

Pengaruh Substitusi Semen Portland terhadap Kinerja Paving Blok Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Tipe F

Sandri Linna Sengkey¹, Geertje Efraty Kandiyoh², Ventje Berty Slat³, Chris Hombokau⁴
Program Studi Teknik Jalan dan Jembatan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado,
Manado¹

Program Studi Konstruksi Bangunan Gedung, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado,
Manado^{2,3,4}

E-mail: sandri.sengkey@polimdo.ac.id

Abstrak

Melimpahnya bahan limbah hasil produksi batu bara berupa fly ash (FA) perlu dimanfaatkan semaksimal mungkin. Melalui pembuatan pengikat geopolimer, FA dapat digunakan sebagai bahan dasar. Tetapi untuk memproduksi geopolimer berbahan FA pada temperature ambient menghasilkan nilai kekuatan yang rendah, dibandingkan jika dicuring pada temperature sekitar 60°C. Penambahan bahan yang memiliki kandungan oksida calcium dapat meningkatkan pengembangan kekuatan material geopolimer. Pada penelitian ini, semen Portland (PC) digunakan sebagai bahan substitusi dalam pembuatan paving geopolimer berbahan dasar FA tipe F. Pengaruh penggunaan PC terhadap kinerja paving blok geopolimer meliputi kekuatan tekan, penyerapan, porositas, ketahanan aus dan ketahanan terhadap larutan sodium sulfat (Na₂SO₄) pada siklus basah-kering dipelajari. Campuran paving blok geopolimer dibuat dengan komposisi NaOH 10M, rasio Na₂SiO₃/NaOH sebesar 2.5, rasio larutan alkali activator/FA sebesar 0.4 dengan variasi substitusi PC sebesar 0%, 20%, 30%, 40% terhadap berat FA serta curing pada temperature ambient. Hasil pengujian menunjukkan pengaruh substitusi PC ke dalam campuran, mampu meningkatkan kinerja paving blok meliputi kuat tekan, penyerapan, porositas, ketahanan aus, kecuali ketahanan terhadap garam sulfat. Tetapi kehilangan berat paving geopolimer dengan menggunakan PC masih memenuhi standar SNI-03-0691-1996. Substitusi PC sebesar 20% terhadap FA, mampu meningkatkan mutu paving dari mutu D untuk penggunaan di taman, menjadi mutu B untuk penggunaan di lahan parkir kendaraan.

Kata kunci: Fly ash, Paving blok geopolimer, Ketahanan sulfat, Siklus basah kering

Abstract

The abundance of fly ash (FA) as a waste material from coal production needs to be utilized as much as possible. Through the manufacture of geopolymer binders, FA can be used as a base material. But to produce geopolymers made from FA at ambient temperature results in lower strength, compared to curing at temperatures around 60°C. The addition of materials containing calcium oxide can increase the strength development of geopolymer materials. In this study, Portland cement (PC) was used as a substitute material in the manufacture of geopolymer paving made from FA type F. The effect of PC on the performance of geopolymer paving blocks including compressive strength, absorption, porosity, abrasion resistance and resistance to sodium sulfate solution (Na₂SO₄) in the wet-dry cycle was studied. The mixture of geopolymer paving blocks was made with a composition of 10M NaOH, Na₂SiO₃/NaOH ratio of 2.5, alkaline activator/FA ratio of 0.4 with PC substitution of 0%, 20%, 30%, 40% by weight of FA and curing at ambient temperature. The test results show the effect of substitution

of PC into the mixture, able to improve the performance of paving blocks including compressive strength, absorption, porosity, abrasion resistance, except for resistance to sodium sulfate. But the weight loss of geopolymer paving using PC still meets the SNI-03-0691-1996 standard. PC substitution of 20% can improve the quality of paving from D quality for use in parks to B quality for use in vehicle parking.

Keywords: *Fly ash, Geopolymer block paving, Sulfate resistance, Wet dry cycle.*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur jalan dengan memakai perkerasan kaku semakin banyak digunakan karena beberapa kelebihan antara lain lebih kuat dan awet serta biaya pemeliharaan lebih rendah. Tapi untuk pembuatan jalan beton membutuhkan jumlah semen yang sangat banyak. Sebagai contoh untuk pembangunan jalan tol Cibitung-Cilincing, kebutuhan material semen tipe I sebanyak 132.570,95 ton (Manlian Ronald A, Anang Noer Tachlish, 2019). Disisi lain, penggunaan semen portland ikut memberi dampak terhadap pemanasan global, akibat emisi CO₂ yang dilepaskan, karena untuk memproduksi 1 ton Ordinal Portland cement (OPC), akan melepaskan emisi CO₂ sebesar 1 ton (Davidovits, 1994).

