

Studi Perilaku Pasta Geopolymer Ordinary Portland Cement Hybrid

Remigildus Cornelis¹⁾, Iwan Rutendi²⁾

¹⁾Prodi Teknik Sipil, Fakultas Sanis dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang

²⁾Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusumah, Purwokerto
Email: remi@staf.undana.ac.id¹⁾, iwanrustendi72@gmail.com²⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v12i2.764>

(Received: June 2022 / Revised: August 2022 / Accepted: August 2022)

Abstrak

Kuat tekan awal pada pasta geopolymer akan tinggi jika menggunakan bantuan perawatan panas. Hal ini karena reaksi geopolimer bersifat endotermik. Ini adalah salah satu hambatan aplikasinya. Paper ini bertujuan memaparkan karakteristik pasta geopolimer-OPC hybrid tanpa perawatan panas. Pasta geopolimer-Portland semen hybrid diperoleh dengan memvariasi prosentase substitusi OPC terhadap *fly ash* yaitu 0%, 5%, 10% dan 15%. Parameter yang ditinjau adalah konsistensi, *Setting time* dan kuat tekan. Hasil pengujian menunjukkan karakteristik pasta geopolimer-OPC hybrid bahwa Nilai konsistensi lebih kecil dari konsistensi normal OPC, Semakin tinggi prosentase substitusi *fly ash setting time* awal dan akhir semakin singkat kurang dari 1 jam, namun kuat tekan semakin meningkat. Hal menunjukkan bahwa geopolimer-OPC hybrid dapat digunakan untuk pekerjaan pengecoran yang membutuhkan waktu pengikatan awal yang singkat misalnya paving blok atau lapisan perkerasan jalan.

Kata kunci: *Karakteristik, Pasta, Geopolimer, Ordinary Portland Cement, Hybrid*

Abstract

Heat treatment on the geopolymer paste can result in high early compressive strength because the geopolymer reaction is endothermic. This condition is one of the obstacles to its application. This article describes the characteristics of geopolymer-Portland cement hybrid pastes without heat treatment. The hybrid geopolymer-Portland cement paste was obtained by varying the percentage substitution of Portland cement to fly ash, namely 0%, 5%, 10%, and 15%. Parameters observed are consistency, setting time, and compressive strength. The results show the characteristics of the hybrid geopolymer-Portland cement paste Its consistency is smaller than standard Portland cement. The higher the percentage of substitution, the initial and the final setting time are shorter, less than one hour, but the compressive strength increases. This shows that hybrid geopolymer-Portland cement can be used for the works that require a short initial setting time, such as paving blocks or road pavement layers.

Keywords: *Characteristic, Paste, Geopolymer, Ordinary Portland Cement, Hybrid*

1. Latar Belakang

Semen portland telah lama digunakan sebagai bahan perekat (*binder*) dalam pembuatan beton. Namun beberapa tahun terakhir penggunaannya menimbulkan masalah akibat dampak lingkungan yang ditimbulkan saat kegiatan produksi semen portland. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa kegiatan pabrik semen melepaskan 1,5 juta ton CO₂ setiap tahun ke udara artinya sekitar 5% total emisi gas CO₂ ke udara (Damtoft dkk, 2008); (Davidovits, 1994). Disamping banyak energi yang dikonsumsi dan menghasilkan limbah yang cukup banyak juga terjadi kerusakan lingkungan terutama di daerah penambangan batu kapur dan tanah liat. Beberapa permasalahan ini tentu sangat bertentangan dengan prinsip pembangunan yang berkelanjutan (*sustainable development*) dalam industri konstruksi. Disamping itu beton yang menggunakan pengikat semen portland juga menghadapi permasalahan durabilitas seperti misalnya reaksi alkali pada agregat yang disertai ekspansi, korosi pada tulangan akibat klorida, karbonasi dan lain sebagainya.

