

# Pengaruh Penambahan *Borax* terhadap *Setting Time* Pasta *Geopolymer* Berbahan Dasar *Fly Ash* dan *Ground Granulated Blast Furnace Slag*

Mhargareta Putri<sup>1</sup>, Iman Satyarno<sup>1\*</sup>, Djoko Sulistyono<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

\*Corresponding author: imansatyarno@ugm.ac.id

## INTISARI

Beton *geopolymer* merupakan salah satu solusi untuk mengatasi emisi gas CO<sub>2</sub> yang tinggi akibat penggunaan material semen. Dalam penerapannya penggunaan beton *geopolymer* ini memiliki beberapa kekurangan antara lain *workability* yang rendah dan *flash setting* yang sering terjadi pada campuran. Dalam penelitian ini beberapa parameter diinvestigasi pengaruhnya terhadap *setting time* pasta *geopolymer*, parameter yang diselidiki adalah molaritas sodium hidroksida dari 10 M hingga 14 M dengan peningkatan setiap 2 M, perbandingan *alkali/(FA+GGBFS)* (*A*) yaitu 0,35 dan 0,45, perbandingan *FA/GGBFS* yaitu 50:50 dan 70:30, perbandingan larutan alkali (*R*) yaitu 1,5 dan 2, dan perbandingan penggunaan *borax* yaitu 1%, 3%, dan 5% untuk menyelidiki pengaruh yang ditimbulkan terhadap *setting time* dan kuat tekan. Penambahan *borax* terbukti dapat meningkatkan *initial setting time* hingga 30 menit pada variasi rasio 5%. Meskipun *borax* dapat meningkatkan *setting time*, namun penggunaan *borax* ini memiliki kelemahan yaitu dapat menurunkan kuat tekan, pada persentase 0% yaitu 94,54 MPa dan pada persentase 5% mengalami penurunan menjadi 60,96 MPa.

**Kata kunci:** Pasta *geopolymer*, *fly ash* (*FA*), *ground granulated blast furnace slag* (*GGBFS*), *setting time*.

## 1 PENDAHULUAN

Produksi semen *portland* sebagai bahan dasar beton dapat menyumbang emisi gas mencapai 7% dari total emisi gas di dunia, dikhawatirkan seiring dengan pembangunan infrastruktur yang meningkat juga memicu peningkatan kadar gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) (Neupane, 2018). Penggunaan material substitusi dalam *geopolymer* untuk menggantikan semen merupakan salah satu solusi menurunkan emisi gas yang dapat dihasilkan dalam proses pembuatan semen. Dengan menggunakan produk abu yang berasal dari industrial dan agrikultural, beton *geopolymer* dapat dijadikan sebagai solusi untuk menggantikan beton dengan penggunaan semen *portland*. Material substitusi abu yang dapat digunakan dalam pembuatan beton *geopolymer* ini bervariasi mulai dari *fly ash*, *ground granulated blast furnace slag* (*GGBFS*), hingga *rice husk ash*. Pada proses pembuatan beton menggunakan semen, emisi gas karbon dioksida berasal dari proses kalsinasi dari mineral yang melibatkan ekstraksi mineral, penggilingan, dan pengangkutan material (Ahmed, Mohammed and Mohammed, 2022), sedangkan pada proses pembuatan beton dengan material substitusi, emisi karbon dioksida ini hanya dihasilkan pada proses pengangkutan material, sehingga beton *geopolymer* ini dapat menghasilkan emisi gas 80% lebih kecil dari semen *portland* (Duxson *et al.*, 2007).