Saat ini mulai diperkenalkan bahan pengikat alternatif pengganti semen Portland yang lebih ramah lingkungan, yaitu pengikat geopolimer. Hasil-hasil penelitian tentang pengikat geopolimer menyatakan kinerja kekuatan maupun durabilitasnya tidak kalah dengan semen Portland, bahkan menunjukkan ketahanan yang lebih baik terutama pada suhu tinggi dan lingkungan yang mengandung sulfat. Aplikasi penggunaan pengikat geopolimer dalam dunia konstruksi masih sangat sedikit, sehingga perlu adanya penelitian ini untuk mendapatkan informasi tentang sifat dan kinerja material geopolimer khususnya sebagai material rigid pavement berbentuk paving blok.

Dewasa ini, penggunaan paving block semakin diminati oleh masyarakat. Selain pemasangan dan perawatan yang mudah, penggunaan paving block turut menjaga persediaan air dalam tanah karena memiliki daya serap yang baik. Selain itu paving block dapat diterapkan pada berbagai tempat sebagai jalan raya, lahan parkir, trotoar, taman, halaman, dan lain sebagainya.

Potensi pembuatan paving blok geopolimer dengan menggunakan fly ash yang merupakan bahan limbah produksi batu bara, cukup besar. Berdasarkan laporan pada <https://ekonomi.bisnis.com/read/20210315/44/1367856/>, kebutuhan batu bara untuk PLTU pada 2019 mencapai 97 juta ton dengan FA yang dihasilkan sekitar 10 persen atau 9,7 juta ton. Tahun 2028, Kebutuhan batu bara diproyeksi mencapai 153 juta ton sehingga FA yang dihasilkan diperkirakan mencapai 15,3 juta ton. Melimpahnya bahan limbah ini perlu dimanfaatkan sebesar-besarnya. Pemanfaatan kembali FA, selain dapat mereduksi gas rumah kaca dan mengurangi limbah, juga dapat mengurangi pemakaian sumber daya alam, sehingga dapat mengarah pada pembangunan berkelanjutan.

Pada penelitian ini, paving blok geopolimer dibuat dengan menggunakan bahan dasar fly ash tipe F. Berdasarkan hasil-hasil penelitian sebelumnya (Reddy, dkk., 2012., Wallah, 2014) melaporkan bahwa untuk meningkatkan kekuatan material geopolimer berbahan fly ash tipe F, sebaiknya dilakukan proses curing panas pada temperature sekitar 60 °C. Disisi lain, curing pada temperature yang lebih tinggi, membutuhkan biaya tambahan, sehingga akan sulit

untuk konstruksi praktis di lapangan seperti paving blok. Untuk mengatasi hal ini, pemakaian material yang mempunyai kandungan kalsium oksida yang cukup tinggi, dapat menjadi alternative pilihan sehingga proses curing pada temperature ambient dapat diterapkan (Phoongnkhom dkk., 2018). Hasil penelitian dari Aliabdo dkk.(2016) melaporkan penambahan PC meningkatkan semua perilaku beton geopolimer, kecuali workabilitas.

Pada penelitian ini, sebagian fly ash diganti dengan PC sebesar 20, 30 dan 40% dalam pembuatan paving blok geopolimer. Prosentase PC ini mengacu pada penelitian Mehta dan Siddique (2017) yang mengganti sebagian FA tipe F dengan PC sebesar 10, 20 dan 30% dan komposisi terbaik beton geopolimer tercapai pada PC 20%.