Salah satu parameter yang penting dalam teknologi geopolimer adalah kondisi perawatan yang memiliki pengaruh besar terhadap kekuatan mekanikal dan mikrostruktur dari geopolimer berbasis *fly ash*. Kondisi perawatan (*curing*) ini sangat berperan dalam pengembangan mikrostruktur dan kekuatan pada sistem geopolimer berbasis *fly ash*. Telah diketahui bahwa semen geopolimer berbasis *fly ash*, mengeras lebih lambat pada suhu ruangan dan kekuatan tekan sangat rendah pada umur awal jika dibandingkan dengan perawatan pada suhu panas (Duxson dkk, 2007). Hingga saat ini, semua penelitian terhadap pasta, mortar dan beton geopolimer menunjukkan bahwa untuk mendapatkan sifat mekanikal yang baik, diperlukan suhu perawatan (*curing*) yang berkisar antara 50°C hingga 90°C bahkan lebih dengan kelembaban relatif (RH) berkisar antara 90% atau lebih. Dengan demikian, pengembangan teknologi beton geopolimer hingga saat ini memiliki keterbatasan (*constrain*) dan hanya dimungkinkan pada beton precast yang dapat diatur kondisi perawatannya. Tantangan lain yang masih menghambat yakni ketidakseragaman sifat fisik dan kimia dari material *fly ash* juga mempengaruhi kualitas beton geopolimer.

Beberapa penelitian terkini, mengungkapkan bahwa kuat tekan awal pada sistem geopolimer dapat ditingkatkan melalui beberapa perlakuan. Salah satunya yaitu menambah bahan pengaktif. García-Lodeiro dkk, (2013) dan Rivera dkk., (2013), (Fernández-Jiménez dkk, 2014); (García-Lodeiro dkk, 2011); (García-Lodeiro dkk, 2012); (Palomo dkk, 2013); (Yang dkk, 2012), memperlihatkan bahwa penambahan kalsium oksida pada sistem geopolimer dapat menghasilkan komposit gel antara gel C-S-H dan gel N-A-S-H akibat interaksi antara Ca dengan gel N-A-S-H. Polarisasi Ca²⁺ membentuk ikatan Si-O-Ca akan mendistorsi ikatan Si-O-Al, menimbulkan tegangan yang menyebabkan terputusnya ikatan pada Si-O-Al. Transformasi pembentukan gel berlangsung sebagai berikut: N-A-S-H --> (N,C)-A-S-H --> C-A-S-H. Karena itu transformasi struktur gel ini membutuhkan unsur kalsium dengan konsentrasi yang cukup. Perubahan struktur gel N-A-S-H ini tidak mengganggu stabilitas mekanik material. Ketersediaan unsur aluminium (Al), menyebabkan perubahan gel C-S-H menjadi C-A-S-H. Palomo dkk., (2007), juga memperlihatkan bahwa jenis pengaktif seperti CaO mempengaruhi kuat mekanik. Presipitasi dari gel (CSH dan NASH) berperan untuk *setting time* dan pengerasan. Meija dkk., (2015), mengungkapkan substitusi dengan bahan yang mengandung kalsium tinggi, bermanfaat merubah metode perawatan geopolimer yang biasanya

dirawat dengan suhu yang tinggi menjadi perawatan dapat dilakukan pada suhu normal serta memungkinkan penggunaan fly ash dengan kualitas rendah. Beberapa bahan yang mengandung oksida kalsium tinggi antara lain silicafume, abu sekam padi, metakaolin, slag baja, semen portland, kapur dan beberapa nano partikel. Pada studi ini difokuskan pada penggunaan bahan mengandung oksida kalsium reaktif yang tinggi yaitu Portland semen dengan cara mensubstitusi sebagian *fly ash*. Hal ini karena semen portland mudah diperoleh, banyak tersedia dan ekonomis dan memiliki kandungan kalsium oksida amorf yang tinggi. Hasil penelitian tersebut juga mengungkapkan bahwa kadar oksida kalsium yang tinggi dapat menyebabkan terjadi *flash setting*.

