

POROSITAS BINDER GEOPOLIMER DENGAN PROPORSI CAMPURAN FLY ASH PAITON DAN LIMBAH TJIWI KIMIA MENGGUNAKAN AKTIVATOR NaOH

Srie Subekti

Program Diploma III Teknik Sipil FTSP ITS

email: subektisrie@gmail.com

ABSTRAK

Geopolimer merupakan suatu bahan alam anorganik yang pembuatannya melalui proses polimerisasi. Bahan dasar utama dalam pembuatannya adalah *fly ash* yang banyak mengandung unsur silika dan aluminium. Untuk melarutkan unsur ini serta memungkinkan terjadinya reaksi kimiawi digunakan larutan NaOH sebagai aktivatornya. Perbandingan massa campuran antara *fly ash* Paiton dengan limbah Tjiwi Kimia adalah 0% : 100%, 20% : 80%, 40% : 60%, 60% : 40%, 80% : 20%, 100% : 0%. Dengan menggunakan NaOH molaritas sebesar 10M dan 14M untuk perbandingan massa larutan antara $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$ adalah 0,5 dan 1,5. Benda uji berupa binder berdiameter 25mm dan tinggi 50mm. Dan akan dilakukan pengujian porositas pada umur 56 hari. Sehingga didapatkan kuat tekan optimal pada komposisi D4 (molaritas 14 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%) mempunyai porositas tertutup sebesar 2,44.

Kata kunci: aktivator, fly ash, geopolimer, kuat tekan.

PENDAHULUAN

Akhir-akhir ini dampak emisi gas karbondioksida yang dihasilkan pada proses produksi semen. Dalam produksi satu ton semen Portland, akan dihasilkan sekitar satu ton gas karbondioksida yang dilepas ke atmosfer. Karbondioksida yang dilepas ke atmosfer dalam jumlah yang banyak akan menyebabkan efek rumah kaca dan ini merupakan salah satu penyebab pemanasan global atau yang biasa disebut *global warming*. Dari proses pembuatan semen akan terjadi penguapan akibat pembakaran yang menghasilkan bahan residu (sisa) yang tak larut dan bisa membahayakan lingkungan. Karena itu dilakukan percobaan untuk mengganti penggunaan semen dengan *fly ash*. *Fly ash* sendiri merupakan limbah pembakaran batu bara dalam dunia industri. Beton yang menggunakan *fly ash* seabagai bahan pengganti semen disebut beton *geopolymer*. Pemakaian beton *geopolymer* dapat mereduksi hingga 80% karbondioksida yang dihasilkan dari proses pembuatan semen biasa (*Geopolymer institute, 1996*).

TINJAUAN PUSTAKA

Umum

Beton geopolimer diperkenalkan sekitar 20 tahun lalu oleh seorang ilmuwan Perancis, Prof. Joseph Davidovits, yaitu sebagai suatu jenis beton baru yang 100% tidak menggunakan semen. Penggunaan *fly ash* sepenuhnya sebagai pengganti semen lewat proses yang disebut polimerisasi anorganik (*geopolimer*). Maka dari itu saat ini di berbagai universitas dan sejumlah lembaga melakukan riset.

Geopolimer

Geopolimer adalah suatu bahan alam nonorganik yang pembuatannya melalui proses polimerisasi. Hampir semua bahan buangan industri yang mengandung unsur-unsur silika dan alumina bisa dibuat menjadi semen *geopolimer*.

Terdapat beberapa kelebihan beton geopolimer jika dibandingkan dengan beton konvensional antara lain:

- Menurut František Škvára (2005), *geopolimer* yang berasal dari *fly ash* lebih tahan terhadap korosi larutan garam, sangat kuat, tahan terhadap pembekuan, dan tahan terhadap pemanasan sampai 600 °C.

- b. Beton *geopolimer* relatif tidak mengalami penyusutan seperti beton dari semen *Portland*. Karena ketahanan semen *geopolimer* terhadap lingkungan asam disebabkan terbentuknya lapisan kristal *gypsum* di dalam lapisan yang terkorosi (Ali Allahverdi, 2004).
- c. Pembuatan *geopolimer* juga tidak menghasilkan emisi gas CO₂ seperti pada pembuatan semen *Portland* (Malhotra, 1999).

