

Kinerja Pozzolan Glasspowder Pada Karakteristik Mekanis dan Fisis Paving Blok Geopolimer

Muhammad Sofyan*¹, Amry Dasar², Ade Okvianti Irlan³, Irma Wirantina K⁴, Rr
Mekar Ageng Kinasti⁵, Velizar Sujanes⁶, Aswar Amiruddin⁷

^{1,4,5,6}Program Studi Teknik Sipil, FTIK Institut Teknologi PLN, Jakarta

³Program Studi Teknik Sipil, FTSP Universitas Trisakti, Jakarta

⁷Program Studi Teknik Sipil, FT Universitas Borneo, Tarakan

e-mail: *¹m.sofyan@itpln.ac.id

Received 17 January 2023; Reviewed 14 February 2023; Accepted 09 March 2022

Journal Homepage: <http://jurnal.borneo.ac.id/index.php/borneoengineering>

Doi: <https://doi.org/10.35334/be.v1i1.3318>

Abstract

Fly ash is one of the pozzolanic materials derived from coal combustion. However, unlike Portland cement, fly ash does not have the capacity to bond. An activator solution, such as Portland cement, is required so that fly ash can have binding capability. Glass trash from industry and homes, in addition to fly ash, may be processed to be utilized as a material that can increase the performance of geopolymer materials since it contains considerable silica (SiO₂) and lime (CaO) components. Glass powder was utilized as a fly ash alternative in geopolymer paving blocks in percentages of 0%, 15%, 30%, 45%, and 60%. The compressive strength and water absorption of paving blocks were examined. When the material was 7 days, the test was performed. The findings revealed that the best compressive strength was found in paving block geopolymer with 15% glass powder variation and 85% fly ash variation, namely 30.67 MPa, which comprised paving block quality B. The lowest water absorption was reported in paving block geopolymer with 15% variation in glass powder. The paving blocks manufactured in this study were of B quality, according to SNI 03-0691-1996.

Keywords: Paving Block, Geopolymer, Glass Powder, Fly Ash.

Abstrak

Fly ash merupakan salah satu bahan pozzolan yang diperoleh dari limbah hasil pembakaran batu bara. fly ash pada dasarnya tidak memiliki kemampuan mengikat seperti semen portland. Dibutuhkan larutan aktivator agar fly ash dapat memiliki daya ikat seperti semen portland. Selain fly ash, limbah kaca dari industri maupun rumah tangga dapat diolah untuk dapat dimanfaatkan sebagai material yang dapat memperbaiki kinerja bahan geopolimer karena mengandung senyawa silika (SiO₂) dan zat kapur (CaO) yang cukup signifikan. Penelitian berfokus pada glass powder yang digunakan sebagai substitusi fly ash pada paving blok geopolimer dengan persentase 0%, 15%, 30%, 45% dan 60%. Kinerja paving blok diuji berdasarkan kuat tekan dan penyerapan air. Pengujian dilakukan pada saat sampel berumur 7 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kuat tekan optimum terdapat pada paving block geopolymer dengan variasi glass powder 15% dan fly ash 85% yaitu 30,67 MPa yang termasuk paving block mutu B. Penyerapan air terendah terdapat pada paving block geopolymer variasi glass powder 15%, paving block yang dihasilkan pada penelitian ini adalah paving block dengan mutu B.

Kata kunci: Paving Block, Geopolimer, Glass Powder, Fly Ash.

1. Pendahuluan

Paving block bisa disebut sebagai bata beton (*concrete block*). Campuran yang dipakai untuk membuat paving block terdiri dari agregat kasar, semen, agregat halus, abu batu serta air. *Paving block* dapat digunakan pada trotoar, tempat-tempat parkir, jalan akses di pemukiman real estate, pelataran gedung, dan juga daerah tertentu yang menggunakan perkerasan jalan. Seiring dengan kemajuan teknologi dan inovasi terbaru, berbagai penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan beberapa bahan alternatif untuk pembuatan paving block. Salah satunya dengan cara memanfaatkan geopolymer yang merupakan bahan pengikat seperti pasta semen. Bahan pozzolan yang seringkali digunakan sebagai material geopolimer adalah abu terbang (*fly ash*), serta memanfaatkan material lain yang kaya unsur silika yaitu limbah kaca yang dihancurkan menjadi serbuk kaca (*glass powder*).