Pengaruh substitusi PC dalam campuran paving blok geopolimer ditinjau terhadap kinerja kekuatan dan kinerja ketahanan yakni kuat tekan, penyerapan, porositas, ketahanan aus dan ketahanan terhadap larutan sodium sulfat dengan menggunakan metode siklus basah kering. Penelitian yang meninjau ketahanan paving blok geopolimer dalam larutan yang mengandung sodium sulfat dengan metode siklus basah kering, masih sangat kurang padahal pengaruh sulfat umumnya dapat merusak beton. Kondisi tanah dan lingkungan untuk pemasangan paving yang mengandung sulfat dapat mempengaruhi kekuatan dan durabilitasnya.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Material

FA diambil dari PLTU Amurang Indonesia, dan semen Portland yang digunakan adalah tipe PCC. Komposisi kimia FA dan PC berdasarkan hasil analisa X-Ray Fluorescence (XRF) ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Kimia FA dan PC

Komposisi	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	SrO	BaO	MnO
FA	36.86	8.19	34.65	14.23	0.77	3.06	0.98	0.26	0.18	0.63
PC	19.68	0.00	4.43	75.10	0.00	0.00	0.24	0.46	0.00	0.00

Berdasarkan ASTM C 618-19 yang membagi pozzolan dalam tiga kategori yaitu kelas N, kelas F dan kelas C seperti diperlihatkan pada tabel 2, maka FA yang digunakan dalam penelitian ini termasuk kelas F karena jumlah senyawa SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ adalah 79.7% > 50% dan kadar CaO sebesar 14.23% < 18%.

Tabel 2. Persyaratan kandungan kimia Pozzolan (ASTM C 618-19)

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
<i>Silicon dioxide (SiO₂) plus aluminium oxide (Al₂O₃) plus iron oxide (Fe₂O₃), min, %</i>	70	50	50
<i>Calcium Oxide (CaO), %</i>	<i>Report only</i>	18 max	>18
<i>Sulfur trioxide (SO₃), maks, %</i>	4.0	5.0	5.0
<i>Moisture, maks, %</i>	3.0	3.0	3.0
<i>Loss on ignition (LOI), maks, %</i>	10.0	6.0	6.0

Hasil analisa XRF pada tabel 1 memperlihatkan PC mengandung CaO yang sangat besar yaitu 75.10%.

Sebagai agregat halus digunakan pasir sungai dengan berat jenis dan modulus kehalusan berturut-turut sebesar 2.52 dan 2.87. Agregat kasar batu pecah ukuran 5-10 mm, dan larutan alkali activator yang digunakan adalah kombinasi NaOH 48% bentuk flake dan Na₂SiO₃ dengan kandungan Na₂O 16.2%, SiO₂ 37.26% dan H₂O 46.54%.

Campuran paving blok geopolimer dibuat dengan menggunakan NaOH 10 M, rasio Na₂SiO₃/NaOH sebesar 2.5, rasio larutan alkali activator/FA sebesar 0.4, superplasticizer 1% dari berat FA, dan tambahan air sebesar 2% dari berat FA. Disain campuran paving geopolimer dilakukan dengan mengambil asumsi kepadatan beton sebesar 2400 kg/m³ (Kumutha dkk., 2017), selanjutnya dibuat perbandingan antara binder, agregat halus, agregat kasar sebesar 1:2:1. Variasi PC sebagai pengganti FA sebesar 0%, 20%, 30%, 40% dari berat FA. Hasil disain campuran paving blok geopolimer dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Disain Campuran Paving Blok Geopolimer

MIX	FA (kg)	PC (kg)	PASIR (kg)	AGREGAT KASAR (kg)	NAOH 10M (kg)	AIR (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	SP (kg)	AIR TAMBAHAN (kg)
0% PC	430	0	1200	600	49.14	122.85	123	4.30	8.6
20% PC	344	86	1200	600	49.14	122.85	123	4.30	8.6
30% PC	301	129	1200	600	49.14	122.85	123	4.30	8.6
40% PC	258	172	1200	600	49.14	122.85	123	4.30	8.6

