

PEMANFAATAN POZZOLAN SEBAGAI BAHAN DASAR GEOPOLIMER

Desak Nyoman Deasi Triani, Triwulan, Januarti Jaya Ekaputri
Teknik Sipil, Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia
e-mail: triwulan@ce.its.ac.id, januarti@ce.its.ac.id

Abstrak— Penelitian ini menggunakan metakaolin dan lempung (clay) yang memiliki kandungan silika dan alumina aktif setelah dikalsinasi pada suhu 700°C. Tingginya rasio Silika terhadap alumina pada material tersebut menghasilkan pasta geopolimer yang memiliki sifat mekanik dan ketahanan terhadap bakar yang baik.

Mix design pasta dibuat, berdasarkan perbandingan silika terhadap alumina di dalam campurannya. Perbandingan silika terhadap alumina pada pasta berdasar dasar metakaolin adalah 1,4 dan 1,8. Sedangkan pada lempung, perbandingan yang digunakan adalah 2,9 dan 3,2. Larutan alkali aktivator menggunakan Na_2SiO_3 yang dicampur dengan larutan NaOH . Molaritas NaOH yang dipakai adalah 10 M dan 8 M.

Diketahui bahwa semakin tinggi perbandingan Silika terhadap alumina pada campuran, ketahanan terhadap bakarnya lebih baik. Namun untuk kuat tekan awal ada faktor-faktor lain yang perlu dipertimbangkan yaitu perbandingan water/solid dan perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. Semakin tinggi water/solid didalam campuran, maka kuat tekan pasta cenderung semakin menurun terutama pada material lempung. Sedangkan untuk $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, semakin tinggi rasionya maka kuat tekan pasta cenderung meningkat.

Kata Kunci— kaolin, lempung, metakaolin, pozzolan, silica fume.

I. PENDAHULUAN

Geopolimer didefinisikan sebagai material alumino-silikat dengan kerangka tiga dimensi yang terbentuk pada suhu rendah dan waktu yang relatif singkat [1]. Material yang digunakan sebagai bahan dasar geopolimer diutamakan memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi. Material tersebut dikenal sebagai material pozzolan. Beberapa yang telah diteliti dan dicoba diantaranya adalah: abu terbang (fly ash), silica fume, abu sekam padi, kaolin, lempung (clay) [2]. Keunggulan dari beton geopolimer adalah sifat ketahanan terhadap bakar dan lingkungan asam yang lebih baik dibandingkan beton OPC. Ketahanan panas yang dimiliki oleh beton geopolimer juga terbilang tinggi yaitu mencapai suhu diatas 500^o - 1000°C.

Pada penelitian ini, pasta yang akan diamati adalah pasta dengan bahan dasar kaolin dan clay. Untuk pemanfaatan kaolin sebagai geopolimer sudah banyak diterapkan di berbagai negara di wilayah Eropa dan Australia. Kaolin tidak bisa digunakan langsung karena sifatnya yang tidak reaktif, maka dari itu perlu dilakukan pembakaran pada suhu tertentu sehingga kaolin dapat bereaksi dengan alkali, menjadi beton

geopolimer. Hal tersebut juga berlaku juga untuk material clay.

Berdasarkan penelitian terdahulu ditemukan pembakaran yang dapat mengaktifkan kaolin menjadi material yang amorf berada pada suhu diatas 550°C [3]. Kaolin yang telah mengalami dehidroksilasi setelah pembakaran tersebut dikenal dengan nama Metakaolin untuk perubahan kaolin. Dalam proses pembentukan geopolimer, diperlukan larutan alkali silika aktif pada kondisi alkali yang cukup tinggi [4]. Pemanfaatan larutan alkali yang telah digunakan selama ini dapat berupa KOH dan NaOH, dengan variasi molar KOH berkisar 0,1 M – 8 M, dan variasi NaOH yang biasa dipakai adalah 8 M, 10 M, 12 M, 14 M, 18 M, hingga 20 M. Sedangkan untuk silika aktif yang dipergunakan bisa berupa silica fume maupun Na_2SiO_3 [5].