Berdasarkan hal tersebut diatas, walaupun beberapa penelitian tentang penggunaan Portland semen sebagai salah satu bahan substitusi telah memperlihatkan terjadi peningkatan kuat tekan awal, namun hampir semua penelitian tersebut fokus pada fly ash tipe F dengan kadar kalsium oksida kurang dari 8%. Selain itu kadar prosentase substitusi dari beberapa penelitian tersebut sangat variatif bergantung pada kelas fly ash yang digunakan. Sedikit sekali yang membahas sistem geopolimer yang menggunakan *fly ash* dengan kadar kalsium oksida moderat sekitar 8 % hingga 10%. Hasil penelitian kami sebelumnya tentang pasta dan mortar geopolimer berbasis fly ash Kelas CI, membuktikan bahwa sistem geopolimer dengan kadar *fly ash* moderat sekitar 10% dapat dirawat pada suhu ruangan namun kuat tekan awal sangat rendah. Temuan menariknya adalah setelah umur 28 hari, peningkatan kuat tekan sangat signifikan bahkan melebihi kuat tekan pasta semen Portland. Hal ini menyebabkan perlu dilakukan penelitian lanjutan yaitu meningkatkan aktivasi geopolimer sehingga pasta geopolimer dapat dirawat pada suhu ruangan, memiliki kuat tekan awal seperti pasta semen Portland dan kuat tekan setelah 28 hari melebihi kuat tekan pasta semen Portland. Dengan demikian tujuan penelitian ini adalah melakukan studi karakteristik mekanikal pasta semen geopolimer berbasis *fly ash* kelas CI dengan bahan aktivasi tambahan yaitu semen Portland membentuk sistem semen geopolimer-Portland semen hybrid. Studi ini diharapkan dapat memberikan tambahan pengetahuan tentang sistem geopolimer dan kemungkinan aplikasinya.

2. Metode Penelitian

Untuk mengetahui perilaku pasta geopolimer *hybrid* maka dilakukan pengujian yaitu konsistensi normal, *setting time* dan kuat tekan. Detail bahan, metode desain pencampuran, metode uji konsistensi *setting time* dan kuat tekan diuraikan sebagai berikut:

2.1 Bahan

2.1.1 Abu terbang (*fly ash*)

Abu terbang atau selanjutnya disebut *fly ash* yang digunakan berasal dari pembangkit listrik Paiton yang tersedia di supplier lokal Yogyakarta, Indonesia. *Fly ash* ini digunakan sebagai bahan sumber aluminosilikat utama dalam studi eksperimental ini. *Fly ash* ini memiliki warna coklat dan hasil karakterisasi dengan XRF diperoleh senyawa oksida yaitu 37,3% SiO₂, 6,37% Al₂O₃, 40,5% Fe₂O₃, dan 10,7% CaO. Kumulatif senyawa oksida SiO₂, Fe₂O₃ dan Al₂O₃ lebih besar dari 70% sehingga berdasarkan (ASTM C618-12a, 2014) diklasifikasikan sebagai kelas C. Hasil pengujian berat jenis *fly ash* dalam kondisi SSD(Gs) adalah 2,86.

2.1.2 Larutan alkali

Larutan alkali digunakan sebagai pengaktifasi dalam proses geopolimerisasi. Larutan ini disiapkan dengan mencampur larutan natrium hidroksida (SH) dan larutan natrium silikat (SS) sesuai proporsi yang telah ditentukan. Larutan natrium hidroksida dibuat dengan mencampur pelet NaOH ke dalam aquades sesuai molaritas yang diinginkan (M) dan diaduk sampai semua pelet sepenuhnya larut. Pelet NaOH yang digunakan memiliki kemurnian 98%, dan memiliki berat jenis (Gs) adalah 1,52. Larutan natrium silikat (Na₂SiO₃) terdiri dari Na₂O 7,89%, SiO₂ 19,86%, dan 72,25% H₂O. Larutan ini memiliki berat jenis (Gs) adalah 1,59. Larutan alkali yang telah tercampur selanjutnya dibiarkan selama 24 jam sebelum digunakan. Semua bahan kimia dipasok oleh PT Bratachem Bandung. Tidak ada air tambahan atau *superplasticizer* yang ditambahkan.

2.2 Proporsi Campuran Pasta Geopolimer-OPC Hybrid

Campuran pasta geopolimer-OPC *hybrid* dibuat berdasarkan metode volume absolut, dan beberapa parameter ditetapkan konstan antara lain molaritas NaOH adalah 10 M, rasio perbandingan larutan natrium silikat dan sodium hidroksida (R) adalah 2 dan FAS campuran (A) yaitu 0.35.