Pada beberapa penelitian penggunaan *fly ash* dengan kandungan kalsium yang tinggi menunjukkan *workability* yang rendah dikarenakan komposisi pasta yang terlalu kohesif selain itu terjadi *flash setting* yang sangat cepat, dan kekuatan yang dihasilkan tidak terlalu tinggi (Phoo-ngernkham *et al.*, 2014). Pada penggunaan *fly ash* dengan kadar kalsium yang tinggi sebagai material beton *geopolymer*, terdapat kesulitan pada saat pembuatannya yaitu terjadinya *flash setting*. *Flash setting* merupakan suatu keadaan dimana proses pengerasan atau waktu *setting* terjadi sangat cepat, hanya beberapa menit setelah penambahan larutan alkali (Antoni *et al.*, 2017). Proses *flash setting* ini dapat terjadi akibat tingginya kandungan kalsium (CaO) pada *fly ash*, tingginya konsentrasi NaOH pada larutan alkali, rasio antara larutan alkali dan material *fly ash*, rasio larutan alkali, perawatan, dan bahan tambah mineral (Antoni *et al.*, 2017; Cornelis *et al.*, 2018). Penambahan bahan tambah *borax* pada campuran beton *geopolymer* dengan persentase kecil sebesar 1-7% diamati dapat menunda *initial* dan *final setting time* dan kuat tekan pada campuran beton *geopolymer* berbahan dasar *fly ash* (Nazari *et al.*, 2014; Antoni *et al.*, 2016). Namun, pada penelitian yang dilakukan oleh Wong *et al.*, (2023) penggunaan dosis *borax* dari 3% menjadi 6% dapat menurunkan kuat tekan hingga 22%, peningkatan dalam volume penambahan *borax* ini dapat membentuk boron oksida (B-O) yang dapat menginterupsi reaksi *geopolymerization* dan proses hidrasi pada beton *geopolymer*. Sebagai solusi dari masalah tersebut penggunaan dua jenis bahan mineral dalam satu campuran sering digunakan karena dapat memperbaiki sifat fisik dan mekanik beton *geopolymer*, serta dapat menyeimbangkan kelemahan dari bahan mineral lainnya. Penelitian yang dilakukan oleh Teo *et al.*, (2022) mengenai pengaruh penambahan *GGBFS* pada beton *geopolymer* dengan material *fly ash* kelas C dengan perawatan pada temperatur ruangan. Material yang digunakan pada penelitian tersebut adalah

*fly ash* kelas C, GGBFS, dan *metasilicate anhydrous*. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, terbukti bahwa penambahan bahan tambah GGBFS dapat meningkatkan kuat tekan dikarenakan kereaktifan kandungan Ca pada GGBFS yang dibuktikan dengan hasil kuat tekan yang mencapai 90 MPa pada umur 28 hari.

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Sasui *et al.*, (2019) menyelidiki pengaruh dua jenis material dalam beton *geopolymer* dengan penggunaan alkali aktivator yang berbeda yaitu penggunaan satu jenis alkali berupa sodium hidroksida dan penggunaan dua jenis alkali berupa sodium hidroksida yang dicampur dengan sodium silikat. Berdasarkan pengujian yang dilakukan pada spesimen diketahui bahwa penurunan jumlah *fly ash* dan peningkatan GGBFS menyebabkan matriks menjadi homogen dan lebih padat karena kurang atau tidak adanya reaktivitas *fly ash*. Hal ini mendukung hasil yang menunjukkan peningkatan kekuatan dengan pengurangan kandungan *fly ash*. Sementara itu, matriks yang ikatannya lebih lemah terlihat pada sampel dengan kandungan *fly ash* yang lebih tinggi sehingga menyebabkan porositas pada matriks. Pada penelitian ini, pengaruh penambahan *borax* pada pasta *geopolymer* yang optimum diselidiki, penambahan *borax* pada persentase 1% hingga 5% dapat memperlambat *initial setting time*. Apabila *flash setting* pada pencampuran beton *geopolymer* dapat diatasi dengan penggunaan *borax* dapat dianalisa, material ini dapat dimanfaatkan sebagai pengganti semen yang dapat menciptakan alternatif untuk material konstruksi dengan kualitas dan durabilitas yang lebih tinggi.

## 2 METODELOGI PENELITIAN

Pengaruh variabel penelitian yang ditentukan berdasarkan studi literatur dibuktikan dengan menggunakan metode eksperimental. Metode eksperimental dilakukan dengan menguji pasta *geopolymer* berdasarkan *setting time* dan kuat tekan untuk menentukan campuran paling optimum. Lokasi penelitian dan pengujian spesimen dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan Departemen Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada.

### 2.1 Material

*Fly ash* dengan kandungan kalsium tinggi yang digunakan pada penelitian ini berasal dari PLTU Paiton, Jawa Timur, Indonesia dengan kandungan kimia pada Tabel 2.1. Berdasarkan Tabel 2.1 dapat diketahui bahwa *fly ash* yang digunakan dikategorikan sebagai *fly ash* kelas C, dengan kumulatif  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yang melebihi 70% (ASTM C 618). Material *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) yang digunakan berasal dari PT. Krakatau Semen Indonesia dengan kandungan kimia pada Tabel 2.1. Penggunaan larutan alkali sebagai aktivator membuat *fly ash* dan GGBFS memiliki sifat *cementitious*. Pada penelitian ini digunakan dua larutan alkali yaitu sodium hidroksida dan sodium silikat, dan bahan tambah (*admixture*) *borax* yang digunakan pada penelitian ini memiliki kemurnian 99,9% dengan kandungan  $\text{B}_2\text{O}_3$  sebesar 48-49,35% dan memiliki rentang ukuran partikel sebesar 0,075-1,180 yang berasal dari produksi *Eti Maden*.