METODE

Uraian Umum

Suatu penelitian mempunyai urutan kerja yang sangat penting untuk diperhatikan dengan teliti. Hal ini dimaksudkan agar proses penelitian dapat berjalan dengan baik sehingga akan diperoleh hasil yang diharapkan sesuai dengan tujuan penelitian. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan manfaat dari *fly ash* Paiton dan limbah Tjiwi Kimia dalam pembuatan pasta *geopolimer*. Dalam penelitian ini, saya mencoba mencari komposisi *fly ash* Paiton, limbah Tjiwi Kimia, dan molaritas larutan sodium hidroksida yang terbaik untuk menghasilkan binder *geopolimer* dengan efektifitas dan kualitas yang optimal.

Dalam pelaksanaan penelitian pada *Binder Geopolimer* Berbahan Dasar *Fly Ash* dan Limbah Tjiwi Kimia Di Tinjau Terhadap porositas pada binder terdapat beberapa tahapan pelaksanaan yang harus dilakukan agar mendapatkan hasil yang diharapkan. Urutan kerja atau metodologi yang dilakukan meliputi studi pustaka, persiapan bahan, mix desain campuran, pembuatan binder, perawatan (*curing*), pengujian binder yang meliputi tes *setting time*, tes porositas, tes *X-Ray Diffraction*, analisa data dan kesimpulan.

Studi Pustaka

Studi Pustaka dilakukan dengan mendalami materi yang relevan dengan penelitian, meliputi mengumpulkan data, mempelajari berbagai buku teks, peraturan dan standar nasional maupun internasional, pedoman masalah metode spesifikasi dan tata cara pelaksanaan penelitian.

Diantaranya membahas masalah:

- a. *Geopolimer*

- b. Material abu terbang (*fly ash*)
 c. Alkali Aktivator
 d. *Mix desain binder geopolimer*
 e. Beberapa uji tes terhadap benda uji *binder*

Persiapan Bahan

Di dalam pembuatan *binder geopolimer* dipakai bahan dasar *fly ash* (PLTU Paiton) dan limbah Tjiwi Kimia dengan menggunakan alkali aktivator larutan Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat (Na₂SiO₃).

Fly Ash dan Limbah Tjiwi Kimia

Fly ash yang paling baik untuk dijadikan bahan dasar pembuatan *binder geopolimer* adalah *fly ash* kelas F (Hardjito, 2005). Dalam penelitian ini digunakan *fly ash* yang berasal dari PLTU Paiton Probolinggo, Jawa Timur yang berasal dari sisa pembakaran batu bara.

Sedangkan limbah Tjiwi Kimia berasal dari abu terbang PT. Tjiwi Kimia yang didistribusikan ke PT. Varia Usaha Beton. Oleh karena itu *fly ash* ini harus diuji terlebih komposisi kimianya untuk menentukan apakah *fly ash* tersebut termasuk dalam kelas F atau kelas C (ASTM C 618-94a).

Air Aquades

Air ini didapatkan di toko-toko bahan kimia, dengan kadar kemurnian 100%.

Alkali Aktivator

Jenis aktivator yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat (Na₂SiO₃). Larutan Sodium Hidroksida (NaOH) yang digunakan adalah Larutan NaOH 10M dan 14M.

- Sodium Hidroksida
 Sodium hidroksida berfungsi sebagai aktivator dalam reaksi polimerisasi, sedangkan sodium silikat sebagai katalisator untuk mempercepat pengikatan silika dan oksida alumina pada *fly ash*.
 Sodium hidroksida dijual di pasaran berupa serpihan, oleh karena itu harus dijadikan larutan terlebih dahulu dengan molaritas 10M dan 14M. Larutan harus dibuat sehari sebelum pemakaian dan didiamkan paling tidak selama 24 jam

(Hardjito, 2004). Pembuatan larutan tersebut dilakukan di Laboratorium Beton Diploma Teknik Sipil FTSP-ITS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Kimia Material Geopolimer

Bahan-bahan untuk mensintesis geopolimer dalam penelitian ini meliputi *fly ash* yang diperoleh dari PLTU Paiton, Probolinggo dan PT. Tjiwi Kimia, Mojokerto.

Komposisi Kimia *Fly Ash* Paiton, Probolinggo

Sebelum digunakan, *fly ash* harus diuji terlebih dahulu komposisi kimia yang terkandung di dalamnya. Tabel 4.1 akan menunjukkan komposisi kimia yang dimiliki oleh *fly ash* Paiton tersebut. Hasil analisis tersebut dinyatakan dalam bentuk senyawa oksida yang dinyatakan dalam %. Kandungan kimia yang ada dalam *fly ash* tergantung pada asal batubara dan proses pembakarannya. Apabila asal batubara sama tapi proses pembakarannya berbeda, maka *fly ash* yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut akan mempunyai komposisi kimia yang berbeda pula begitu sebaliknya. *Fly ash* yang diperoleh dari satu tempat yang sama belum tentu menghasilkan *fly ash* dengan komposisi yang sama pula setiap kali produksi (Fansuri, 2007).