Penggunaan paving block yang semakin banyak di zaman sekarang ternyata menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan karena salah satu bahan pengisi paving block adalah semen. Proses pembuatan semen menghasilkan emisi gas rumah kaca (karbondioksida) dan hal tersebut menjadi perhatian oleh beberapa kalangan yang peduli terhadap lingkungan. Dapat dilihat bahwa produksi semen secara massal berperan dalam meningkatkan jumlah CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer, oleh karena itu industri semen dunia memiliki dampak yang signifikan terhadap jumlah emisi gas rumah kaca secara global. Gas tersebut dilepaskan ke atmosfer dengan bebas dalam jumlah besar yang menyebabkan pemanasan global sehingga dapat merusak lingkungan serta mengancam kehidupan (Chichilya S. P. Sondakh dkk., 2021).

Langkah pembuatan *paving block* yang lebih ramah lingkungan dapat dilakukan dengan cara mengganti semen Portland dengan bahan lain, salah satunya menggunakan limbah atau bahan-bahan sisa yang berbahaya bagi lingkungan atau limbah pertanian (Rachman et al, 2019). Salah satu caranya adalah dengan mengembangkan paving block menggunakan geopolymer yang merupakan suatu polimer yang berbahan anorganik aluminosilikat yang mempunyai rantai kimia Si-O-Al yang dihasilkan oleh material yang mengandung banyak silika dan alumina dengan larutan aktivator basa kuat (Samadhi & Pratama, 2018) . Salah satu material tersebut adalah *fly ash* yang merupakan salah satu material yang diperoleh dari proses pembakaran batubara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Pada dasarnya *fly ash* tidak mempunyai kemampuan pengikat seperti semen portland, tetapi *fly ash* dapat dikatakan sebagai salah satu bahan yang memiliki potensi menggantikan semen portland pada pembuatan paving block dengan syarat harus ditambahkan larutan aktivator agar *fly ash* dapat memiliki daya ikat, kombinasi ini disebut teknologi compacting geopolymer dengan material dasar *fly ash* (Chichilya S. P. Sondakh et al., 2021), Material tersebut digabungkan dengan agregat halus dan agregat kasar serta air sehingga menghasilkan paving block geopolymer tanpa menggunakan semen portland. Sofyan et al, 2021 memanfaatkan *Fly Ash, Rice husk ash dan LLDPE Powder* sebagai campuran mortar geopolimer. Pada studi tersebut *fly Ash* sebagai bahan *pozzolanic* yang dicampur dengan larutan activator yang berfungsi sebagai pengikat mortar. Abu sekam padi digunakan sebagai bahan pengganti *Fly ash* sedangkan serbuk LLDPE berfungsi sebagai bahan pengganti pasir. Hasil pengujian menunjukkan kuat tekan tertinggi diperoleh pada temperatur curing 60°C dimana persentase serbuk LLDPE pada benda uji sebesar 15%. Dengan waktu setting terlama yaitu 180 menit.

Limbah lain yang juga bisa dimanfaatkan adalah limbah kaca, limbah kaca dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen dan pada penelitian ini limbah kaca digunakan sebagai bahan substitusi geopolimer. Kaca adalah limbah yang banyak dihasilkan terutama dari kegiatan untuk keperluan industri dan rumah tangga yang tidak dapat terurai, jika jumlahnya terlalu banyak maka

akan merusak dan mencemari lingkungan sehingga dapat membahayakan kehidupan (Andi Lolo et al., 2020). Peningkatan jumlah limbah kaca dikarenakan pemanfaatan kaca sudah banyak dilakukan, salah satunya adalah sebagai wadah atau kemasan dari macam – macam produk seperti makanan, minuman dan kosmetik sehingga menyebabkan semakin meningkatnya penggunaan kaca dan menghasilkan limbah yang banyak juga (BBC GLASS, 2020). Tercatat bahwa limbah kaca menjadi salah satu limbah dengan jumlah yang tinggi dalam menyebabkan pencemaran lingkungan. Hal ini diperkuat dengan data yang pernah dikeluarkan oleh PBB pada tahun 2004 yang menyatakan ada 14 juta ton limbah kaca di seluruh dunia. Sedangkan, pada tahun 2008 ada 4,1 juta ton limbah kaca di Eropa dengan tingkat daur ulang sebanyak 60% dan pada tahun 2010 Amerika Serikat juga menghasilkan 11,5 juta ton limbah kaca dengan tingkat daur ulang hanya sekitar 27% (BBC GLASS, 2020).