Desain campuran pasta geopolimer-FA/OPC *hybrid* menggunakan metode perhitungan volume absolut. Campuran pasta geopolimer-FA/OPC *hybrid*, terdiri dari *fly ash* kelas CI (FA), semen portland (OPC), sodium hidroksida (SH), sodium silikat (SS) dan air tambahan (*air-ekst*). Dalam campuran *hybrid* ini, sebagian *fly ash* disubstitusi dengan OPC. Secara teoritis, jika rasio volumetrik dari FA:OP:SS:SH:air_ekst diketahui dan total volume padatnya adalah 1 m³, maka perhitungan mix desain pasta *hybrid* dengan metode volume absolut didasarkan pada persamaan berikut:

$$V_{fa} + V_c + V_{ss} + V_{sh} + V_{air-ekst} = 1 \text{ m}^3 \quad (1)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} V_{fa} &= \text{volume absolut } fly \text{ ash}, \\ V_c &= \text{volume absolut OPC}, \\ V_{ss} &= \text{volume absolut larutan sodium silikat}, \\ V_{sh} &= \text{volume absolut larutan sodium hidroksida}, \\ V_{air-ekst} &= \text{air tambahan}. \end{aligned}$$

Persamaan (1) dapat juga dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{W_{fa}}{G_{s_{fa}} \cdot \gamma_w} + \frac{W_c}{G_{s_c} \cdot \gamma_w} + \frac{W_{ss}}{G_{s_{ss}} \cdot \gamma_w} + \frac{W_{sh}}{G_{s_{sh}} \cdot \gamma_w} + \frac{W_{air-ekst}}{G_{s_w} \cdot \gamma_w} = 1 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} W_{fa} &= \text{adalah berat } fly \text{ ash}, \\ W_c &= \text{berat OPC}, \\ W_{ss} &= \text{berat larutan sodium silikat}, \\ W_{sh} &= \text{berat larutan sodium hidroksida}, \\ W_{air-ekst} &= \text{berat air tambahan}, \\ G_{s_{fa}} &= \text{berat jenis } fly \text{ ash}, \\ G_{s_c} &= \text{berat jenis OPC}, \\ G_{s_{ss}} &= \text{berat jenis larutan sodium silikat}, \end{aligned}$$

- G_{Ssh} = berat jenis larutan sodium hidroksida,
- G_{Sw} = berat jenis air tambahan
- γ_w = berat satuan air.

Jika diketahui beberapa parameter lain seperti rasio antara berat larutan alkali (W_{sh} + W_{ss}) dan berat *sementitious* (W_{fa} + W_c) adalah A, rasio antara berat larutan sodium silikat (W_{ss}) dan berat larutan sodium hidroksida (W_{sh}) adalah R, rasio antara berat OPC (W_c) dan berat *fly ash* (W_{fa}) adalah P maka persamaan 2 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{W_{fa}}{G_{S_{fa}} \gamma_w} + \frac{\frac{W_c}{W_{fa}} W_{fa}}{G_{S_c} \gamma_w} + \frac{\frac{W_{ss}}{W_{fa}} W_{fa}}{G_{S_{ss}} \gamma_w} + \frac{\frac{W_{sh}}{W_{fa}} W_{fa}}{G_{S_{sh}} \gamma_w} + \frac{\frac{W_{air-ekst}}{W_c} \frac{W_c}{W_{fa}} W_{fa}}{G_{S_w} \gamma_w} = 1 \text{ m}^3 \quad (3)$$

Selanjutnya dapat disederhanakan menggunakan parameter rasio A, R, P dan FAS yaitu rasio antara berat air tambahan (W_{air-ekst}) dan berat OPC (W_c). Persamaan tersebut selanjutnya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{W_{fa}}{G_{S_{fa}} \gamma_w} + \frac{PW_{fa}}{G_{S_c} \gamma_w} + \frac{A.R \frac{(1+P)}{(1+R)} W_{fa}}{G_{S_{ss}} \gamma_w} + \frac{A \frac{(1+P)}{(1+R)} W_{fa}}{G_{S_{sh}} \gamma_w} + \frac{FASPW_{fa}}{G_{S_w} \gamma_w} = 1 \text{ m}^3 \quad (4)$$

Dengan mengetahui nilai A, R, P dan FAS maka kita dapat menghitung berat masing – masing bahan penyusun per m³ pasta geopolimer-OPC *hybrid*.