Tabel 1. Komposisi Kimia *Fly Ash* Paiton (% massa)

No.	Zat Penyusun	% Massa
1.	SiO ₂	46,00
2.	CaO	6,79
3.	MgO	11,63
4.	Fe ₂ O ₃	10,11
5.	Na ₂ O	2,15
6.	SO ₃	2,77
7.	Al ₂ O ₃	6,35
8.	H ₂ O	0,12
9.	LOI	0,40

Sumber: Laboratorium Teknik Lingkungan ITS, 2010

Dari Tabel 1, dapat disimpulkan *fly ash* Paiton termasuk *fly ash* kelas F karena kadar kapur (CaO) yang terkandung di dalamnya kurang dari 10% (ASTM C 618-94a).

Secara fisik, *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 1. *Fly Ash* yang Digunakan dalam Penelitian

Komposisi Kimia Limbah Tjiwi Kimia, Mojokerto

Untuk hasil analisis komposisi kimia limbah Tjiwi Kimia dinyatakan dalam bentuk senyawa oksida yang meliputi beberapa parameter yang dinyatakan dalam %. Tabel 2 menunjukkan komposisi kimia yang dimiliki limbah Tjiwi Kimia tersebut.

Tabel 2. Komposisi Kimia Limbah Tjiwi Kimia (% massa)

No.	Zat Penyusun	% Massa
1.	SiO ₂	73,21
2.	Al ₂ O ₃	2,15
3.	Fe ₂ O ₃	5,20
4.	CaO	6,72
5.	MgO	4,66
6.	Na ₂ O	0,75
7.	K ₂ O	0,27
8.	SO ₃	0,26
9.	H ₂ O	1,54
10.	LOI	4,69

Sumber: Laboratorium Teknik Lingkungan ITS, 2010

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dari komposisi kimia *fly ash* yaitu kandungan silika, alumina dan kalsium oksida. Berdasarkan klasifikasi *fly ash* menjadi kelas C dan F (ASTM C 618-94a), maka *fly ash* dengan kadar CaO lebih dari 10% diklasifikasikan sebagai *fly ash* kelas C, sedangkan *fly ash* dengan kadar CaO kurang dari 10% diklasifikasikan sebagai *fly ash* kelas F. Tabel 4.2 menunjukkan banyaknya CaO yang 43 terkandung dalam limbah Tjiwi Kimia sebesar 6,72%, sehingga digolongkan dalam *fly ash* kelas F.

Adanya CaO berpengaruh cukup baik untuk pengerasan awal karena CaO dapat membantu reaksi hidrasi pada *geopolimer*

(Van Deventer et all, 2006), tetapi jika terlalu banyak (lebih dari 10%) maka dapat menyebabkan geopolimer menjadi mudah retak. Kereaktifan *fly ash* sebagai sumber Si dan Al penting untuk diperhatikan karena tidak semua Si dan Al pada *fly ash* dapat larut sempurna dalam larutan alkalin pada saat pencampuran. Hanya Si dan Al dalam fasa amorf yang lebih mudah melarut dalam kondisi alkalin (Xu, 2002).

Secara fisik limbah Tjiwi Kimia yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Limbah Tjiwi Kimia, Mojokerto

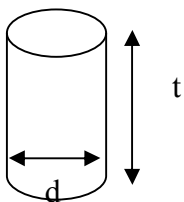
Perhitungan Untuk Mendapatkan Massa Fly Ash, Na₂SiO₃, dan NaOH Dalam Pembuatan Binder Geopolimer

Dalam penelitian ini akan digunakan 24 buah komposisi campuran binder yang terbagi dalam 2 kelompok. Pengelompokkan ini berdasarkan molaritas larutan NaOH yang digunakan yaitu:

1. Penggunaan larutan Sodium Hidroksida (NaOH) 10M dengan perbandingan massa larutan antara $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$ = antara 0,5 dan 1,5.
2. Penggunaan larutan Sodium Hidroksida (NaOH) 14M dengan perbandingan massa larutan antara $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$ = antara 0,5 dan 1,5.

Setiap komposisi campuran tersebut, akan dibuat 15 benda uji.