Seiring meningkatnya jumlah limbah kaca, salah satu cara yang dapat diterapkan untuk memberantas dan menghilangkan limbah kaca tersebut, yaitu dengan cara menghancurkannya menjadi serbuk kaca (*glass powder*) yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan pengisi (*filler*) pada paving blok gagasan ini berawal dari pemikiran bahwa kaca memiliki beberapa kandungan unsur kimia yang sebagiannya hampir sama dengan yang ada pada semen, jadi apabila kaca dihancurkan menjadi serbuk akan memungkinkan kaca tersebut dapat berfungsi sebagai bahan substitusi karena mempunyai potensi sebagai material pozzolan dengan memiliki kandungan silica (SiO_2), Na_2O dan CaO yang cukup besar yaitu dengan persentase melebihi 70%, sehingga dapat menghasilkan kekuatan yang melebihi rencana serta dapat meminimalisir biaya dalam pembuatan paving block (Andi Lolo et al., 2020). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Madya et al., 2012) menyatakan bahwa penambahan glass powder sebagai bahan tambah atau pengganti semen dapat meningkatkan nilai kuat tekan karena mengandung SiO_2 dan CaO yang cukup tinggi, didapat nilai kuat tekan optimum pada komposisi 10% *glass powder* dengan nilai 13,625 MPa sehingga glass powder dapat digunakan terhadap campuran paving blok. Nassar et al, 2021 melaporkan kinerja beton yang telah teruji di lapangan dan laboratorium dalam jangka Panjang dengan penggantian 20% berat semen dengan powder waste glass (WG). Hasil pengujian beton WG lapangan menunjukkan peningkatan kuat tekan, naik hingga 57% pengurangan dalam penyerapan air dan hingga 61% pengurangan dalam penurunan berat abrasi perbandingan dengan beton normal pada umur beton 300 hari.

Penelitian ini dilakukan untuk dapat mengetahui seberapa besarnya pengaruh atau dampak yang ditimbulkan glass powder pada paving block geopolymer dan untuk mencari tahu batas nilai optimum kadar persentase glass powder yang baik untuk nilai kuat tekan, penyerapan air pada paving blok. Pada penelitian ini geopolymer sebagai bahan pengganti semen portland dan ditambahkan dengan glass powder 0%, 15%, 30% dan 45%, 60%. Pengujian nilai kuat tekan adalah 7 hari, serta pengujian penyerapan air. Dengan menggunakan kedua jenis bahan limbah di atas ke dalam campuran paving blok, diharapkan dapat mengurangi dan mengatasi permasalahan lingkungan yang ada dan mendapatkan campuran dengan sifat mekanik yang maksimal.

2. Metode Penelitian

2.1 Persiapan Sampel

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Beton Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi PLN di Menara PLN, Jalan Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Kota Jakarta Barat. Fly ash (FA) berasal dari PLTU Lontar, Kabupaten Tangerang, Provinsi Banten, Indonesia digunakan sebagai bahan pengikat

dalam pembuatan paving. Analisis XRF dilakukan di laboratorium LIPI untuk mendapatkan komposisi kimia abu terbang dan serbuk kaca. Komposisi kimia fly ash dan glass powder (GP) ditunjukkan pada Tabel 1. Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini diklasifikasikan sebagai Kelas F menurut ASTM C618. Fly ash berwarna abu-abu muda dan memiliki berat jenis $2,25 \text{ g/cm}^3$. Senyawa Oksida dari FA dan GP dapat ditentukan dengan Uji X-Ray Fluorescence (XRF test) di laboratorium Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