Indonesia sebagai Negara penghasil tambang yang berlimpah, dengan kaolin dan clay merupakan beberapa hasil tambangnya, yang banyak ditemukan di daerah Lampung, Bangka, Belitung, Jawa Barat, dan Kalimantan[6]. Melihat kondisi tersebut, Indonesia yang saat ini masih minim pengembangan geopolimer, dapat mengembangkan kaolin maupun lempung sebagai bahan dasarnya. Pemanfaatan geopolimer berbahan dasar kaolin maupun lempung tidak hanya sebagai beton namun juga seharusnya bisa dimanfaatkan sebagai keramik, paving, coating dan masih banyak lainnya.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Material

1. Metakaolin

Metakaolin yang digunakan berasal dari daerah Bangka Belitung. Material ini didapat dengan mengkalsinasi kaolin pada suhu 700°C. Berat jenisnya sebesar 2.5 gr/cm³, dengan ukuran partikel lolos ayakan #200. Dari hasil XRF, komposisi senyawa oksida dari metakaolin dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Komposisi kimia metakaolin

Oksida	%
SiO_2	50.26
Al_2O_3	43.00
MgO	0.12
CaO	0.04
Na_2O	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
S	4.72
P	0.01
LOI	4.72

2. Lempung

Terdapat 2 material lempung yang digunakan pada penelitian ini, yaitu clay GD 1 dan Clay GD 2. Material lempung yang dipakai berasal dari daerah Blitar. Sebelum digunakan, lempung dikalsinasi terlebih dahulu pada suhu 700°C. Berat jenis untuk clay GD 1 sebesar 2.63 g/cm³, dengan ukuran partikel lolos ayakan #200. Hasil analisa XRF menunjukkan komposisi senyawa oksida lempung seperti Tabel 2.

Tabel 2 Komposisi kimia lempung GD1 dan GD2 (%)

Oksida	Clay GD1 (%)	Clay GD 2(%)
SiO ₂	62.63	56.75
Al ₂ O ₃	23.48	20.68
MgO	0.94	3.18
CaO	0.5	2.58
Na ₂ O	0.42	1.67
K ₂ O	0.84	3.56
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01
MnO ₂	0.07	0.01
Fe ₂ O ₃	6.47	7.13
TiO ₂	0.51	0.76
S	0.03	-
P	0.03	-
LOI	3.87	3.41

3. Silica Fume

Silica Fume yang digunakan memiliki berat jenis 2.11 gr/cm³ dengan ukuran partikel lolos ayakan 450 μm sebanyak 100%. *Silica fume* pada penelitian ini berguna sebagai sumber silika amorf untuk meningkatkan perbandingan Si/Al pada mix desain.

4. Alkali Aktivator

Alkali aktivator yang digunakan adalah Natrium Silikat (Na₂SiO₃) yang dicampur bersama larutan NaOH 10 M dan 8M. Adapun komposisi senyawa oksida dari Na₂SiO₃ terdiri atas 18% Na₂O, 36% SiO₂ dan 46% H₂O.

5. Aquades

Merupakan air suling yang digunakan untuk membuat larutan NaOH.

B. Prosedur Eksperimen

Terdapat beberapa tahapan pada penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut

1. Analisa Material

Analisa yang dilakukan pada metakaolin dan lempung berupa : pengujian berat jenis, analisa XRF (*X-Ray Fluorescence*), analisa XRD (*X-Ray Diffraction*), analisa SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan uji reaktivitas pada masing-masing pozolan.

2. Pembuatan pasta Geopolimer

Terdapat 2 campuran pasta pada penelitian in. Pasta dengan metakaolin dan pasta dengan lempung. Penentuan mix desain masing-masing pasta berdasarkan dari perbandingan Si/Al. Untuk pasta metakaolin, terdapat 12 variasi mix desain dengan Si/Al sebesar 1.4 dan 1.8. Sedangkan untuk pasta lempung, terdapat 8 variasi mix desain dengan Si/Al sebesar 2.9 dan 3.2. Komposisi mix desain dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4. Untuk pasta metakaolin, terdapat 3 campuran yang menggunakan *silica fume* yaitu MK 4, MK 5, dan MK 6. Sedangkan untuk pasta clay GD 1, terdapat 1 campuran yang menggunakan *silica fume* yaitu campuran C4. Penambahan *silica fume* dilakukan untuk meningkatkan rasio perbandingan Si/Al pada campuran.

Tabel 3 Komposisi Mix desain metakaolin

Kode	Na ₂ SiO ₃ / NaOH	Si/Al	SiO ₂ /Na ₂ O (aktivator)	W/S
MK1 (8_139)	1.273	1.39	0.75	0.41
MK2 (8_14)	1.564	1.4	0.9	0.38
MK3 (8_14)	1.439	1.4	0.81	0.39
MK4 (8_177)	1.439	1.77	0.81	0.4
MK5 (8_178)	1.857	1.78	0.94	0.36
MK6 (8_176)	1.857	1.76	0.94	0.37
MK1 (10_14)	1.273	1.39	0.67	0.39
MK2 (10_14)	1.564	1.4	0.82	0.35
MK3 (10_14)	1.439	1.4	0.73	0.38
MK4 (10_177)	1.439	1.77	0.73	0.34
MK5 (10_178)	1.857	1.78	0.86	0.35
MK6 (10_176)	1.857	1.76	0.86	0.36