Menentukan Massa 1 Binder



t = 5 cm

d = 2,5 cm

1. Volume satu silinder benda uji binder

$$V_{binder} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t$$

$$= \frac{1}{4} \times \pi \times 2,5^2 \times 5$$

$$= 24,544 \text{ cm}^3$$

dengan :

$\pi = 3,14$

d = diameter benda uji (cm)

t = tinggi benda uji (cm)

2. Massa satu silinder benda uji binder

$$m_{binder} = \rho \times V$$

$$= 2,4 \text{ gr/cm}^3 \times 24,544 \text{ cm}^3$$

$$= 58,906 \text{ gr}$$

dengan :

m = massa satu binder

ρ = massa jenis beton diasumsikan 2,4 gr/cm³

V = volume benda uji (cm³)

Menentukan Massa Fly Ash

Berat *fly ash* direncanakan sebesar 74% dari massa 1 binder.

$$\text{Massa fly ash} = 74\% \times \text{massa 1 binder}$$

$$= 74\% \times 58,906 \text{ gr}$$

$$= 43,59 \text{ gr}$$

Komposisi 1 =

fly ash 0% : limbah Tjiwi Kimia 100%
= 0 gr : 43,59 gr

Komposisi 2 =

fly ash 20% : limbah Tjiwi Kimia 80%
= 8,718 gr : 34,872 gr

Komposisi 3 =

fly ash 40% : limbah Tjiwi Kimia 60%
= 17,436 gr : 26,154 gr

Komposisi 4 =

fly ash 60% : limbah Tjiwi Kimia 40%
= 26,154 gr : 17,436 gr

Komposisi 5 =

fly ash 80% : limbah Tjiwi Kimia 20%
= 34,872 gr : 8,718 gr

Komposisi 6 =

fly ash 100% : limbah Tjiwi Kimia 0%
= 43,59 gr : 0 gr

Menentukan Massa Aktivator

Direncanakan massa aktivator sebesar 26% dari massa satu binder, sedangkan perbandingan massa antara sodium silikat dengan sodium hidroksida direncanakan sebesar 0,5 dan 1,5.

Massa aktivator = 26% x massa 1 binder

$$= 26\% \times 58,906 \text{ gr}$$

$$= 15,316 \text{ gr}$$

Massa pencampur = massa (*sodium silikat* + *sodium hidroksida*)

$$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 0,5 \rightarrow Na_2SiO_3 = 0,5$$

NaOH

$$15,316 \text{ gr} = 0,5 \text{ NaOH} + \text{NaOH}$$

$$15,316 \text{ gr} = 1,5 \text{ NaOH}$$

$$\text{NaOH} = 10,211 \text{ gr}$$

$$Na_2SiO_3 = 5,105 \text{ gr}$$

$$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1,5 \rightarrow Na_2SiO_3 = 1,5 \text{ NaOH}$$

$$15,316 \text{ gr} = 1,5 \text{ NaOH} + \text{NaOH}$$

$$15,316 \text{ gr} = 2,5 \text{ NaOH}$$

$$\text{NaOH} = 6,126 \text{ gr}$$

$$Na_2SiO_3 = 9,19 \text{ gr}$$

Dengan demikian, komposisi tersebut dapat ditabelkan sebagai berikut :

1. Komposisi A1 = Molaritas 10M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 0% : Tjiwi Kimia 100%.
2. Komposisi A2 = Molaritas 10 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 20% : Tjiwi Kimia 80%.
3. Komposisi A3 = Molaritas 10 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 40% : Tjiwi Kimia 60%.
4. Komposisi A4 = Molaritas 10 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%.
5. Komposisi A5 = Molaritas 10 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 80% : Tjiwi Kimia 20%.
6. Komposisi A6 = Molaritas 10 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 100% : Tjiwi Kimia 0%.
7. Komposisi B1 = Molaritas 10 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 0% : Tjiwi Kimia 100%.
8. Komposisi B2 = Molaritas 10 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 20% : Tjiwi Kimia 80%.
9. Komposisi B3 = Molaritas 10 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 40% : Tjiwi Kimia 60%.
10. Komposisi B4 = Molaritas 10 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%.69
11. Komposisi B5 = Molaritas 10 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 80% : Tjiwi Kimia 20%.