Observasi karakteristik konsistensi dan waktu ikat selanjutnya disebut *Setting time* pasta geopolimer-OPC *hybrid* dilakukan dengan variasi persentase substitusi *fly ash* dengan OPC yaitu 0%, 5%, 10% dan 15%. Label sampel yang digunakan adalah FA10mR2A35P0 artinya FA adalah *fly ash*, 10m adalah molaritas NaOH yaitu 10 molar, R2 adalah rasio sodium silikat terhadap sodium hidroksida yaitu 2, A35 adalah rasio perbandingan berat larutan alkali dengan berat total *sementitious* yaitu 35%, dan P0 adalah berat semen OPC yaitu 0% berat *fly ash*. Detail campuran seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Proporsi campuran pasta geopolimer-OPC *hybrid* dalam kg/m³

No	ID Sampel	Label Sampel	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Abu terbang	Rasio SS/SH	Rasio (SS+SH)/FA
			[SH]	[SS]	[FA]	[R]	[A]
			Gram	Gram	Gram		%
1	GHP0	FA10mR2A35P0	42,47	84,93	364	2	35
2	GHP5	FA10mR2A35P5	42,47	84,93	345,8	2	35
3	GHP10	FA10mR2A35P10	42,47	84,93	327,6	2	35
4	GHP15	FA10mR2A35P15	42,47	84,93	309,4	2	35

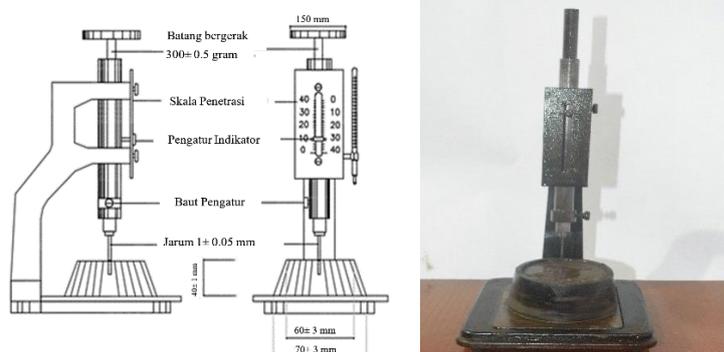
2.3 Perawatan sampel geopolimer-OPC *hybrid*

Setelah campuran pasta dibuat selanjutnya untuk pengujian kuat tekan, sampel dirawat selama umur sampel yang ditetapkan. Proses perawatan menggunakan sistem kering artinya tidak direndam namun sampel hanya diletakkan dalam wadah tertutup agar tidak terjadi proses penguapan berlebihan sehingga dikuatirkan mengganggu proses polimerisasi.

2.4 Konsistensi, *Setting time* dan Kuat tekan

Dalam penelitian ini nilai konsistensi diukur menggunakan Vikat berdasarkan (ASTM C187 – 16, 2016). Tujuannya adalah menentukan jumlah air optimum dalam pembuatan campuran pasta geopolimer-OPC hybrid. Diawali dengan menimbang semen sebanyak berat sampel yang telah dihitung pada Tabel 1. Selanjutnya menyiapkan larutan aktifator. Selanjutnya *fly ash* dan OPC dimasukkan kedalam wadah pencampur dan diaduk selama lebih kurang 3 menit. Menambahkan larutan alkali dan dibiarkan 30 detik lalu diaduk dengan mixer Hobart selama 3 menit. Mengumpulkan pasta yang menempel di dinding mangkok. Pengaduk dijalankan dengan kecepatan sedang selama 1 menit lalu dihentikan dan pasta diambil dengan tangan memakai sarung tangan karet. Membentuk pasta menjadi bola dengan kedua tangan dengan jarak ± 15 cm lalu ditekankan ke dalam lubang yang besar dari cincin vicat. Cincin dengan lubang yang besar ini diletakkan pada plat kaca dan kelebihan pada lubang cincin yang kecil dipotong dengan sekali gerakan menggunakan pisau aduk segitiga dan permukaan cincin dihaluskan dan dihindari penekanan pada pasta. Menempatkan bagian tengah pasta pada cincin tepat di bawah batang peluncur lalu batang peluncur dilepas dan menembus sampai batas 10 ± 1 mm di bawah permukaan pasta.