Tabel 2.1 Kandungan kimia material material

Komponen (% mass)	Fly Ash	Ground Granulated Blast Furnace Slag
$\text{Al}_2\text{O}_3$	23,8	15,45
$\text{SiO}_2$	48,7	36,52
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	11,0	0,98
$\text{CaO}$	12,7	44,38
$\text{SO}_3$	1,34	0,07
$\text{K}_2\text{O}$	0,97	0,33

### 2.2 Proporsi Pencampuran, Persiapan, dan Pengadukan

Metode eksperimental dilakukan dengan membuat pasta *geopolymer* untuk mengetahui *setting time* dan kuat tekan dengan pengaruh berbagai variasi variabel yang diselidiki. Perancangan komposisi menggunakan metode absolut volume karena belum memiliki standar yang mengatur mengenai perancangan beton *geopolymer*, sehingga pada penelitian ini digunakan metode yang merujuk pada penelitian Satyarno *et al.*, (2014) dengan menggunakan metode absolut volume pada Persamaan (1) (Satyarno *et al.*, 2014). Proporsi pengadukan dibagi menjadi dua tahap yaitu tahap pertama menyelidiki pengaruh variabel molaritas sodium hidroksida, perbandingan *alkali/(FA+GGBFS)* (*A*), perbandingan *FA/GGBFS*, dan perbandingan larutan alkali (*R*) untuk proporsi campuran yang optimum. Pada proporsi pengadukan tahap kedua menyelidiki pengaruh variabel rasio *borax* terhadap *setting time* dan kuat tekan pasta *geopolymer*. Proporsi kedua tahap campuran dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

$$\frac{W_{fa}}{G_{Sfa}\gamma_w} + \frac{B \cdot W_{ggbfs}}{G_{Sggbfs}\gamma_w} + \frac{A \cdot R(1+B)}{(1+R)} \frac{W_s}{G_{Sss}\gamma_w} + \frac{A(1+B)}{(1+R)} \frac{W_s}{G_{Ssh}\gamma_w} = 1m^3 \tag{1}$$

Pembuatan larutan alkali dilakukan dengan melarutkan *flakes* NaOH dengan akuades sesuai dengan molaritas yang ditentukan, kemudian menambahkan bahan tambah *borax* dengan persentase yang ditentukan ketika larutan masih hangat dan didinginkan selama satu hari sebelum pencampuran dilaksanakan. Volume *borax* dihitung berdasarkan persentase yang digunakan terhadap volume *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* dalam campuran. Pelarutan antara kedua larutan alkali dilakukan sebelum pencampuran dengan material kering sesuai dengan rasio *R* yang telah ditetapkan sebelumnya. Pengadukan dilakukan dengan mencampurkan seluruh bahan material yang bersifat kering terlebih dahulu lalu ditambahkan larutan alkali aktivator kedalam campuran dan diaduk selama ± 4 menit.

Tabel 2.2 Proporsi pencampuran pasta *geopolymer* tahap 1

Kode Benda Uji	Rasio Molaritas	Fly Ash	GGBFS	Rasio Alkali/ (FA+GGBFS)	Rasio Alkali Aktivator
	(M)	(%)	(%)	(A)	(R)
F50G50M14A35R2	14	50	50	0,35	2
F50G50M12A35R2	12	50	50	0,35	2
F50G50M10A35R2	10	50	50	0,35	2
F50G50M10A35R2	10	50	50	0,35	2
F70G30M10A35R2	10	70	30	0,35	2
F50G50M10A45R2	10	50	50	0,45	2
F70G30M10A45R2	10	70	30	0,45	2
F70G30M10A45R2	10	70	30	0,45	2
F70G30M10A45R1,5	10	70	30	0,45	1,5