Tabel 4 Komposisi mix desain lempung

Kode	Na ₂ SiO ₃ / NaOH	Si/Al	SiO ₂ /Na ₂ O	W/S
C1(8_288)	2.030	2.88	0.97	0.29
C2(8_291)	2.333	2.91	1.01	0.29
C3(8_317)	2.846	3.17	1.16	0.34
C4(8_323)	1.381	3.23	0.78	0.3
C1(10_288)	2.030	2.88	0.89	0.28

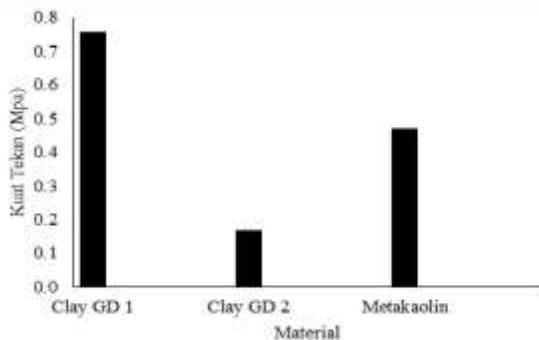
C2(10_291)	2.333	2.91	0.89	0.28
C3(10_317)	2.846	3.17	1.08	0.35
C4(10_323)	1.381	3.23	0.7	0.29

C. Metode Pegetesan

Pengetesan yang dilakukan untuk pasta metakaolin dan lempung adlah sebagai berikut :Uji Waktu ikat / *Setting Time* [7], Uji Kuat Tekan Hancur [8], Uji Porositas [9], dan Uji Bakar.

III. ANALISA DAN PEMBAHASAN

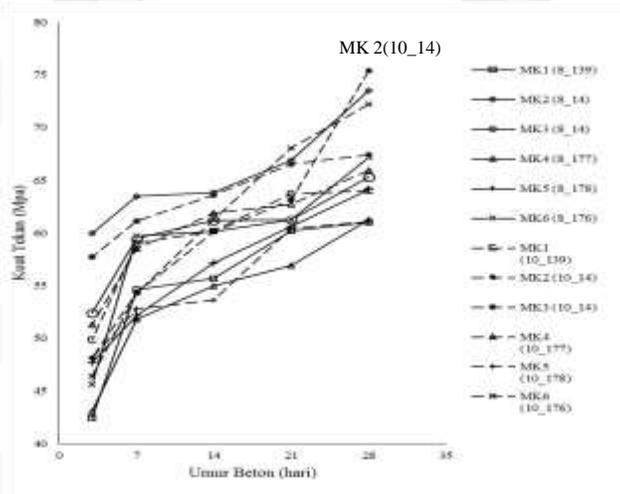
A. Reaktivitas Lempung dan Metakaolin



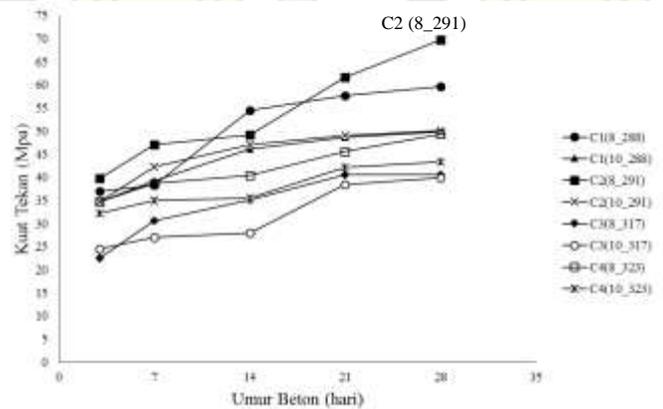
Gambar 1. Perbandingan reaktivitas Lempung dan Metakaolin

Berdasarkan Gambar 1. dapat dilihat bahwa reaktivitas tertinggi dimiliki oleh Clay GD 1, sedangkan yang terendah dimiliki oleh clay GD 2. Rendahnya reaktivitas dari clay GD 2 menyebabkan material tersebut tidak dapat setting meskipun telah dikalsinasi pada suhu 700°C. Sedangkan untuk reaktivitas clay GD 1 dibuktikan dari hasil XRFnya. Persentase oksida silika pada clay GD1 lebih banyak dibanding metakaolin. Selain itu, hasil XRD clay GD 1 setelah dikalsinasi pada suhu 700°C menunjukkan jumlah mineral yang mengandung Si yang terbentuk sebanyak 91% dari senyawa total. Sedangkan untuk metakaolin hanya sebesar 51.08%.