Agregat kasar dengan ukuran butir maksimal 19 mm dari Jakarta, Indonesia digunakan dalam produksi paving blok. Modulus kehalusan pasir halus diukur menurut ASTM C136 di laboratorium beton Institut Teknologi PLN. Pasir dengan modulus kehalusan 3,098 digunakan dalam pembuatan paving blok. Larutan activator dibuat dari Pelet NaOH dan Na_2SiO_3 diperoleh dari vendor lokal Jakarta. Larutan NaOH dibuat dengan melarutkan sejumlah pelet NaOH padat yang dibutuhkan dalam air dan menambahkan molaritas larutan NaOH yang diinginkan. Molaritas larutan NaOH dan Na_2SiO_3 yang disiapkan adalah 10M 24 jam sebelum menyiapkan campuran paving blok, larutan NaOH dan larutan Na_2SiO_3 digabungkan dalam proporsi yang sesuai. Proses pembuatan larutan aktivator NaOH dan Na_2SiO_3 ditunjukkan pada gambar 1a. Sedangkan pencetakan sampel dapat dilihat pada gambar 1b. Metode Curing yang digunakan mengikuti metode yang digunakan oleh Ibrahim et al, 2019 dimana diterapkan metode curing oven selama 24 jam dengan temperature 60°C (gambar 1d).



Gambar 1. Proses pembuatan Paving Blok

Paving yang telah dicuring kemudian diangin-anginkan terlebih dahulu sebelum pengujian mekanis dilakukan (gambar 1c).

Tabel 1. Komposisi Kimia FA

Oxide	FA (%)	GP (%)
SiO ₂	43.58	70.3
Al ₂ O ₃	24.62	3.61
Fe ₂ O ₃	14.57	0.37
CaO	8.12	6.314
Na ₂ O	0.774	12.84
MgO	4.73	4.02
K ₂ O	0.86	0.73
P ₂ O ₅	0.42	0.42

Sumber : Hasil uji laboratorium LIPI

Ada 5 variasi spesimen yang akan diuji seperti yang ditunjukkan pada tabel 2. Bentuk paving block yang digunakan adalah segi empat dengan dimensi 200 mm x 100 mm x 60 mm. Umur perawatan selama 7 Hari. Proporsi campuran untuk satu sampel dapat dilihat pada tabel 2. Persentasi GP ditentukan mulai dari 0%, 15%, 30%, 45% dan 60% dari berat FA yang masing-masing dimulai dari spesimen FA-GP0 Hingga FA-GP60.

Perbandingan Larutan Aktivator dan Pozzolanic material (FA dan GP) atau AA/PM ratio yang digunakan pada benda uji adalah sebesar 0,5. Pada penelitian ini, pembuatan paving blok berdasarkan (Hussain et al., 2021) menggunakan perbandingan berat Fly Ash : agregat halus : agregat kasar = 1 : 2 : 4. Pengujian kuat tekan dan penyerapan air akan dilakukan untuk menentukan mutu dari paving blok.

Tabel 2. Proporsi Campuran

Sampel	FA (kg/m ³)	Agregat halus (kg/m ³)	Agregat Kasar (kg/m ³)	Larutan Aktivator (kg/m ³)	GP (kg/m ³)
FA-GP0	350	700	1400	175	0
FA-GP15	297.5	700	1400	148.75	52.5
FA-GP30	245	700	1400	122.5	105
FA-GP45	192.5	700	1400	96.25	157.5
FA-GP60	140	700	1400	70	210

Sumber : Analisa data

2.2 Penyerapan Air

Penyerapan air spesimen ditentukan berdasarkan SNI 03-0691. Prosedur pertama adalah dengan menempatkan spesimen di air keran selama 24 jam. Setelah dikeluarkan dari air, air dipermukaan dibersihkan dari benda uji, dan ditimbang beratnya (M1). Kemudian sampel dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C hingga dicapai berat konstan (M2). Penyerapan air dari paving block dihitung sebagai (Persamaan 1).

$$WA = \frac{(M1-M2)}{M2} \times 100\% \quad (1)$$

dimana WA adalah daya serap air (%), M1 adalah berat basah paving block (kg), dan M2 adalah berat kering paving block (kg).