Tabel 2.3 Proporsi pencampuran pasta *geopolymer* tahap 2

Kode Benda Uji	Rasio Molaritas	Fly Ash	GGBFS	Rasio Alkali/ (FA+GGBFS)	Rasio Alkali Aktivator	<i>Borax</i>
	(M)	(%)	(%)	(A)	(R)	(%)
PG 0 %	10	70	30	0,45	1,5	0
PG 1 %	10	70	30	0,45	1,5	1
PG 3 %	10	70	30	0,45	1,5	3
PG 5 %	10	70	30	0,45	1,5	5

### 2.3 Pencetakan, Perawatan dan Pengujian

Pengujian *setting time* dilakukan segera setelah pencampuran dengan menggunakan alat *vicat needle apparatus* berdasarkan ASTM C191 2004 pada temperatur ruangan. *Initial setting time* ditentukan ketika penetrasi jarum *vicat* menunjukkan kedalaman 25 mm, sedangkan *final setting* dicatat ketika tidak ada penetrasi lagi yang terjadi. Pasta *geopolymer* yang masih segar dicetak ke dalam cetakan kubus 50 mm, setelah dicetak selama 1 hari kemudian sampel dilakukan perawatan pada temperatur ruangan dengan dibungkus plastik, kemudian pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 1, 7, dan 28 hari berdasarkan ASTM C109.

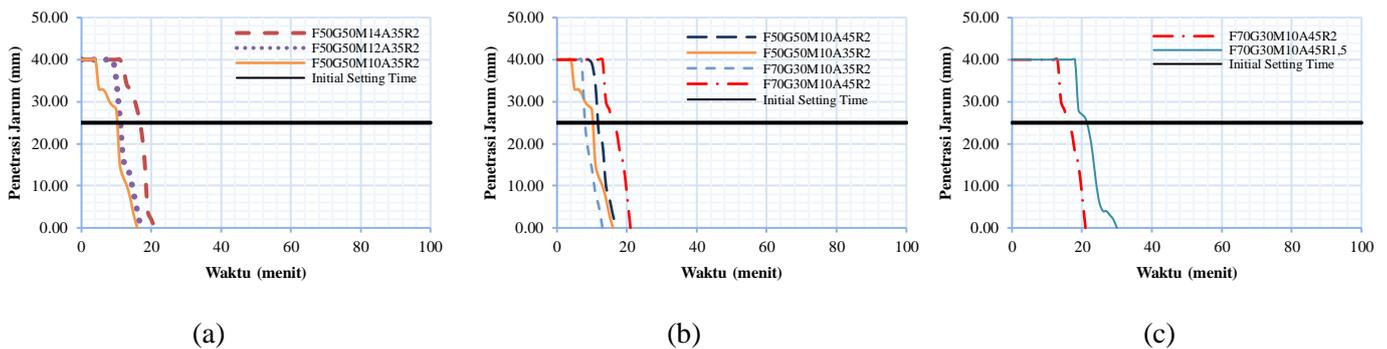
## 3 HASIL PENELITIAN

Berdasarkan metode eksperimental yang telah dilakukan diperoleh hasil pengujian *setting time* dan kuat tekan yang dipengaruhi oleh variasi variabel penelitian.

### 3.1 *Setting time* Pasta *Geopolymer*

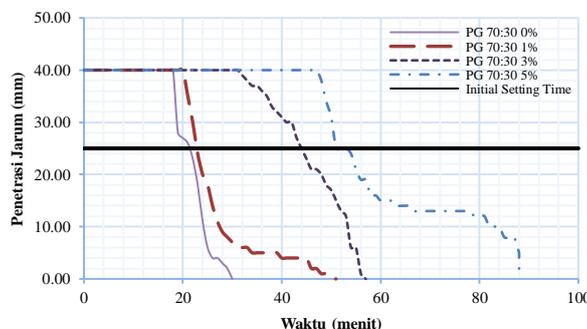
*Setting time* diukur dengan menggunakan *vicat needle apparatus*, pada pengujian ini dapat diketahui durasi waktu dari beton segar menuju *final setting*. Pada Gambar 3.1 (a) menunjukkan pengaruh variasi molaritas NaOH terhadap *setting time* pasta *geopolymer*. Peningkatan molaritas pada NaOH berbanding lurus terhadap penundaan *initial setting time*. Hal ini ditunjukkan dengan *initial setting time* yang terjadi pada variabel 10 M dan 12 M yaitu 11 menit dan 12 menit, sedangkan pada variabel 14 M yaitu 17 menit. Meskipun penundaan *initial setting time* ini tidak terlalu signifikan, namun penundaan *setting time* ini diiringi dengan rendahnya *workability* pada campuran pasta akibat konsentrasi yang tinggi pada larutan NaOH. Sunarsih *et al.*, (2023) menyebutkan peningkatan waktu *initial* dan *final*