12. Komposisi B6 = Molaritas 10 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 100% : Tjiwi Kimia 0%.
13. Komposisi C1 = Molaritas 14 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 0% : Tjiwi Kimia 100%.
14. Komposisi C2 = Molaritas 14 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 20% : Tjiwi Kimia 80%.
15. Komposisi C3 = Molaritas 14 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 40% : Tjiwi Kimia 60%.
16. Komposisi C4 = Molaritas 14 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%.
17. Komposisi C5 = Molaritas 14 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 80% : Tjiwi Kimia 20%.
18. Komposisi C6 = Molaritas 14 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 100% : Tjiwi Kimia 0%.
19. Komposisi D1 = Molaritas 14 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 0% : Tjiwi Kimia 100%.
20. Komposisi D2 = Molaritas 14 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 20% : Tjiwi Kimia 80%.70
21. Komposisi D3 = Molaritas 14 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 40% : Tjiwi Kimia 60%.
22. Komposisi D4 = Molaritas 14 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%.
23. Komposisi D5 = Molaritas 14 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 80% : Tjiwi Kimia 20%.
24. Komposisi D6 = Molaritas 14 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 100% : Tjiwi Kimia 0%.

Total jumlah *binder geopolimer* yang dibutuhkan untuk pengetesan = 15 buah x jumlah komposisi campuran
= 15 buah x 24 komposisi
= **360 buah**

Tes yang Dilakukan Terhadap Benda Uji

Tes yang dilakukan pada *binder* meliputi:

- Tes setting time binder geopolimer.
- Tes porositas binder geopolimer.
- Tes *X-Ray Diffraction* (XRD).

Tes Setting Time Binder Geopolimer



Gambar 3. Tes *Setting Time Binder Geopolimer*

Data yang diperoleh dari tes *setting time* untuk masing-masing komposisi ditampilkan dalam tabel berikut:

Tabel 3. Hasil Tes *Setting Time Binder Geopolimer* Komposisi A4 (Molaritas 10 M 0,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%)

No	Waktu (menit)	Penurunan (mm)
1	10	33
2	15	23
3	20	17
4	25	13
5	30	11
6	35	6
7	40	2
8	45	1
9	50	1
10	55	1
11	60	0

Sumber : Hasil Penelitian

Dari hasil tes *setting time* yang dilakukan pada *binder geopolimer* komposisi A4 diperoleh data-data pada Tabel 3 dan dibuat grafik seperti pada Gambar 4.4 yang kemudian kurva hasil pengetesan diregresi dahulu untuk mendapatkan persamaan dan berapa waktu yang dibutuhkan *binder geopolimer* komposisi A4 untuk pengikatan awal.

$$\text{Persamaan : } y = -0,0002x^3 + 0,0345x^2 - 2,4235x + 54,3939$$

$$\text{Untuk } y = 25 \text{ mm} \rightarrow x = 14.46 \text{ menit}$$

$$\text{Untuk } y = 0 \text{ mm} \rightarrow x = 45.77 \text{ menit}$$

Tabel 4. Hasil Tes *Setting Time Binder Geopolimer* Komposisi B4 (Molaritas 10 M 1,5 perbandingan massa *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%)

No	Waktu (menit)	Penurunan (mm)
1	10	39
2	15	30
3	20	15
4	25	8
5	30	6
6	35	4
7	40	2
8	45	1
9	50	1
10	55	1
11	60	0

Sumber : Hasil Penelitian

Dari Gambar 5. dapat diamati bahwa hasil pengikatan awal yang paling cepat terdapat pada komposisi D4 (molaritas 14 M 1,5 perbandingan *fly ash* Paiton 40% : Tjiwi Kimia 60%) dengan waktu 12,7 menit. Dan pengikatan akhir yang paling lama terdapat pada komposisi D45 (molaritas 14 M 1,5 perbandingan *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%) dengan waktu 50 menit.

Walaupun jumlah molaritas yang digunakan sama serta pencampuran komposisi sudah homogen, tetap terdapat perbedaan waktu baik itu pada pengikatan awal maupun akhir. Untuk binder geopolimer molaritas 14 M 1,5 waktu rata-rata pengikatan awal adalah 14,57 menit, sedangkan untuk rata-rata waktu pengikatan akhir adalah 45 menit.