2.2. Metode

Pembuatan dan pencetakan paving blok geopolimer dilakukan di industry paving blok dengan menggunakan alat cetak paving blok hidrolik. Sebelum proses pembuatan paving, larutan alkali activator disiapkan lebih dahulu dengan cara NaOH dilarutkan dengan air sesuai molaritas yang akan dibuat, lalu didinginkan dan dicampur dengan Na₂SiO₃. Selanjutnya proses pencampuran dilakukan dengan memasukkan semua bahan kering ke dalam mixer kemudian dicampur sampai merata lalu tambahkan larutan alkali activator sambil terus diaduk. Terakhir masukkan SP dan air tambahan lalu diaduk dengan mixer sampai menjadi homogen. Adukan kemudian dicetak dengan ukuran 21 cm x 10 cm x 8 cm menggunakan mesin cetak paving, dan benda uji di letakkan di lokasi pencetakan pada temperature ambien selama 24 jam, kemudian dipindahkan di laboratorium untuk perawatan lanjutan dalam ruangan sampai umur pengujian. Curing pada temperature ambien dilakukan agar mudah diaplikasi di lapangan. Metode pengujian paving blok geopolimer mengacu pada SNI-03-0691-1996 meliputi uji kekuatan tekan pada umur 7, 14 dan 28 hari, uji penyerapan dan porositas pada sampel umur 28 hari, uji ketahanan terhadap keausan dan uji ketahanan terhadap garam sulfat (Na₂SO₄) dengan metode siklus basah-kering, pada sampel umur 28 hari. Pengujian dilakukan selama 5 siklus dimana satu siklus terdiri dari perendaman dalam 5% larutan Na₂SO₄ selama 16-18 jam, kemudian dikeringkan pada suhu 100oC selama 2 jam. Durabilitas paving geopolimer dievaluasi melalui perubahan dalam berat setelah selesai siklus Hasil pengujian adalah nilai rata-rata dari 3 buah sampel.

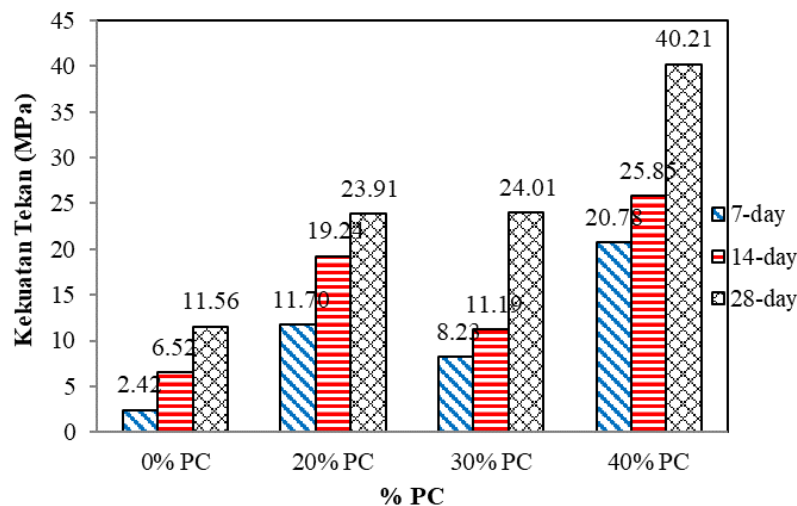
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kekuatan Tekan

Hasil pengujian kuat tekan paving blok geopolimer pada umur 7, 14 dan 28 hari seperti terlihat pada gambar 1 menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan pada semua campuran paving blok yang menggunakan PC, dibandingkan yang tanpa PC. Peningkatan kuat tekan ini karena kandungan CaO dari PC yang tinggi (lihat tabel 1) yang membentuk ikatan CSH yang memegang peranan penting dalam hal kekuatan.

Pada campuran paving tanpa PC pengembangan kekuatannya berjalan lambat, dimana pada umur 7, 14 dan 28 hari, nilai kuat tekannya berturut-turut sebesar 2.42 MPa, 6.52 MPa dan 11.56 MPa. Sedangkan jika ditinjau terhadap campuran yang menggunakan PC sebesar 20%, kekuatan tekan pada umur 7, 14 dan 28 hari adalah sebesar 11.07 MPa, 19,24 MPa dan 23,91 MPa. Terjadi peningkatan sebesar 383%, 195% dan 106% berturut-turut pada umur 7, 14 dan 28 hari.

Rendahnya nilai kuat tekan campuran paving blok geopolimer tanpa PC karena proses polimerisasi yang berjalan lambat selama dilakukan curing pada temperature ambient, juga karena jenis fly ash tipe F yang memiliki kandungan CaO yang rendah