Waktu pengikatan (*setting time*) pasta geopolimer diukur menggunakan peralatan Vicat seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, menurut standar (ASTM C 191 – 04, 2004). Pengujian *setting time* diawali dengan menimbang bahan seperti pada Tabel 1. Berat larutan aktifator disiapkan seperti pada uji konsistensi. Menyiapkan pasta geopolimer hybrid seperti pada penentuan konsistensi normal. Selesai mencetak, menempatkan benda uji dalam ruang lembab selama 30 menit dan dilakukan pengujian penetrasi dengan jarum vicat yang berdiameter 1 mm. Pengikatan awal ditandai bila jarum Vicat menembus tidak lebih dari 25 mm. pengikatan akhir ditandai bila jarum Vicat tidak membekas pada permukaan benda uji. Pengujian dilakukan pada suhu kamar. Hasil pengukuran diplot pada grafik hubungan antara waktu dan kedalaman penetrasi. Hasil *setting time* yang dilaporkan adalah rata-rata dua spesimen.



Gambar 1 Peralatan vicat

Untuk menentukan kuat tekan pasta maka dilakukan uji kuat tekan terhadap sampel kubus dengan ukuran ($50 \times 50 \times 50$ mm³) sesuai (ASTM 109-99, 1999). Uji kekuatan tekan dilakukan pada usia 3, 7, 28 dan 56 hari dengan spesimen kubus yang ditekan dengan kecepatan 0,33 MPa/s. Pengujian menggunakan mesin uji kuat

tekan Avery Dennison 20 kN seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Tiga spesimen dibuat untuk setiap variabel.

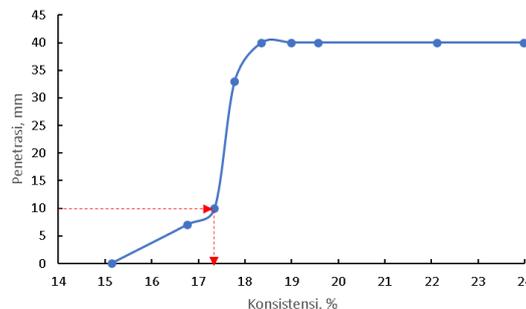


Gambar 2 Peralatan uji tekan

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Uji Konsistensi

Hasil uji konsistensi dapat dilihat pada Gambar 3. Nilai konsistensi diperoleh dari penetrasi hingga kedalaman 10 mm adalah 17.35%. Nilai konsistensi ini digunakan sebagai dasar perancangan mix desain pasta geopolimer-OPC *hybrid*. Nilai konsistensi ini menghasilkan campuran pasta geopolimer-OPC *hybrid* yang terlalu padat dan susah untuk diaduk, hal ini karena media proses terjadinya geopolimerisasi berbeda dengan hidrasi pada semen normal. Pada proses geopolimer dibutuhkan larutan alkali yang terdiri dari sodium hidroksida dan sodium silikat. Penggunaan sodium silikat dengan nilai viskositas yang tinggi akan mempengaruhi sifat kekentalan campuran dan penggunaan OPC tentu akan menambah jumlah oksida CaO sehingga akan menyebabkan terjadinya *flash setting*. karena itu metode konsistensi ini tidak dianjurkan diterapkan untuk penentuan jumlah air dalam campuran pasta geopolimer-OPC *hybrid*.