B. Kuat Tekan Pasta



Gambar 2. Grafik Kuat Tekan Pasta Metakaolin Terhadap Umur Pasta

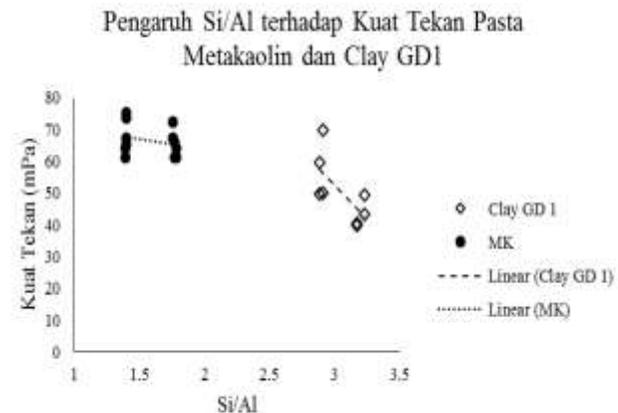


Gambar 3 Grafik Kuat Tekan Pasta Clay GD 1 Terhadap Umur Pasta

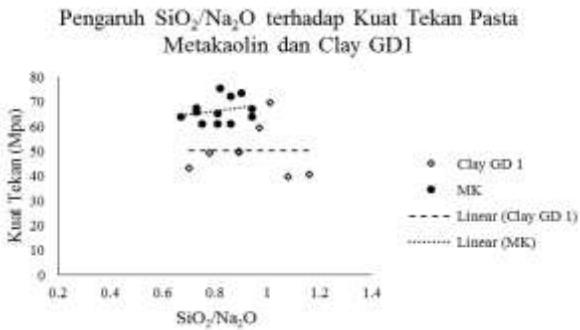
Berdasarkan Gambar 2, dapat dilihat bahwa campuran MK2 (10_14) memiliki kuat tekan tertinggi dibandingkan campuran metakaolin lainnya. Sedangkan untuk pasta clay GD1, dapat dilihat pada Gambar 3 bahwa campuran C2 (8_291) memiliki kuat tekan tertinggi pada campuran clay GD 1.

Kuat tekan pasta geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor. Namun, pada penelitian ini hanya terfokus pada 3 faktor utama yaitu pengaruh rasio water/solid dan Si/Al pada campuran, serta perbandingan molar SiO₂/Na₂O pada larutan aktivator. Penelitian pengaruh Si/Al pada geopolimer pernah dilakukan Petter Duxon et. al (2007) [10]. Dalam penelitiannya diketahui bahwa perbandingan Si/Al < 1 menghasilkan kuat tekan yang rendah, sehingga digunakan perbandingan molar Si/Al dengan range 1.15 ≤ Si/Al ≤ 2.15 pada penelitiannya. Sedangkan pada penelitian P. D. Silva et. al (2007) [11] menyatakan kuat tekan optimum terjadi saat Si/Al berada pada range 1.7-1.9, sedangkan untuk Si/Al diatas 1.9, kuat tekan geopolimer mengalami penurunan.

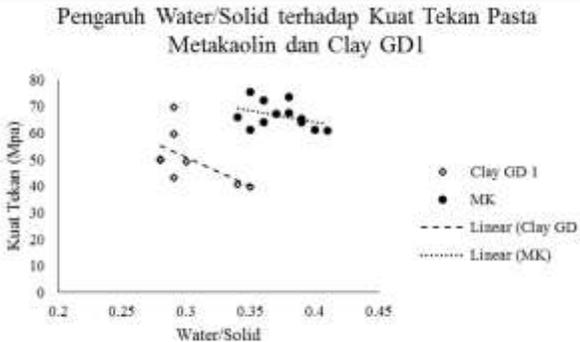
Penelitian pengaruh perbandingan molar SiO₂/Na₂O pada larutan aktivator juga sudah dilakukan oleh Rahrier et. al. (1997) [12]. Dalam penelitiannya, perbandingan molar SiO₂/Na₂O > 0.8 dalam larutan aktivator dapat meningkatkan sifat mekanik dari geopolimer.