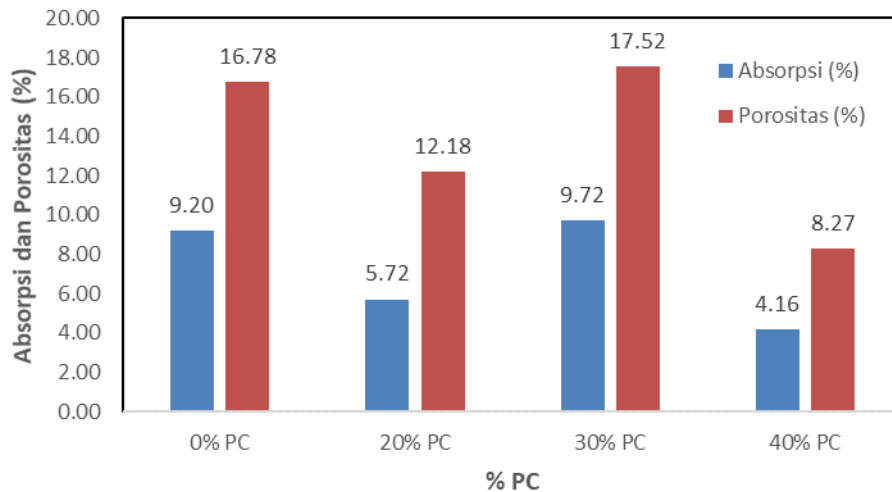


Gambar 1. Nilai kuat tekan paving blok geopolimer

3.2. Penyerapan dan porositas

Nilai penyerapan sebesar 9.2%, 5.72%, 9.72%, 4.16% dan porositas sebesar 16.78%, 12.18%, 17.52%, 8.27% pada substitusi PC 0%, 20%, 30%, dan 40% berturut-turut, ditunjukkan pada gambar 2. Nilai penyerapan dan porositas terlihat mengalami penurunan pada substitusi PC 20% dan 40%, sebaliknya pada substitusi PC 30%. Peningkatan nilai penyerapan dan porositas ini ada kaitannya dengan proses pembuatan dan pencetakan paving blok yang dilakukan di industry paving yang menggunakan alat cetak hidrolik yang sebelumnya telah digunakan untuk pembuatan paving blok semen. Dari hasil ini, menunjukkan perlunya menjaga kebersihan peralatan dari bahan-bahan sisa produksi, agar hasil yang diperoleh tidak tercampur dengan

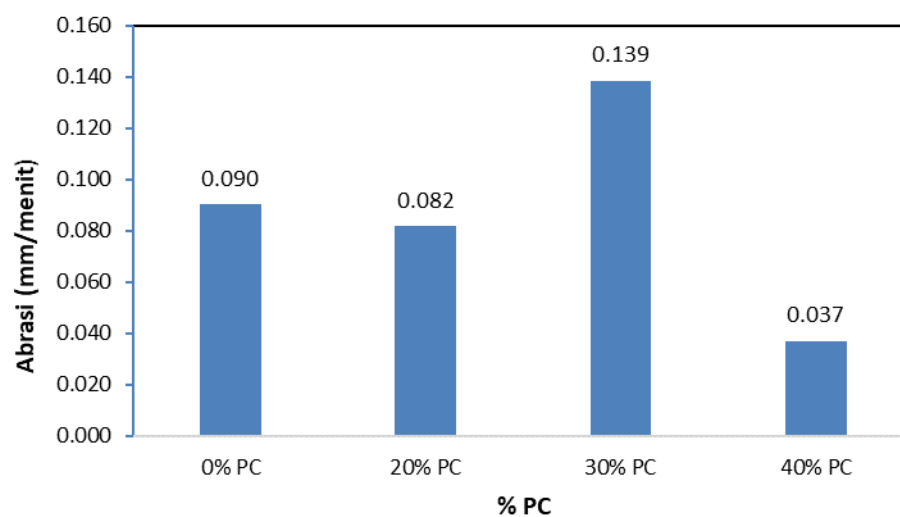
bahan lain yang justru mempengaruhi kualitas paving. Pada substitusi PC 20% dan 40%, nilai penyerapan dan porositas semakin berkurang dengan semakin besarnya substitusi PC. Ukuran butir PC yang halus membuatnya dapat mengisi rongga antar butir sehingga semakin kecil pori dan paving semakin padat.



Gambar 2. Nilai Penyerapan dan Porositas paving blok geopolimer

3.3. Ketahanan Aus

Hasil Pengujian ketahanan aus pada gambar 3 menunjukkan bahwa paving blok tanpa PC memiliki nilai ausan yang paling besar sedangkan paving dengan substitusi PC menunjukkan nilai ausan yang lebih rendah, kecuali untuk substitusi PC 30%. Jika dibandingkan dengan hasil kuat tekan pada gambar 1, menunjukkan semakin besar kuat tekannya, nilai keausannya semakin kecil. Kondisi ini memperlihatkan adanya hubungan antara kuat tekan dengan keausan. Bakdul dkk. 2021, juga melaporkan hasil serupa dalam pembuatan geopolymer concrete paving.