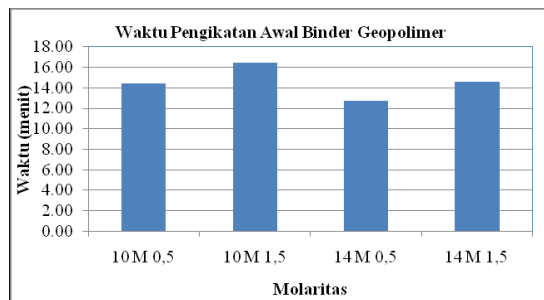
Tabel 5. Hasil Tes Waktu Rata-rata Pengikatan Awal dan Pengikatan Akhir *Binder Geopolimer*

Molaritas	Pengikatan Awal (menit)	Pengikatan Akhir (menit)
10 M 0,5	14,46	45,77
10 M 1,5	16,43	60
14 M 0,5	12,7	43,87
14 M 1,5	14,57	45

Sumber : Hasil Penelitian

Dari enam komposisi perbandingan massa *fly ash* Paiton dengan Tjiwi Kimia pada tiap-tiap molaritas, maka diambil rata-rata untuk mewakili waktu pengikatan awal

dan pengikatan akhir *binder geopolimer*. Hal ini dapat terlihat pada Tabel 5.



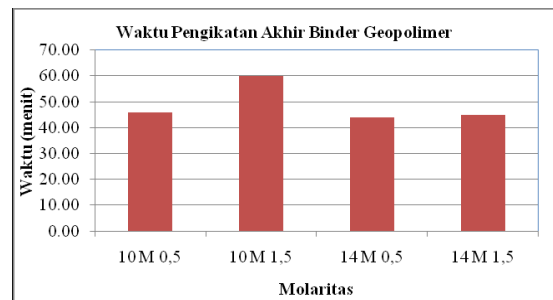
Gambar 4. Grafik Pengikatan Awal Binder Geopolimer

Dari Gambar 4, dapat disimpulkan bahwa:

- Semakin tinggi perbandingan massa larutan $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$ maka semakin lama waktu pengikatan awal berlangsung. Hal ini disebabkan oleh karena sedikitnya jumlah OH⁻ yang ada dalam campuran binder sehingga menyebabkan lambatnya proses pelepasan ion Si⁺⁴ dan Al⁺³ yang ada dalam *fly ash* (Davidovits, 1991). Ion Si⁺⁴ dan Al⁺³ yang telah dilepas tersebut membentuk monomer-monomer Si – O dan Al – O dan selanjutnya membentuk reaksi polimerisasi di dalam binder geopolimer. Hasil tes setting time ini mendukung pernyataan peneliti-peneliti sebelumnya bahwa NaOH yang digunakan dalam pasta geopolimer berfungsi untuk mengikat monomer-monomer Si – O dan Al – O sehingga 69 jika jumlahnya sedikit, maka kemampuan untuk mengikatnya juga berjalan lambat.
- Semakin tinggi molaritas yang digunakan dalam campuran, maka semakin cepat pengikatan awal berlangsung. Larutan NaOH 14M lebih pekat jika dibandingkan dengan larutan NaOH 10M. Semakin tinggi kepekatan NaOH dalam campuran, maka semakin banyak pula jumlah OH⁻ yang ada dalam campuran sehingga proses pengikatan akan berjalan lebih cepat (Davidovits, 1991).

Hal ini juga membuktikan bahwa pada umur yang sama, waktu untuk pengikatan awal masing-masing komposisi binder bisa berbeda-beda, tergantung dari jumlah

kandungan ion OH⁻ yang terkandung dalam campuran.



Gambar 5. Grafik Pengikatan Akhir Binder Geopolimer

Dari Gambar 5, dapat disimpulkan bahwa:

- Semakin tinggi perbandingan massa larutan $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$ maka semakin cepat waktu pengikatan akhir berlangsung. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi perbandingan massa larutan maka semakin banyak pula Na₂SiO₃ yang ada dalam campuran binder. Penambahan natrium silikat menyumbangkan Si yang pada akhirnya digunakan sebagai pembentukan monomer penyusun rantai geopolimer yaitu rantai monomer Si – O (Davidovits, 1991).
- Semakin tinggi molaritas yang digunakan dalam campuran, maka pengikatan akhir berlangsung relatif lebih cepat. Larutan NaOH 14M lebih pekat jika dibandingkan dengan larutan NaOH 10M. Semakin tinggi molaritas yang digunakan maka Na⁺ dan OH⁻ semakin banyak sehingga membantu pemisahan (*leaching*) Si dan Al yang ada pada *fly ash* dan Na₂SiO₃ yang akan membentuk monomer-monomer Si – O dan Al – O (Davidovits, 1991).

