1	2	2	2
GC1-AF0,55	1	1	1	2	2	2
GC1-AF0,60	1	1	1	2	2	2

Prosedur pembuatan benda uji

Tahap pembuatan benda uji adalah sebagai berikut:

- a. Siapkan agregat dalam keadaan SSD dengan merendam agregat kasar dan halus 24 jam dan diangin-anginkan hingga mencapai kondisi SSD. Siapkan *fly ash* yang dibutuhkan juga.



Gambar 12. Bahan yang dipersiapkan 24 jam sebelum pengecoran

- b. Pembuatan larutan NaOH. Presentase kuantitas NaOH solid didapatkan dari ICI Technical Report, yang berdasarkan data yang tersedia pada Perry's Handbook for Chemical Engineer. Tabel di bawah ini merupakan hasil estimasi dari kuantitas air dan NaOH solid. Kemudian larutan tersebut dicampur dengan Na_2SiO_3 dan aduk hingga tercampur sempurna. Diamkan larutan alkali tersebut selama 24 jam pada suhu ruang.



Gambar 13. Proses Pelarutan NaOH

- c. Beton geopolimer dibuat dalam suhu ruangan. Pertama, masukkan abu terbang dan larutan alkali ke dalam mixer, kemudian campur sampai 5 menit. Setelah abu terbang dan larutan alkali tercampur rata, masukkan agregat halus dan kasar dan campur lagi selama 7-10 menit. Pada penelitian ini kecepatan pengaduk adalah 18,50 rpm dan drum 30 rpm.



(a)



(b)

Gambar 14. a) Semen Geopolimer, b) *Fresh Fly Ash Geopolimer Concrete*

Kemudian dilakukan *flow test* untuk mengetahui *workability* dari campuran beton. Setelah itu, adukan beton dimasukkan ke dalam cetakan dan ditumbuk 20 kali setiap kelipatan 1/3 dari tinggi cetakan. Setelah penuh, benda uji digetarkan di meja getar selama 10 detik. Lalu, ratakan permukaan benda uji menggunakan sendok semen.

- d. Benda uji oven dikeluarkan, didinginkan, dan dibuka cetakannya dan diletakkan pada suhu ruangan sampai tiba hari pengujian.

Pengujian benda uji

- a. Uji kuat tekan.
Alat yang digunakan untuk pengujian ini adalah *concrete compression tester* berkapasitas 2500kN. Benda uji berbentuk silinder diuji sesuai dengan ASTM C39.
- b. Uji kuat lentur
Alat yang digunakan untuk pengujian ini adalah *universal testing machine* berkapasitas 50 kN. Benda uji berbentuk balok diuji dengan memberi beban terpusat sesuai dengan SNI 03-4154-1996.
- c. Tutup benda uji dengan plastik lalu masukkan benda uji ke dalam oven bersuhu 60°C selama 24 jam.

Tabel 4. Persentase Kuantitas NaOH Solid dan Air

Molaritas, M mol/l	<i>untuk preparasi 1 kg SHS</i>			<i>Konsentrasi SHS</i>	
	<i>SH Solids, gr</i>	<i>Air, gr</i>	<i>SHS,gr</i>	<i>Ws, mass/mass</i>	<i>%</i>
8	255	745	1000	2,55	25,5
12	354	646	1000	3,54	35,4
16	443	557	1000	4,43	44,3



Gambar 18. Flow test Beton Geopolimer



(a)

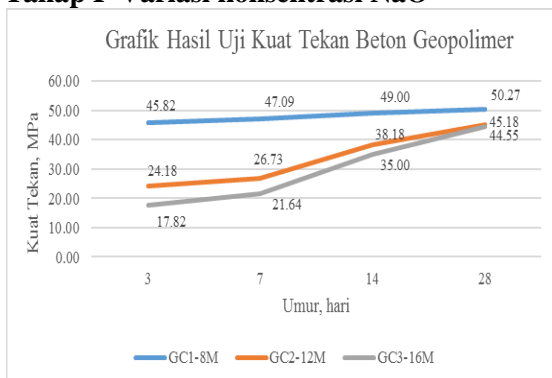


(b)