Gambar 3. Nilai keausan paving blok geopolimer

3.4. Ketahanan terhadap Sodium Sulfat

Hasil pengujian ketahanan paving blok geopolimer dalam larutan Na_2SO_4 dengan metode siklus basah-kering ditunjukkan pada Tabel 4 memperlihatkan perubahan berat yang terjadi setiap siklus. Pada siklus pertama sampai kelima, paving blok tanpa PC menunjukkan kenaikan berat paling besar, sedangkan paving dengan substitusi PC 40% paling kecil.

Tabel 4. Perubahan berat paving blok geopolimer

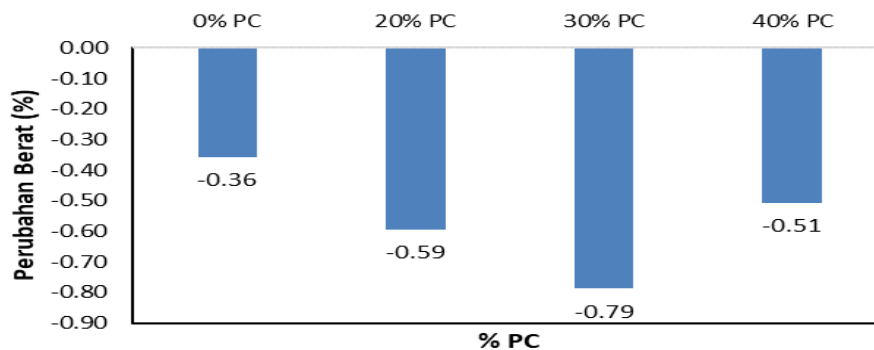
% PC	% Perubahan Berat setiap siklus						Sesudah
	Sebelum	1	2	3	4	5	
0% PC	0.00	10.57	11.58	10.81	9.09	11.76	(0.36)
20% PC	0.00	4.81	5.24	6.00	4.05	5.51	(0.59)
30% PC	0.00	7.32	9.50	9.44	9.81	10.29	(0.79)
40% PC	0.00	3.55	4.16	4.37	4.16	4.42	(0.51)

Hal ini ada hubungannya dengan nilai penyerapan dan porositas (gambar 2). Paving dengan substitusi PC 40% mempunyai nilai penyerapan dan porositas yang paling kecil, menunjukkan kepadatan paving. Hal ini berdampak pada semakin berkurangnya larutan yang diserap sehingga kenaikan berat semakin kecil.

Setelah selesai siklus, dihitung perubahan berat yang terjadi dan terlihat paving tanpa PC mengalami kehilangan berat paling kecil sebesar 0.36% (gambar 4) sedangkan paving yang mengandung PC mengalami kehilangan berat yang lebih besar. Pada paving dengan substitusi PC sebesar 20% dan 40% mengalami kehilangan berat sebesar 0.59% dan 0.51%. Lebih besarnya kehilangan berat paving blok geopolimer yang memakai PC, dibandingkan yang tanpa PC, karena PC mempunyai sifat ketahanan yang lemah terhadap sulfat.

Dezfouli and Rangaraju (2017) menyatakan bahwa perubahan berat sampel dapat terjadi karena dua hal yaitu dissolution pasta ke dalam larutan (menyebabkan kehilangan berat) dan penyerapan larutan ke dalam struktur geopolimer (menyebabkan penambahan berat). Factor lain yaitu terjadinya pertukaran ion, dimana larutan Na_2SO_4 masuk sedangkan NaOH keluar dari paving. Jika Na_2SO_4 yang terserap masuk lebih banyak dari NaOH yang keluar dari paving, maka terjadi penambahan berat dan sebaliknya. Rahman dan Ekaputri, 2018, menyatakan bahwa adanya senyawa alumina dalam campuran geopolimer juga memberi dampak positif pada durabilitas dalam larutan Na_2SO_4 karena sifat amphoteric dari alumina yang dapat bereaksi sebagai asam di lingkungan basa dan sebagai basa di lingkungan asam. Hal ini menyebabkan reaktifitas alumina meningkat dan membuat durabilitas paving menjadi lebih baik pada lingkungan Na_2SO_4 .

Meskipun kehilangan berat dari campuran paving yang menggunakan PC lebih besar dibandingkan yang tanpa menggunakan PC, tetapi besarnya kehilangan berat pada semua campuran masih dibawah batas yang diberikan SNI yaitu maksimum 1%. Hal ini menunjukan paving geopolimer FA dengan PC, mempunyai kinerja ketahanan yang baik terhadap larutan Na_2SO_4 .