2.3 Kuat Tekan

Kuat tekan spesimen diuji pada umur 7 mengacu pada standar SNI 03-0691. Dengan menggunakan Compression testing Machine. Beban diterapkan pada permukaan spesimen hingga mencapai batas ultimit. Set up uji kuat tekan ditunjukkan pada Gambar 2. Kekuatan tekan dihitung seperti Persamaan 2.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2)$$

dimana σ_c adalah kuat tekan (N/mm²), P adalah beban ultimit benda uji (N), dan A adalah luas penampang benda uji (mm²).



Gambar 2. Set up pengujian kuat tekan benda uji.

3. Hasil dan Pembahasan

3.2 Kuat Tekan dan Slump

Kuat tekan *paving block geopolymer* dapat menentukan mutu paving blok. Setelah dilakukan uji tekan dengan mesin Compression testing Machine diperoleh hasil kuat tekan sampel pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Tekan Sampel Paving blok

Sampel	Hari	Luas Permukaan (Cm ²)	Kuat Tekan Rata – rata (MPa)	Mutu
FA-GP0	7	200	20.92	B
FA-GP15	7	200	30.67	B
FA-GP30	7	200	21	B
FA-GP45	7	200	18.67	B
FA-GP60	7	200	11	D

Sumber : Analisa data

Kekuatan tekan diukur untuk semua hanya pada umur 7 hari. Pada paving blok geopolimer dengan metode curing oven kekuatan optimal sudah dapat dicapai diumur 7 hari. Gambar 3 menampilkan kuat tekan sampel paving blok yang berkorelasi dengan tingkat persentase GP. Kekuatan tekan meningkat dibandingkan dengan sampel control dengan persentase GP 15 %. Namun kekuatan tekan menurun setelah melewati persentase GP 15%. Kekuatan tekan dengan persentase GP 30% masih lebih besar dari sampel kontrol (Gambar 3).



Gambar 3. kuat tekan benda uji.

Pada Gambar 3 terlihat setelah persentase GP 15%, jumlah GP yang ditingkatkan hingga 60% tidak memberikan dampak yang positif untuk memperbaiki kuat tekan. Dilihat dari kua

t tekan hampir semua sample mencapai kategori mutu B berdasarkan SNI 03-0691-1996. Kecuali Sampel FA-GP60 hanya masuk kategori mutu D.

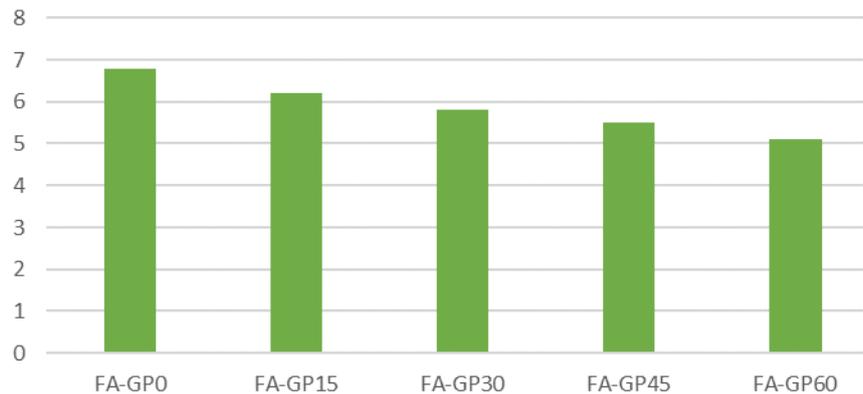
Tabel 4. Nilai Slump

Sampel	Slump (cm)
FA-GP0	6.8
FA-GP15	6.2
FA-GP30	5.8
FA-GP45	5.5
FA-GP60	5.1

Sumber : Analisa Data

Keleccakan dari sampel dapat diukur dengan melakukan tes slump. Nilai slump cukup krusial pada saat proses pencetakan sampel. Nilai slump sampel dapat dilihat pada tabel 4. Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai slump yang menurun dengan bertambahnya persentase GP. Nilai slump tertinggi diperoleh pada sampel control FA-GP0 sebesar 6.8 cm. Pada saat persentase mencapai

50% nilai slump yang diperoleh adalah 5.1 cm. Turunnya nilai slump dapat disebabkan beberapa faktor terutama ukuran partikel dari *glasspowder*. Semakin halus kecenderungan nilai slump semakin rendah. Untuk nilai slump yang diperoleh, menerapkan metode pencampuran pemadatan tangan pada paving blok sudah cukup baik untuk mencetak sampel. Selain ukuran partikel, panas hidrasi juga dapat berperan pada nilai slump. Setting time binder sebagai akibat dari proses hidrasi dapat menjadi lebih cepat akibat senyawa SiO dan CaO yang tinggi. Setting time yang terlalu cepat dapat membuat sampel menjadi lebih kental sehingga sulit untuk diaduk. Pada saat pengadukan temperature larutan aktivator juga perlu diperhatikan. Larutan aktivator yang terlalu panas dapat mempercepat terjadinya hidrasi pada binder.