*setting time* pada pasta *geopolymer* ini disebabkan pada molaritas tinggi proses disolusi senyawa alumina dan silika pada material *fly ash* dan GGBFS lebih baik, namun proses *leaching* senyawa kalsium terhambat sehingga dapat menunda dan meningkatkan *initial* dan *final setting time*. Mempertimbangkan *workability* yang rendah dan kesulitan pengadukan pada campuran pasta dan beton *geopolymer*, molaritas optimum yang paling cocok untuk digunakan selanjutnya adalah molaritas 10 M. Pada Gambar 3.1 (b) menunjukkan pengaruh rasio A yaitu *alkali/(FA+GGBFS)* dengan nilai 0,35 dan 0,45, serta rasio *FA/GGBFS* dengan nilai 50:50 dan 70:30. Pengaruh kedua variasi rasio menunjukkan bahwa meningkatnya rasio A dan persentase GGBFS pada campuran dapat menunda *initial* dan *final setting time* pada pasta *geopolymer*, *initial setting time* pada nilai A 0,45 dan persentase GGBFS sebesar 30% menunjukkan *workability* dan *initial* serta *final setting time* paling optimum dibandingkan rasio pencampuran lain yaitu pada menit ke 16 dan menit ke 21 untuk *initial* dan *final setting time*. Pada Gambar 3.1 (c) menunjukkan pengaruh variabel rasio R yaitu (*sodium silikat/sodium hidroksida*) pada campuran dengan hasil *initial setting time* pada rasio 2 dan 1,5 yaitu 16 dan 22 menit. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa kecepatan proses *geopolymerization* dapat dipengaruhi oleh kandungan senyawa kalsium, alumina, dan silikat yang berada pada setiap material dalam campuran pasta *geopolymer* (Dave et al., 2017; Cornelis et al., 2018; Astariani et al., 2021; Zhong et al., 2022; Sunarsih et al., 2023). Berdasarkan hasil penelitian, pasta *geopolymer* dengan rasio paling optimum berada pada campuran dengan molaritas 10 M, rasio A 0,45, perbandingan *FA/GGBFS* 70:30, dan rasio R 1,5 dengan *initial* dan *final setting time* pada menit ke 22 dan 30. Hasil *initial setting time* ini belum mencukupi waktu yang dibutuhkan untuk membuat beton di lapangan, maka diperlukan bahan tambah (*admixture*) yang dapat memperlambat waktu *initial* dan *final setting time* pada pasta *geopolymer*, *borax* digunakan sebagai bahan tambah yang dapat memperlambat *initial* dan *final setting time* (Antoni et al., 2016, 2020).



Gambar 3.1 *Setting time* pasta *geopolymer* terhadap pengaruh (a) molaritas NaOH; (b) rasio A dan rasio *FA/GGBFS*; (c) rasio R

Pada Gambar 3.2 (a) menunjukkan dengan adanya penambahan *borax* dapat meningkatkan durasi waktu pengerasan. Pada sampel dengan kandungan *borax* sebesar 0% diketahui bahwa *initial setting time* yang dihasilkan selama 22 menit, kemudian *initial setting time* menunjukkan terjadinya peningkatan seiring dengan adanya penambahan *borax* dengan pertambahan durasi waktu pengerasan masing-masing untuk 1%, 3% dan 5% menjadi 23, 44, dan 52 menit. Antoni et al., (2016) juga mengkonfirmasi hal ini dengan menunjukkan peningkatan sekitar 10-20% pada *setting time* seiring dengan penambahan volume *borax* pada larutan alkali sebagai aktivator.