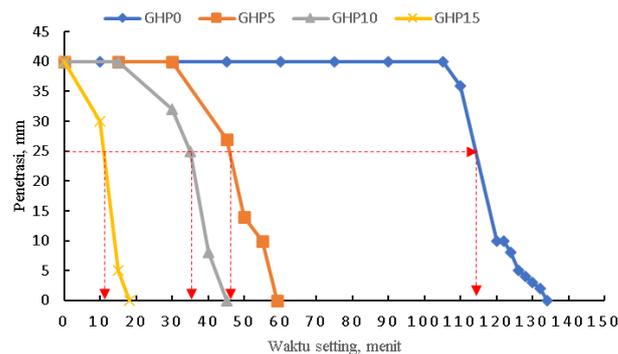


Gambar 3 Hubungan penetrasi dan konsistensi geopolimer-OPC *hybrid*

Gambar 3 memperlihatkan bahwa nilai konsistensi ini lebih kecil dibandingkan terhadap nilai konsistensi pasta semen portland. Hal ini karena bentuk partikel *fly ash* berbentuk bulat sehingga luas permukaan dari partikel *fly ash* lebih kecil dibandingkan dengan luas permukaan partikel semen portland dimana bentuk partikel semen portland berbentuk sudut. Seperti diketahui bahwa reaksi hidrasi dan polimerisasi terjadi pada permukaan partikel sehingga semakin luas permukaan partikel, akan membutuhkan air yang lebih banyak untuk takaran yang sama. Disamping itu bentuk partikel yang bulat akan membantu *workability* campuran dibanding dengan permukaan yang bersudut. Hasil penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian (Antoni dkk, 2020).

3.2 Hasil Uji Waktu Ikat (*Setting Time*)

Hasil uji *Setting time* dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa nilai *setting time* awal (*initial setting time*) untuk masing masing sampel sebagai berikut, GHP0 adalah 115 Menit, GHP5 adalah 45 menit, GHP10 adalah 35 menit, dan GHP15 adalah 12 menit. Waktu ikat akhir (*final setting time*) untuk masing masing sampel sebagai berikut, GHP0 adalah 134 menit, GHP5 adalah 59 menit, GHP10 adalah 45 menit dan GHP15 adalah 18 menit. Berdasarkan hasil pengujian tersebut terlihat bahwa semakin banyak substitusi semen OPC, waktu pengikatan awal dan waktu pengikatan akhir memiliki kecenderungan semakin singkat. Dapat disimpulkan bahwa peningkatan substitusi *fly ash* dengan OPC akan meningkatkan kadar CaO sehingga akan mempercepat proses pengikatan. Waktu pengikatan yang semakin singkat menunjukkan bahwa kadar CaO mempengaruhi proses geopolimer dan proses hidrasi. Hasil pengujian ini sesuai dengan penelitian oleh (Antoni dkk, 2020), yang memperlihatkan bahwa waktu ikat pasta geopolymer semakin singkat, hal ini akibat penggunaan water gelas akan menambah kelekatan campuran sehingga campuran lebih kenyal walaupun nilai *setting time* hampir sama dengan pasta OPC. Karena itu dibutuhkan bahan tambah (*admixture*).



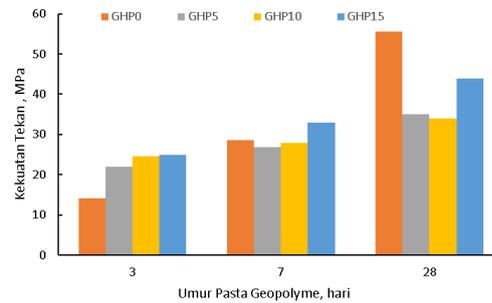
Gambar 4 Hubungan *Setting time* dan penetrasi

3.3 Hasil Uji Kuat Tekan

Hasil uji kuat tekan berdasarkan umur pasta dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan hasil pengujian terlihat bahwa walaupun perawatan sampel hanya dilakukan pada kondisi normal atau tanpa bantuan panas tambahan, sampel geopolimer-OPC *Hybrid* dapat mencapai kekuatan tekan lebih besar dari sampel geopolimer non OPC yaitu sekitar 28 MPa. Namun pada umur 28 hari terlihat bahwa peningkatan kekuatan tekan pada sampel geopolimer lebih tinggi dari sampel geopolimer-OPC *hybrid*. Hal ini memperlihatkan bahwa substitusi *fly ash* dengan OPC tidak memberikan efek peningkatan kuat tekan yang signifikan dibanding sampel geopolimer non OPC.