Gambar 4. Perbandingan pengaruh Si/Al terhadap Kuat Tekan



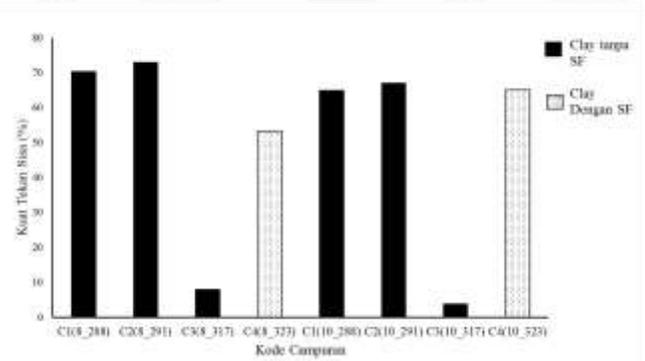
Gambar 5. Pengaruh SiO₂/Na₂O terhadap Kuat Tekan Pasta Metakaolin dan Clay GD 1



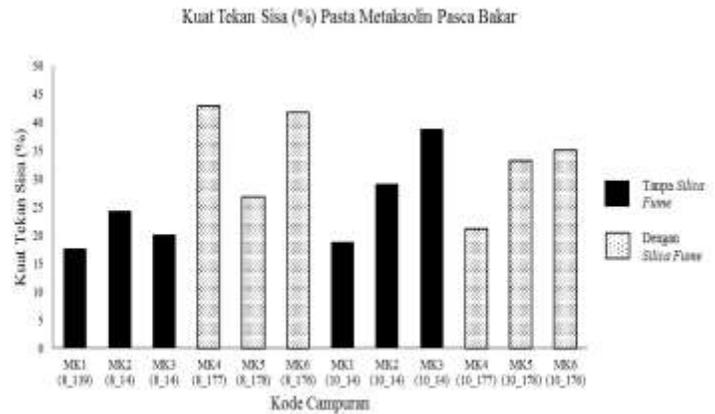
Gambar 6. Pengaruh Water/Solid terhadap Kuat Tekan Pasta Metakaolin dan Clay GD 1

Berdasarkan Gambar 4, dapat dilihat semakin tinggi Si/Al cenderung menurunkan kuat tekan pasta cenderung mengalami penurunan. Hal tersebut ditunjukkan dari kuat tekan pasta metakaolin yang lebih tinggi dibanding pasta clay GD 1, meskipun Si/Al clay GD 1 lebih tinggi dibanding metakaolin. Selain perbandingan Si/Al, pengaruh SiO₂/Na₂O juga berpengaruh terhadap kuat tekan. Pada Gambar 5. menunjukan bahwa semakin tinggi SiO₂/Na₂O, kuat tekan pasta cenderung meningkat, terutama pada pasta metakaolin. Sedangkan untuk pengaruh water/solid pada pasta, dapat dilihat pada Gambar 6. Semakin meningkatnya perbandingan water/solid pada campuran, maka kuat tekan pasta cenderung mengalami penurunan. Pengaruh rasio water/solid sangat signifikan, terutama pada campuran clay GD 1.

C. Kuat Tekan Pasta Pasca Bakar

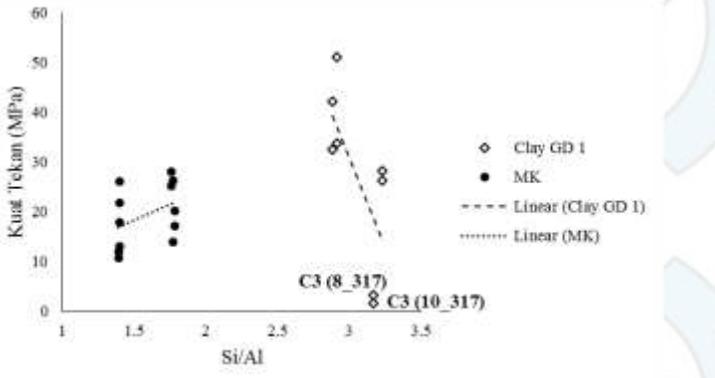


Gambar 7. Kuat Tekan Sisa (%) Clay GD 1 Pasca Bakar umur 28 hari

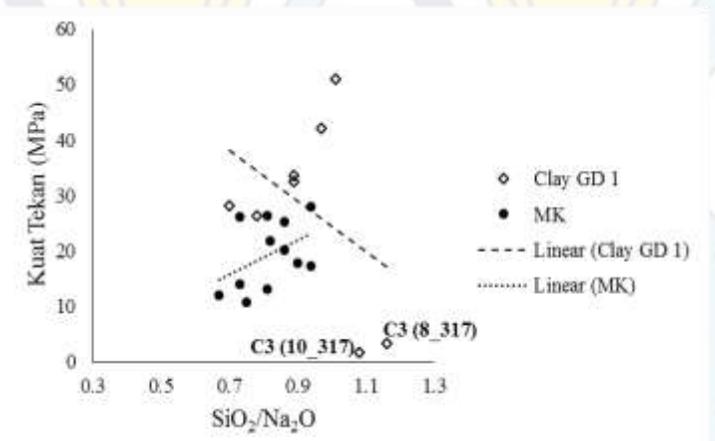


Gambar 8. Perbandingan Kuat Tekan Sisa (%) Pasta Metakaolin Pasca Bakar umur 28 hari