Gambar 19. Pengujian a) Kuat Tekan b) Kuat Lentur

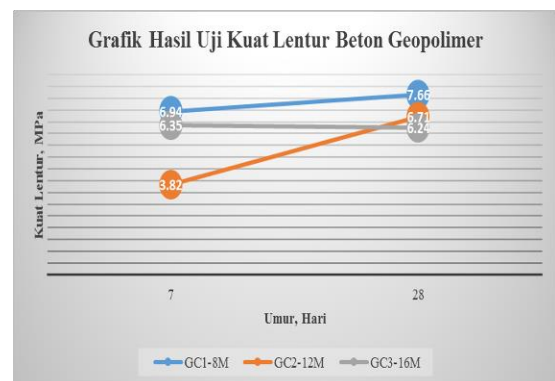
KUAT TEKAN DAN KUAT LENTUR BETON GEOPOLIMER

Tahap I–Variasi konsentrasi NaO



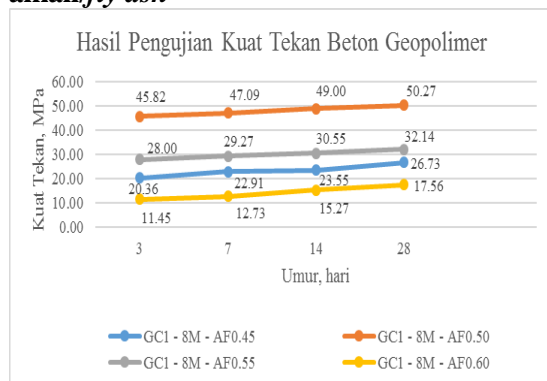
Gambar 21. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan pada Molaritas 8M, 12M, dan 16M

Catatan: Bahan uji kuat lentur GC2-12M mengalami tekanan/kontak sebelum uji lentur dimulai

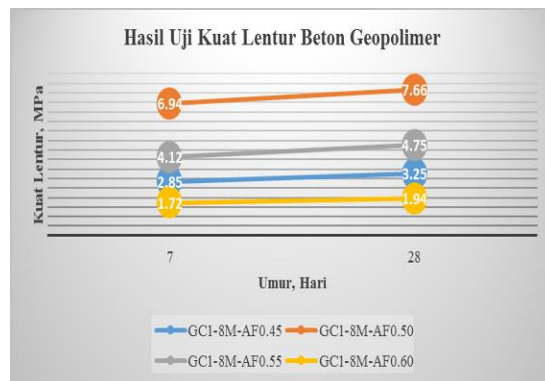


Gambar 24. Grafik Hasil Uji Kuat Lentur pada Molaritas 8M, 12M dan 16M

Tahap II – Variasi konsentrasi rasio alkali/fly ash



Gambar 25. Grafik Hasil Uji Tekan pada Rasio Alkali/Fly Ash 0,45, 0,50, 0,55 dan 0,60



Gambar 27. Grafik Hasil Uji Lentur pada Rasio Alkali/Fly Ash 0,45, 0,50, 0,55 dan 0,60

Tabel 5. Hasil Uji Kuat Lentur terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Tahap I

Mix design	Kuat Tekan, MPa	Kuat Lentur, MPa	Keterangan
GC1-8M	50,27	7,66	15,23%
GC2-12M	45,18	6,71	14,86%
GC3-16M	44,15	6,24	14,02%

Tabel 6. Hasil Uji Kuat Lentur terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Tahap II

Mix design	Kuat Tekan, MPa	Kuat Lentur, MPa	Keterangan
GC1-8M-AF0,45	26,73	3,25	12,16%
GC1-8M-AF0,50	50,27	7,66	15,23%
GC1-8M-AF0,55	32,14	4,75	14,78%
GC1-8M-AF0,60	17,56	1,94	11,05%

SIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

a. Pada Tahap I:

- Semakin tinggi molaritas yang digunakan dalam campuran, semakin rendah kuat tekan beton geopolimer.
- Konsentrasi NaOH yang tinggi memperlambat *setting time* beton sehingga beton geopolimer dengan konsentrasi yang lebih rendah mengalami waktu pengerasan lebih cepat. Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa pada umur tiga hari beton geopolimer GC1-8M memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton geopolimer dengan

konsentrasi 12 M dan 16 M. GC1-8M mengeras secara cepat dalam waktu yang singkat (pada hari ke-3), namun dalam perkembangannya kuat tekan beton geopolimer mengalami kenaikan kuat tekan beton yang lambat. Hal ini bisa disebabkan karena pada saat proses geopolimerisasi, larutan alkali dengan konsentrasi lebih rendah mengikat silika dan alumina lebih cepat dan proses geopolimerisasi terjadi lebih awal. Sementara itu, pada beton geopolimer GC2-12M dan GC3-16M, *setting time* lebih lama sehingga proses pengerasannya lebih lambat dan terjadi lonjakan kuat tekan, walaupun pada akhirnya tetap

- memberikan kuat tekan yang cukup tinggi. Bertambahnya konsentrasi NaOH dapat memperlambat *setting time* pada beton dengan membatasi *leaching* dari kalsium sehingga proses geopolimerisasi terjadi secara normal (Hanjitsuwan et al. 2014).
- b. Pada Tahap II: Penambahan rasio alkali/*fly ash* pada beton geopolimer dengan konsentrasi yang sama dapat menurunkan kuat tekan beton. Kadar air dalam beton akan semakin bertambah dan medium alkali untuk mengikat unsur-unsur silika alumina lebih sedikit, sehingga kekuatan beton semakin menurun seiring penambahan rasio alkali/*fly ash*.
 - c. Hasil uji kuat lentur terhadap kuat tekan Dari hasil tersebut presentase kuat lentur terhadap kuat tekan beton pada Tahap I adalah antara 14,02-15,23%. Jika dibandingkan dengan kuat tarik beton OPC, yaitu $f_r = 0,75\sqrt{f_c'}$ dan $f_r = 0,50\sqrt{f_c'}$, maka persentase kuat lentur terhadap kuat tekan pada beton geopolimer menjadi lebih besar. Diambil hasil yang optimal $f_c' = 50,27$ MPa, $f_r = 0,75\sqrt{f_c'} = 0,75\sqrt{50,27} = 5,32$ MPa dan $f_r = 0,50\sqrt{f_c'} = 0,50\sqrt{50,27} = 3,54$ MPa.
 - d. Dari hasil penelitian beton geopolimer dengan menggunakan abu terbang PLTU Suralaya ini, didapatkan *mix design* yang paling optimal, yaitu GC1–8M, rasio alkali/*fly ash* 0,50, dengan kuat tekan 50,27 MPa dan kuat lentur 7,66 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa beton geopolimer dapat digunakan sebagai beton struktural.
- Geopolymer Institute. (2016). Webinar Spring 2016: Geopolymer We Workshop. Apr 19–20.
- Hanjitsuwan, S., Hunpratub, S., Thongbai, P., Maensiri, S., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). Effects of NaOH concentrations on physical and electrical properties of high calcium *fly ash* geopolymer paste, 45, 9–14.
- Hardjito, D., and Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. Research report GC*.
- Kumar, S., Yankwa Djobo, J., Kumar, A., and Kumar, S. (2016). Geopolymerization behavior of fine iron-rich fraction of brown fly ash. *Journal of Building Engineering*, 8, 172–178.
- Mehta, P. K. (2001). Reducing the environmental impact of concrete. *Concrete International*, (October), 61–66.
- Zulkarnain, R. (2016). *Aspek Hukum Pengelolaan Limbah Batu Bara Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Suralaya Unit 1 Sampai 8 Merak, Cilegon, Banten*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- Austrroads. (2016). *Specification and Use of Geopolymer Concrete in the Manufacture of Structural and Non-structural Components Review of Literature*. Sydney: Austrroads Ltd.
- Cheng, T. W., and Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16(3), 205–210.
- Davidovits, J. (1991). "Geopolymers-Inorganic polymeric new materials". *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656.
- Davidovits, J. (2002). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs. In *Geopolymer 2002 Conference* (pp. 1–16). Melbourne.