Tes Porositas

Tes porositas *binder geopolimer* ini dilakukan setelah *binder* berumur 56 hari. Diambil 2 benda uji dari masing-masing molaritas yang memiliki kuat tekan tertinggi. *Binder* A1, B1, C1 dan D1 dengan perbandingan massa *fly ash* Paiton 60% : Tjiwi Kimia 40%.

Tes porositas *binder geopolimer* bertujuan untuk mengetahui besarnya pori terbuka dan pori tertutup yang ada di dalam *binder geopolimer* tersebut. Pori terbuka

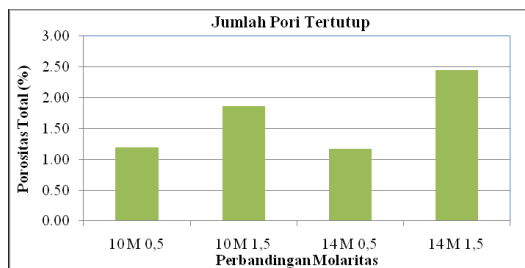
yaitu pori yang bersifat *permeable* (dapat ditembus baik oleh udara ataupun air). Pori tertutup adalah pori yang bersifat *impermeable* (tidak dapat ditembus). Pori yang tertutup lebih baik dari pada pori yang terbuka karena pori yang tertutup memiliki tekanan hidrostatis yang menambah kuat tekan *binder* dan terhindar dari retak, sedangkan pori yang terbuka membuat *binder* menjadi keropos (menurunkan kuat tekan *binder*).

Tabel 6. Hasil Rata-rata Tes Porositas *Binder Geopolimer* pada Molaritas 10M dan 14M

Parameter	10 M 0,5	10 M 1,5	14 M 0,5	14 M 1,5
Pt	32.58	31.49	25.67	25.38
Po	31.38	29.63	24.50	22.93
Pf	1.20	1.87	1.17	2.44

Secara umum dapat disimpulkan bahwa :

- a. Seperti halnya kuat tekan, semakin tinggi perbandingan $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$ massa maka semakin banyak pula jumlah pori tertutup pada *binder geopolimer*. Serta semakin tinggi molaritas maka jumlah pori tertutup juga akan semakin banyak. Hal ini dapat diamati pada Gambar 4. di bawah ini.

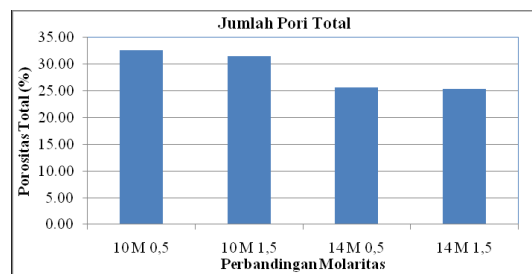


Gambar 4. Grafik Jumlah Pori Tertutup *Binder Geopolimer* pada Molaritas 10M dan 14M

- b. Pori total

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. Kepekatan berhubungan dengan banyaknya air yang dicampurkan dalam larutan. Pada saat curing dilakukan, air yang berada dalam

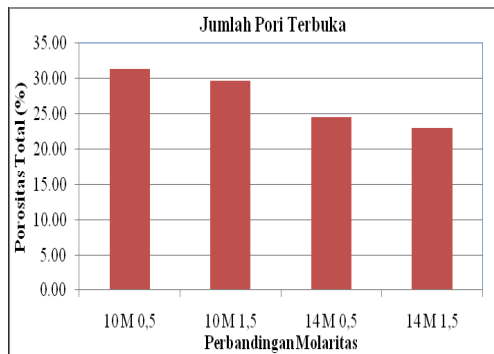
binder akan menguap sehingga rongga yang dulunya ditempati oleh air menjadi kosong. *Binder* yang menggunakan larutan NaOH 14M lebih pekat jika dibandingkan dengan *binder* yang menggunakan larutan 10M. Oleh sebab itu diperkirakan jumlah air yang berada dalam rongga *binder* 14M lebih sedikit jika dibandingkan dengan *binder* yang menggunakan larutan NaOH 10M dan hal itu menyebabkan jumlah total pori *binder* 10M relatif lebih banyak jika dibandingkan dengan *binder* 14M. Hal ini dapat diamati.