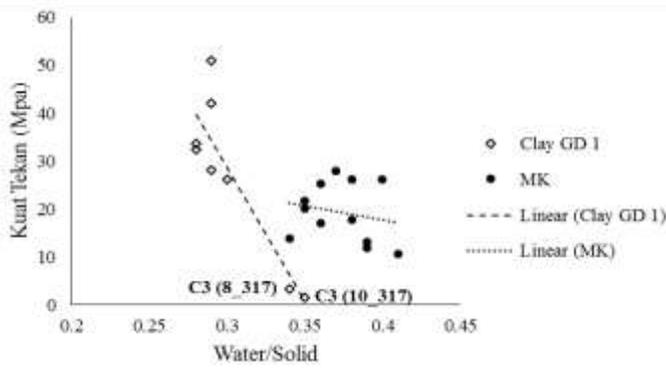
Berdasarkan Gambar 7 dan 8, dapat dilihat bahwa rata-rata kuat tekan sisa (%) yang dimiliki pasta clay GD 1 lebih tinggi dibanding pasta metakaolin. Pengaruh dari Si/Al, SiO₂/Na₂O dan water/solid terhadap kuat tekan sisa pasca bakar dapat dilihat pada Gambar 9, 10, dan 11.



Gambar 9. Pengaruh Si/Al terhadap Kuat Tekan Pasta Metakaolin dan Clay GD1 Pasca Bakar umur 28 hari



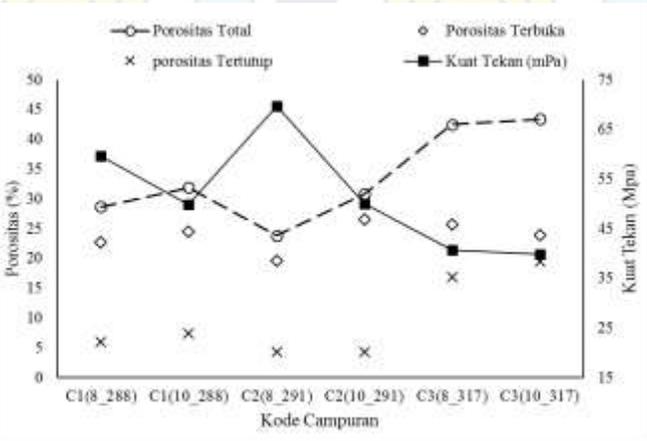
Gambar 10. Pengaruh SiO₂/Na₂O terhadap Kuat Tekan Pasta Metakaolin dan Clay GD1 Pasca Bakar



Gambar 11. Pengaruh water/solid terhadap Kuat Tekan Pasta Metakaolin dan Clay GD1 Pasca Bakar umur 28 hari

Berdasarkan Gambar 9. Dapat dilihat semakin tinggi perbandingan dari Si/Al pada pasta metakaolin, maka ketahanan bakarnya semakin baik. Hal tersebut ditunjukkan juga pada pasta clay GD 1, namun terjadi penurunan kuat tekan sisa pada pasta C3 yang menyebabkan trendlinenya cenderung menurun. Jika melihat dari pengaruh SiO_2/Na_2O , bagi pasta metakaolin, ketahanan bakar terlihat membaik seiring meningkatnya perbandingan SiO_2/Na_2O , namun hal tersebut tidak terjadi pada pasta clay GD 1. Keanehan pada pasta clay GD1 disebabkan karena pengaruh water/solid. Terlihat pada Gambar 11. Bahwa semakin tinggi water/solid pada campuran clay GD 1, maka kemampuannya terhadap bakar juga menurun secara signifikan. Sedangkan untuk pasta metakaolin, penurunan akibat perbandingan water/solid juga terjadi, namun tidak signifikan pada campuran clay GD 1. Pengaruh dari tingginya water/solid pada clay GD 1 berefek pada jumlah pori dalam pasta. Hal tersebut dapat dilihat pada analisa porositas pasta clay GD 1.