Gambar 4. Nilai Slump paving blok

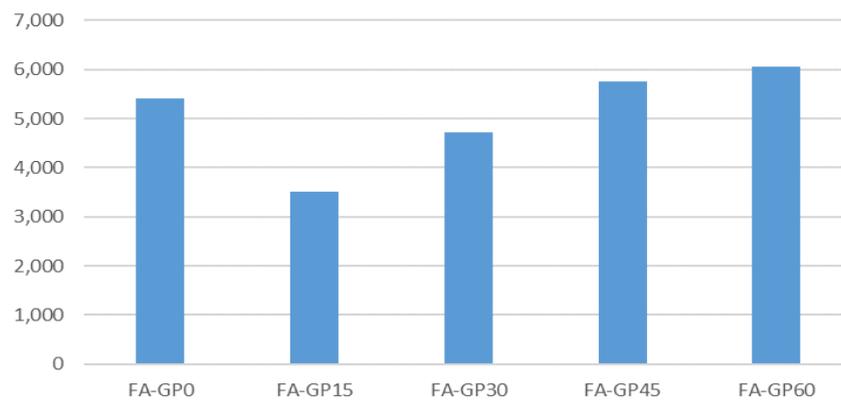
3.3 Penyerapan Air

Selain kuat tekan, penyerapan air adalah faktor utama dalam menentukan mutu dari paving blok. Tabel 4 menyajikan Nilai penyerapan air sampel.

Tabel 4. Nilai Penyerapan air sampel

Sampel	Umur Paving Block (Hari)	Benda Uji	Berat Basah (Kg)	Berat Kering (Kg)	Penyerapan Air (%)	Rata - rata Penyerapan (%)	Mutu
FA-GP0	7	1	2.179	2.049	6.345	5.418	B
		2	2.832	2.701	4.850		
		3	2.699	2.569	5.060		
FA-GP15	7	1	2.729	2.644	3.215	3.517	B
		2	3.007	2.901	3.654		
		3	2.591	2.499	3.681		
FA-GP30	7	1	2.619	2.490	5.181	4.717	B
		2	2.666	2.556	4.304		
		3	2.579	2.464	4.667		
FA-GP45	7	1	2.648	2.468	7.293	5.746	B
		2	2.580	2.468	4.538		
		3	2.515	2.386	5.407		
FA-GP60	7	1	2.442	2.322	5.168	6.054	C
		2	2.286	2.146	6.524		
		3	2.222	2.087	6.469		

Sumber : Analisa data



Gambar 5. Nilai Penyerapan Air paving blok

Gambar 5 menunjukkan nilai penyerapan air paving blok. Sampel dengan 15 % GP menunjukkan serapan air yang rendah sehingga pori-pori pada permukaan paving kecil. Sampel memadat dengan baik pada saat pencampuran sehingga gel C-A-S-H gel yang terbentuk optimal (Yip et al, 2005). Mikro Pori yang biasanya mengurangi kekuatan dapat diminimalisir. Hampir sama dengan hasil kuat tekan, mutu paving blok jika ditinjau dari angka penyerapan air mayoritas masuk kategori B. Hanya sampel FA-GP60 yang masuk kategori C dimana nilai serapan airnya merupakan yang tertinggi sebesar 6.054 %.