Peningkatan substitusi OPC terhadap *fly ash* cenderung mengganggu proses polimerisasi dan menurut hasil penelitian Gracia-Lodeiro pasta tersebut akan membentuk komposit geopolimer-OPC dan terlihat kurang berdampak pada peningkatan kuat tekan, namun aktivasi *fly ash* pada suhu ruangan dipercepat dengan kehadiran Portland semen, sehingga terlihat waktu pengikatan semakin singkat. Dibutuhkan penelitian lanjutan yaitu penambahan *superplasticizer* yang

memungkinkan akan meningkatkan *workability* dan kuat tekan. Hasil penelitian ini sesuai dengan hasil penelitian antoni dkk, 2020, (Hadi dkk, 2019) dan (Topark-Ngarm dkk, 2015)



Gambar 5 Hubungan kuat tekan dan umur Sampel

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, konsistensi campuran geopolimer-OPC *Hybrid* lebih kecil dari konsistensi dari pasta semen Portland. Hasil uji waktu pengikatan menunjukkan semakin besar substitusi *fly ash* dengan semen Portland maka waktu *setting* awal dan akhir semakin singkat sehingga tidak layak digunakan sebagai pengikat seperti pasta geopolimer maupun pasta semen Portland. Namun dapat digunakan untuk tujuan tertentu yang membutuhkan *setting time* yang lebih cepat namun dengan kuat tekan awal yang tinggi. Hal ini didukung oleh hasil pengujian kuat tekan yang mencapai 27 Mpa pada umur 3 hari dan mencapai 45 MPa pada umur 28 hari. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai karakteristik pasta yang menggunakan *plasticizer*.

4.2 Saran

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui jenis *superplasticizer* yang sesuai sehingga waktu ikat awal dan akhir dapat diperlambat.

Ucapan Terima Kasih

Kementrian Pendidikan Tinggi dan Ristek dalam rangka membantu pendanaan penelitian ini.

Daftar Kepustakaan

- Antoni, A. et al, 2020. Fresh and Hardened Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Matrix with High Dosage of Borax, Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering, 44(0123456789), hal. 535–543. doi: 10.1007/s40996-019-00330-7.
- ASTM 109-99, 1999. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, ASTM 109, hal. 1–6.
- ASTM C 191 – 04, 2004. Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle 1.

- ASTM C187 – 16, 2016. Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste, ASTM International, hal. 1–3. doi: 10.1520/C0187-16.2.
- ASTM C618-12a, 2014. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, hal. 1–5. doi: 10.1520/C0618.
- Damtoft, J. S. et al, 2008. Sustainable development and climate change initiatives, *Cement and Concrete Research*, 38(2), hal. 115–127. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008.
- Davidovits, J, 1994. Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries, *World Resource Review*, 6(2), hal. 263–278.
- Duxson, P. et al, 2007. Geopolymer technology: The current state of the art, *Journal of Materials Science*, 42(9), hal. 2917–2933. doi: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- Fernández-Jiménez, A. et al, 2014. Specific examples of hybrid alkaline cement, *MATEC Web of Conferences*, 11, hal. 2–4. doi: 10.1051/mateconf/20141101001.
- Garcia-Lodeiro, I. et al, 2011. Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na₂O-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O, *Cement and Concrete Research*, 41(9), hal. 923–931. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.05.006.
- García-Lodeiro, I. et al, 2012. Hybrid alkaline cements. Part I: Fundamentals, *Revista Romana de Materiale/ Romanian Journal of Materials*, 42(4), hal. 330–335.
- Hadi, M. N. S., Zhang, H. dan Parkinson, S, 2019. Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability, *Journal of Building Engineering*, 23(November 2018), hal. 301–313. doi: 10.1016/j.job.2019.02.006.
- Palomo, Á. et al, 2013. Cimenturi Hibride Alcaline . Partea a II-a : Factorul Clincher Hybrid Alkaline Cements . Part I: Fundamentals, *Romanian Journal of materials*, 43(1), hal. 74–80.
- Topark-Ngarm, P., Chindaprasirt, P. dan Sata, V, 2015. Setting Time, Strength, and Bond of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), hal. 1–7. doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001157.
- Yang, K. H., Cho, A. R. dan Song, J. K, 2012. Effect of water-binder ratio on the mechanical properties of calcium hydroxide-based alkali-activated slag concrete, *Construction and Building Materials*, 29, hal. 504–511. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.062.