D. Porositas Pasta Clay GD 1

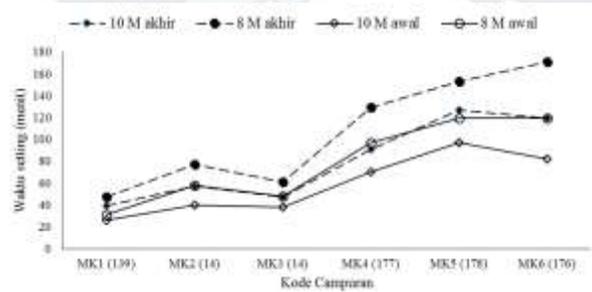


Gambar 12. Grafik Porositas Pasta Clay GD 1 umur 28 hari

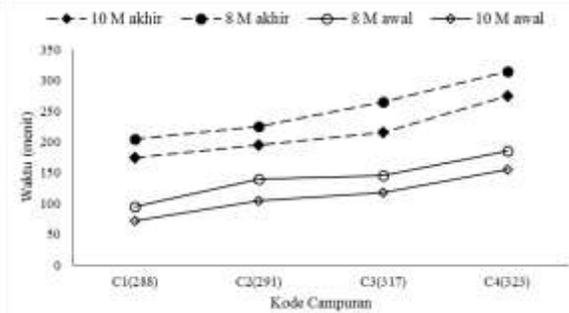
Berdasarkan Gambar 12. dapat dilihat bahwa campuran C3 memiliki porositas terbesar di banding campuran lainnya. Hal ini disebabkan karena tingginya water/solid di dalam campuran C3 yang berefek pada persen pori yang ada pada pasta. Tingginya porositas pada campuran C3 akibat tingginya water/solid tersebut berdampak signifikan terhadap kuat tekan

awal dan pasca bakar dari campuran C3.

E. Setting Time

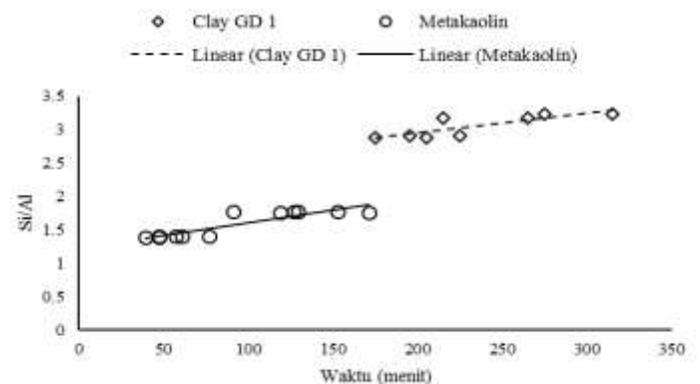


Gambar 13. Grafik Setting Time Awal dan Akhir Pasta Metakaolin



Gambar 14. Grafik Setting Time Awal dan Akhir Pasta Clay GD 1

Dari Gambar 13 dan 14, dapat dilihat bahwa pasta dengan NaOH 10 M memiliki waktu setting awal dan akhir yang lebih cepat dibandingkan NaOH 8 M. Hal ini disebabkan karena penambahan molaritas dari 8 M menjadi 10 M mengakibatkan larutan NaOH menjadi lebih kental, sehingga proses pemutusan rantai alumino silikat akibat penambahan molaritas NaOH dapat berlangsung lebih cepat, dan berakibat pada proses setting yang berlangsung cepat (Wiyoto, 2007) [13]. Selain penambahan molaritas, setting time juga sangat dipengaruhi oleh perbandingan molar dari Si/Al seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Pengaruh Si/Al terhadap Setting Time akhir Pasta Clay GD 1 dan Metakaolin

Berdasarkan penelitian P. D. Silva (2007)[11], semakin tinggi perbandingan Si/Al, maka setting time geopolimer semakin panjang. Hal ini juga ditunjukkan pada Gambar 15. Setting time akhir dari pasta clay GD 1 dengan Si/Al range 2.88-3.23 lebih lama dibanding metakaolin dengan Si/Al range 1.39-1.78.