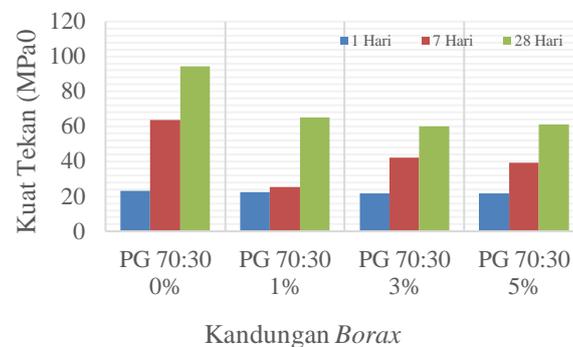


Gambar 3.2 *Setting time* pasta *geopolymer* terhadap pengaruh *borax*

Pada proses hidrasi semen *borax* dapat memperlambat proses pembentukan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dengan membentuk formasi baru dengan CH, sedangkan pada pasta *geopolymer borax* diduga dapat mengintervensi reaksi *geopolymerization* saat terjadi pencampuran pasta *geopolymer* yang memungkinkan proses pembentukan gel polimerisasi terbentuk lebih lambat, kemudian ketika gel polimerisasi terbentuk, terjadi proses pengerasan dengan cepat pada saat pasta menuju proses *final set* (Davraz, 2010; Kusbiantoro *et al.*, 2013). Pengerasan beton *geopolymer* yang terjadi secara mendadak dapat dilihat pada grafik pasta *geopolymer* dengan kandungan *borax* 0% yang menunjukkan penetrasi jarum yang berkurang secara mendadak pada menit ke 19. Selain dapat meningkatkan waktu *setting time*, penambahan *borax* dapat membuat larutan alkali menjadi sangat kental dan mudah mengkristal yang dapat mengakibatkan adukan pasta *geopolymer* sulit diaduk.

### 3.2 Kuat Tekan Pasta *Geopolymer*

Pengujian kuat tekan dilakukan berdasarkan standar ASTM C109. Pada Gambar 3.3 (a) dapat diamati bahwa kuat tekan dari pasta *geopolymer* menunjukkan penurunan kuat tekan seiring dengan penambahan *borax* pada larutan alkali dari pasta *geopolymer* hingga presentase 3% dan sedikit meningkatkan kuat tekan pada presentase 5%, hal ini dapat disebabkan oleh proses pengerasan yang diperlambat oleh *borax* sehingga pertumbuhan kuat tekan mengalami penurunan. Pada pasta yang tidak ditambah dengan *borax* memiliki kekuatan 94,54 MPa, pada penambahan 1% yaitu 65,12 MPa, pada 3% dan 5% yaitu 60,06 dan 60,96 MPa.



Gambar 3.3 Kuat tekan dengan variasi persentase *borax*

Perbandingan antara pasta yang menggunakan *borax* dan yang tidak menggunakan *borax* terjadi perbedaan yang cukup signifikan, hal ini dapat dikarenakan pada saat pencampuran terjadi proses *geopolymerization* yang diintervensi oleh adanya penambahan *borax*, sehingga dapat menyebabkan terjadinya pembentukan senyawa baru yang memungkinkan untuk memiliki kekuatan lebih rendah dibandingkan senyawa yang seharusnya terbentuk tanpa adanya *borax* (Davraz, 2010).

## 4 KESIMPULAN DAN SARAN

Peningkatan *initial* dan *final setting time* dalam campuran pasta berbanding lurus dengan meningkatnya nilai A dan molaritas NaOH pada campuran yang digunakan, namun *initial* dan *final setting time* campuran pasta berbanding terbalik dengan penambahan persentase volume GGBFS dan nilai R dalam campuran. Hal ini dapat diakibatkan oleh pengaruh kandungan senyawa kalsium, alumina, dan silikat yang berada pada setiap material terhadap proses *geopolymerization* dalam campuran pasta *geopolymer* (Dave *et al.*, 2017; Cornelis *et al.*, 2018; Astariani *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2022; Sunarsih *et al.*, 2023). *Initial* dan *final setting time* paling optimum dalam campuran dicapai dengan molaritas 10 M, nilai A 0,45, perbandingan FA/GGBFS 70:30, dan nilai R 1,5 dengan *initial* dan *final setting time* pada menit ke 22 dan 30. Penambahan *borax* terbukti dapat meningkatkan *setting time* seiring dengan adanya peningkatan pada persentase kandungan *borax* dalam larutan alkali aktivator. Peningkatan waktu *setting time* diiringi dengan adanya kekurangan yaitu penurunan kuat tekan yang cukup signifikan akibat pembentukan senyawa baru dari intervensi *borax* dalam reaksi polimerisasi dan adukan yang semakin kohesif. Pasta *geopolymer* dengan rasio optimum dengan penambahan *borax* berada pada molaritas 10 M, nilai A 0,45, perbandingan FA/GGBFS 70:30, nilai R 1,5, dan persentase *borax* sebesar 3% dengan *initial* dan *final setting time* pada menit ke 43 dan 56, serta kuat tekan pasta sebesar 60,06 MPa. Penggunaan *borax* dalam campuran pasta *geopolymer* ini perlu diselidiki struktur kimia dan mikrostrukturnya untuk mengetahui lebih jelas pengaruh penggunaan *borax*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ucapkan terima kasih kepada PT. Krakatau Semen Indonesia yang telah memberikan dukungan material dalam penelitian ini.