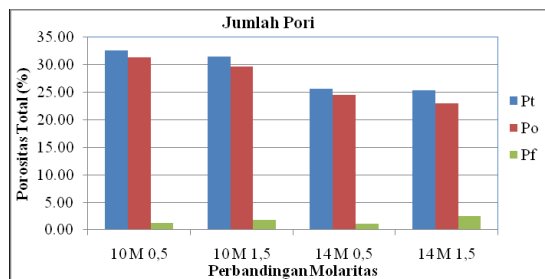
Gambar 5. Grafik Jumlah Pori Total *Binder Geopolimer* pada Molaritas 10M dan 14M

- c. Jumlah pori terbuka

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa *binder geopolimer* yang menggunakan perbandingan massa larutan = 1,5 memiliki pori terbuka yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan *binder* komposisi lainnya. Secara umum dapat diperhatikan bahwa *binder geopolimer* dengan menggunakan larutan NaOH 14M memiliki pori terbuka yang lebih kecil jika dibandingkan dengan *binder geopolimer* yang menggunakan larutan NaOH 10M. Hasil yang diperoleh dari tes porositas ini berhubungan erat dengan hasil kuat tekan yang diperoleh. Pori terbuka yang ada di dalam *binder* menyebabkan *binder* menjadi keropos.



Gambar 6. Grafik Jumlah Pori Terbuka Binder Geopolimer pada Molaritas 10M dan 14M



Gambar 7. Grafik Jumlah Pori Binder Geopolimer pada Molaritas 10M dan 14M

Dari ketiga kesimpulan tersebut dapat dilihat pada Gambar 7 yang menunjukkan perbandingan grafik porositas total (Pt), porositas terbuka (Po), dan porositas tertutup (Pf).

KESIMPULAN

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

- Semakin tinggi perbandingan massa larutan $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$ maka semakin lama waktu pengikatan awal berlangsung.
- Semakin tinggi molaritas yang digunakan dalam campuran, maka semakin cepat pengikatan awal berlangsung.
- Semakin tinggi perbandingan maka semakin cepat waktu pengikatan akhir berlangsung.
- Semakin tinggi molaritas yang digunakan dalam campuran, maka pengikatan akhir berlangsung relatif lebih cepat.
- Dari hasil tes porositas yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah pori tertutup pada binder, terdapat pada komposisi molaritas 14M

1,5 bisa menyebabkan kuat tekan lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- AFNOR NF B 49104.
- Annual Book of ASTM Standard C 114-85. 1986. *Chemical Analysis of Hydraulic Cement*. (Uji Kimia Fly Ash: Halaman 99)
- Annual Book of ASTM Standard C 191-82. 1986. *Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. (Uji Setting Time: Halaman 205-207)
- Annual Book of ASTM Standard C 305-82. 1986. *Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. (Mesin Mixer: Halaman 252-254)
- Annual Book of ASTM Standard C 618-84. 1994. *Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*. (Klasifikasi Fly Ash: Halaman 301-303)
- Annual Book of ASTM Standard C 1181-91. 1994. *Compressive Creep of Chemical-Resistant Polymer Machinery Grouts*. (Ukuran Binder Geopolimer: Halaman 743)
- Bagus, Andri dan Hilmy Gugo. 2010. *Pasta Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dan Limbah Tjiwi Kimia Dengan Aktifator Sodium Hidroksida*. Diploma Teknik Sipil, FTSP-ITS. (Tinjauan Pustaka Setting Time, Kuat Tekan, Porositas: Halaman 57-157). Surabaya
- Damayanti Nanna', Oktavina. 2007. *Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Aktifator Sodium Hidroksida Molaritas 8M dan 10M*. Surabaya: Teknik Sipil, FTSP-ITS. (Tes-tes Yang Dilakukan: Halaman 64-75)
- Edgar. 2008. *Apa Itu Aquades*, <URL: http://id.answers.yahoo.com/question/index?_ylt=AkkmhH0YAWKQHFuikp6uvtLJRAx.;_ylv=3?qid=20080604092732Aabf rek>.
- Hardjito, Djwanto. 2008. *Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen*, <URL: <http://betoncoid.wordpress.com/2008/06/30/abu-terbang-solusi-pencemaran-semen>>.

- Hardjito, D and Rangan, B.V. 2005. *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Faculty of Engineering Curtin University of Technology. (Geopolimer: Halaman 5-15), Pert
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847. 2002. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Bandung: Badan Standardisasi Nasional. (Benda Uji Dalam Kuat Tekan: Halaman 28)
- Subaer. 2008. *Pengantar Fisika Geopolimer*. Maulana Offset. (Sifat Fisis dan Mekanik Geopolimer: Halaman 175). Solo.
- Sudarmo, Unggul. 2004. *Kimia SMA I untuk SMA Kelas X*. Erlangga. (Tabel Periodik: Halaman 1), Jakarta.