IV. KESIMPULAN

1. Suhu kalsinasi dari metakaolin dan clay GD 1 adalah 700°C. Sedangkan untuk clay GD 2 tetap tidak bisa setting meskipun telah dikalsinasi pada suhu 700°C, hal ini disebabkan Karena reaktivitas dari clay GD 1 sangat rendah.
2. Pada semua campuran, perbandingan dari Si/Al memiliki peranan penting dalam menentukan lama waktu setting. Semakin tinggi perbandingan Si/Al, maka semakin panjang waktu setting pasta. Selain Si/Al, molaritas NaOH juga memiliki peranan penting pada setting time. Semakin tinggi molaritas NaOH, maka setting time dari pasta semakin cepat.
3. Perbandingan Si/Al memberikan pengaruh terhadap kuat tekan. Semakin tinggi Si/Al menunjukkan kecenderungan penurunan kuat tekan pada pasta clay GD 1 dan Metakaolin. Namun untuk kuat tekan pasca bakar, semakin tinggi Si/Al, maka ketahanan terhadap bakar dari pasta cenderung lebih baik.
4. Perbandingan SiO₂/Na₂O juga mempengaruhi kuat tekan pasta. Semakin tinggi SiO₂/Na₂O, maka kuat tekan pasta cenderung mengalami peningkatan baik untuk pasta metakaolin maupun pasta clay GD1. Hal tersebut juga terjadi untuk pasta paca bakar. Namun khusus pasta clay GD 1 campuran C3 menunjukkan penurunan kuat tekan pasca bakar yang drastis meskipun SiO₂/Na₂O yang dimiliki cukup tinggi.
5. Perbandingan water/solid memberikan pengaruh pada kuat tekan masing-masing pasta. Semakin tinggi perbandingan water/solid, mengakibatkan penurunan terhadap tekan pasta. Penurunan kuat tekan juga terjadi pada pasta pasca bakar. Pengaruh water/solid sangat signifikan terhadap pasta clay GD 1. Hal tersebut dibuktikan dari keanehan yang terjadi pada campuran C3. Meskipun memiliki perbandingan Si/Al dan SiO₂/Na₂O yang tinggi, namun kuat tekannya paling kecil diantara campuran clay lain. Hal ini disebabkan karena perbandingan water/solid yang dimiliki campuran C3 paling tinggi diantara lainnya. Berdasarkan data tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa material clay GD 1 merupakan material yang sensitif terhadap air.
6. Berdasarkan tes porositas yang dilakukan pada pasta clay GD 1, dapat dilihat bahwa campuran C3 clay GD 1 memiliki % pori lebih paling banyak diantara campuran lainnya yaitu sebesar 42.48% dan 43.36%. Hal ini berdampak pada rendahnya kuat tekan pasta C3 clay GD 1 baik sebelum di bakar, maupun setelah dibakar.
7. Penambahan Silica Fume dalam campuran untuk meningkatkan perbandingan Si/Al tidak terlalu berdampak bagi kenaikan kuat tekan jika dibandingkan dengan Penambahan Na₂SiO₃.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Davidovits, J.,. "SPE PATEC." *Society of Plastic Engineering, Brookfield Center*, 1979
- [2] Davidovits, J.,. "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries." *Geopolymer Institute*, 1994.
- [3] Davidovits J. "Geopolimer Chemistry and Applications." *Geopolymer Institut*, 2008.
- [4] Davidovits J. "Geopolymer: Inorganic Polymeric New Materias, J. Thermal Analysis." *Geopolymer Institute*, 1991.
- [5] Grazino ML, Blanco MT., Ramirez SM. "Alkali Activation of Metakaolins: Parameter Affecting Mecanical, Structural and Microstructural Properties." *Spinger Science and Bussines Media*, 2007: 2934-2943.
- [6] Rachmat. *Ringkasan Pengetahuan Sosial*. Jakarta: Grasindo, 2012.
- [7] ASTM C 191. *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. Philadelphia: American Society of Testing and Materials, 2001.
- [8] ASTM C 39/C 39M. *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Philadelphia: American Society of Testing and Materials, 2001.
- [9] AFNOR NF B 49104. n.d.
- [10] P. Duxson, G.C. Lukey, J. S. J. Van Deventer. "The Thermal Evolution of Metakaolin Geopolymers:Part I - Physical Evolution." *Science Direct*, 2006: 5541-5555.
- [11] P. D. Silva, K. S. Crenstil, V. Sirivivatnanon. "Kinetic of Geopolymerization : Role of Al₂O₃ and SiO₂." *Science Direct*, 2007: 512-518.
- [12] H. Rahrier, W. Simons, B. Van Mele, M Biesemans. "Low-Temperature synthezised aluminosilicate glasses. 3. Influence of the composition of the silicate solution on product." *J. Mater Sci*, 1993: 2237-2247.
- [13] Wiyoto, Januk. *Pengaruh variasi molaritas NaOH (12 M dan 14 M) dan perbandingan aktivator untuk mendapatkan peningkatan kuat tekan beton geopolimer yang berbahan dasar fly ash dengan tambahan trass sebagai pengisi*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2007.