4. Kesimpulan

Studi ini menunjukkan efek sinergis Glasspowder-Fly Ash sebagai bahan pozzolan untuk pasangan paving blok geopolimer. Kesimpulan dari penelitian ini adalah Glasspowder memberikan efek dalam pembentukan C-A-S-H gel karena kandungan SiO yang tinggi namun hanya optimal di 15% persen. Kandungan Glasspowder yang melewati 15% dapat menurunkan kekuatan tekan. Menggunakan glasspowder pada paving blok geopolimer dengan pozzolan dasar fly ash dapat menurunkan nilai slump. Penyerapan air dapat diturunkan jika menggunakan glass powder tidak melebihi 15% dari berat fly ash. Pada persentase 15 % paving blok memadat dengan optimal. Paving blok geopolimer dapat mencapai mutu kategori B standar nasional Indonesia dengan menggunakan glasspowder mulai dari 0 sampai dengan 45%.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih sebesar-besarnya secara khusus kami ucapkan kepada Institut Teknologi PLN dan YPK-PLN yang mendanai secara penuh mulai dari survei, pengadaan material, pengambilan data dan publikasi serta pihak-pihak yang ikut terlibat dan mensupport secara moril dan materil.

Daftar Pustaka

- Chichilya S. P. Sondakh, Stevanny Gumalang, & Mickson Pinori. (2021). Analisa Biaya Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Material Dasar Beton Self Compacting Geopolymer. Paduraksa: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa, 10(1). <https://doi.org/10.22225/pd.10.1.2746.158-168>
- Rachman, A., Akbar, M., Tjaronge, M. W., Lando, A. T., & Irmawaty, R. (2020). Case Studies in Construction Materials Evaluation of sustainable concrete paving blocks incorporating

- processed waste tea ash. *Case Studies in Construction Materials*, 12, e00325. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00325>
- M.Sofyan,AO Irlan, A Rokhman, D D Purnama, R R R Utami. The Effect of Using Linear Low Density Polyethylene (LLDPE) Powder and Rice Husk Ash on Compressive Strength and Initial Setting Time of Alkaline-Activated Mortar. IOP conf series : Earth and environmental Science 921 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/921/1/012070>
- Samadhi, T. W., & Pratama, P. P. (2018). Pembuatan geopolimer dari metakaolin dan abu terbang. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 12(2). <https://doi.org/10.5614/jtki.2013.12.2.6>
- Andi Lolo, J., Ambali, D. P. P., & Paembonan, M. L. (2020). Karakterisasi Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Sifat Fisis-Mekanis Campuran Beton. *Journal Dynamic Saint*, 4(2). <https://doi.org/10.47178/dynamicsaint.v4i2.887>
- BBC GLASS. (2020). *Jumlah Limbah Kaca di Dunia*. <https://www.bbcglass.com/en/news-detail/jumlah-limbah-kaca-di-dunia>
- Madya, R., Ariyuni, E., & Tjahjono, E. (2012). Studi Sifat Mekanik *Paving Block* Terbuat dari Limbah Adukan Beton dan Serbuk Kaca. Teknik Sipil, Universitas Indonesia.
- Nassar, R., Soroushian, P., & Sufyan-ud-din, M. (2021). Case Studies in Construction Materials Long-term field performance of concrete produced with powder waste glass as partial replacement of cement. *Case Studies in Construction Materials*, 15(July), e00745. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00745>
- ASTM C618 – 19,(2019), Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM Int.
- American Society of Testing and Materials. (2014). ASTM C618 - 12a. "Annual Book of ASTM Standard: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. States : American United Standard Testing and Material. 1-5.
- ASTM C136. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. In American Society of Testing and Materials. Pennsylvania, USA: West Conshohocken.
- Ibrahim, M., Azmi, M., Johari, M., Maslehuddin, M., Kalimur, M., Abiodun, B., & Dafalla, H. (2019). Influence of composition and concentration of alkaline activator on the properties of natural-pozzolan based green concrete. *Construction and Building Materials*, 201, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.117>
- Hussain, I., Ali, B., Usman, M., Talha, M., Riaz, S., & Ali, A. (2021). Case Studies in Construction Materials Engineering properties of factory manufactured paving blocks utilizing steel slag as cement replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 15(August), e00755. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00755>
- Badan Standardisasi Nasional (1996). SNI 03-0691-1996. Bata Beton (Paving Block), Mutu dan Cara Uji. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta. 1-9.
- C.K. Yip, G.C. Lukey, J.S.J. Van Deventer (2005). Coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkali activation, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 1688–1697