## REFERENSI

- Ahmed, H.U., Mohammed, A.A. and Mohammed, A. (2022) ‘Soft computing models to predict the compressive strength of GGBS/FAgeopolymer concrete’, *PLoS ONE*, 17(5 5). Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0265846>.
- Antoni *et al.* (2017) ‘Effect of adding acid solution on setting time and compressive strength of high calcium fly ash based geopolymer’, in *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics Inc. Available at: <https://doi.org/10.1063/1.5003525>.
- Antoni, A. *et al.* (2016) ‘The use of borax in deterring flash setting of high calcium fly ash based geopolymer’, in *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, pp. 416–420. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.857.416>.
- 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, pp. 535–543. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00330-7>.
- Astariani, N.K. *et al.* (2021) ‘Setting time of geopolymer binder based on Umeanyar slate stone powder’, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing Ltd. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/871/1/012002>.
- Cornelis, R. *et al.* (2018) ‘The Investigation on Setting Time and Strength of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer’, *Applied Mechanics and Materials*, 881, pp. 158–164. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.881.158>.
- Dave, N. *et al.* (2017) ‘Setting time and standard consistency of quaternary binders: The influence of cementitious material addition and mixing’, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), pp. 30–36. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.10.004>.
- Davraz, M. (2010) *The Effects of Boron Compounds on the Properties of Cementitious Composites*. Senirkent.
- Duxson, P. *et al.* (2007) ‘The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete”’, *Cement and Concrete Research*, 37(12), pp. 1590–1597. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.018>.
- Kusbiantoro, A. *et al.* (2013) ‘Development of Sucrose and Citric Acid as the Natural based Admixture for Fly Ash based Geopolymer’, *Procedia Environmental Sciences*, 17, pp. 596–602. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.075>.
- Nath, P. and Sarker, P.K. (2014) ‘Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition’, *Construction and Building Materials*, 66, pp. 163–171. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>.
- Nazari, A.; *et al.* (2014) *Swinburne Research Bank Characteristics of boroaluminosilicate geopolymers*. Available at: <http://www.emeraldinsight.com/journal/jaoc>  
<http://www.emeraldinsight.com/journal/jaoc>
- Neupane, K. (2018) ‘High-Strength Geopolymer Concrete- Properties, Advantages and Challenges’, *Advances in Materials*, 7(2), p. 15. Available at: <https://doi.org/10.11648/j.am.20180702.11>.
- Phoo-ngernkham, T. *et al.* (2014) ‘The effect of adding nano-SiO<sub>2</sub> and nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on properties of high calcium fly ash geopolymer cured at ambient temperature’, *Materials & Design*, 55, pp. 58–65. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.049>.
- Sasui, S. *et al.* (2019) ‘Strength and Microstructure of Class-C Fly Ash and GGBS Blend Geopolymer Activated in NaOH & NaOH + Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>’, *Materials*, 13(1), p. 59. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma13010059>.

Satyarno, I. *et al.* (2014) 'Practical method for mix design of cement-based grout', in *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, pp. 356–365. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.194>.

Sunarsih, E.S. *et al.* (2023) 'The effect of sodium hydroxide molarity on setting time, workability, and compressive strength of fly ash-slag-based geopolymer mortar', in *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2556/1/012019>.

Teo, W. *et al.* (2022) 'Experimental Investigation on Ambient-Cured One-Part Alkali-Activated Binders Using Combined High-Calcium Fly Ash (HCFA) and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)', *Materials*, 15(4). Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15041612>.

Wong, C.L. *et al.* (2023) 'Properties of high calcium fly ash geopolymer incorporating recycled brick waste and borax', *Hybrid Advances*, p. 100130. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100130>.

Zhong, Q. *et al.* (2022) 'Investigation of Setting Time and Microstructural and Mechanical Properties of MK/GGBFS-Blended Geopolymer Pastes', *Materials*, 15(23). Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15238431>.