Gambar 4. Perubahan berat paving blok geopolimer

Hasil-hasil pengujian kinerja paving kemudian disajikan dalam bentuk tabel seperti ditunjukkan pada Tabel 5 kemudian hasil tersebut dibandingkan dengan standar SNI -03-0691-1996 pada tabel 6 untuk menentukan kriteria mutu paving blok geopolimer.

Tabel 5 Hasil pengujian kinerja paving blok geopolimer

Campuran (% PC)	Kuat Tekan (MPa)		Ketahanan aus (mm/menit)		Penyerapan air rata-rata maks. (%)	Perubahan berat (%)
	Rata-rata	Min.	Rata-rata	Min.		
0% PC	11.56	10.09	0.090	0.100	9.20	- 0.36
20% PC	23.91	18.73	0.082	0.096	5.72	- 0.59
30% PC	24.01	16.60	0.139	0.171	9.72	- 0.79
40% PC	40.21	38.52	0.037	0.047	4.16	- 0.51

Tabel 6. Kriteria mutu paving berdasarkan SNI -03-0691-1996

Mutu	Kuat Tekan (MPa)		Ketahanan aus (mm/menit)		Penyerapan air rata-rata maks. (%)
	Rata-rata	Min.	Rata-rata	Min.	
A	40	35	0.090	0.103	3
B	20	17	0.130	0.149	6
C	15	12.5	0.160	0.184	8
D	10	8.5	0.219	0.251	10

Selain kriteria mutu pada tabel 6, syarat ketahanan terhadap sodium sulfat (Na_2SO_4) : Tidak boleh cacat dan kehilangan berat yang diperkenankan maksimum 1%.

Berdasarkan standar SNI-03-0691-1996, paving blok tanpa PC memenuhi standart paving blok mutu D yang digunakan untuk taman dan penggunaan lainnya. Paving blok geopolimer dengan substitusi PC 20% , memenuhi kriteria paving mutu B yang digunakan

untuk lahan parkir, sedangkan untuk substitusi PC 40%, memenuhi kriteria paving mutu A yang digunakan untuk jalan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian tentang pengaruh substitusi PC terhadap paving blok geopolimer berbahan dasar FA dengan komposisi NaOH 10 M, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.5$, rasio activator/FA = 0.4 menunjukkan bahwa semakin besar substitusi PC (20%, 30%,40%), semakin meningkat performa paving berupa meningkatnya nilai kuat tekan, semakin kecilnya nilai penyerapan dan porositas serta ketahanan aus yang makin baik, tetapi ketahanan terhadap larutan sodium sulfat lebih rendah dibanding tanpa PC. Penggunaan PC sebesar 20% dalam paving blok geopolimer dapat meningkatkan mutu paving dari mutu D menjadi mutu B, bahkan mutu A untuk PC sebesar 40%.

DAFTAR PUSTAKA

- Davidovits, J(1994) Global warming impact on the cement and aggregates industries. World Resource Review 6(2):263-278[2]
- Dezfouli HR. and Rangaraju PR (2017) A Comparative Study on the Durability of Geopolymers Produced with Ground Glass Fiber, Fly Ash, and Glass-Powder in Sodium Sulfate Solution. Construction and Building Materials 153:996-1009
- Dikecualikan dari limbah B3, FABA dari PLTU bisa menjadi berkah, 2021 <https://ekonomi.bisnis.com/read/20210315/44/1367856/dikecualikan-dari-limbah-b3-faba-dari-pltu-bisa-menjadi-berkah>
- Kumutha, R., Aswini, A., Ellakkiya, M., Karthika, T., Vijai, K., (2017) „Properties of I shaped paver blocks using fly ash based geopolimer concrete. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Issue:14, Vol. 2, pp. 06-12
- Manlian Ronald A, Anang Noer Tachlish, (2019), Analisis Kebutuhan Material Beton Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Cibitung-Cilincing, Prosiding Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNPTS) X 2019 “Adaptasi dan Mitigasi Bencana dalam Mewujudkan Infrastruktur yang Berkelanjutan” Bandung, 5 November 2019.
- Mehta, A., and Siddique, R., (2017), Sulfuric Acid Resistance of Fly Ash Based Geopolymer Concrete, Construction and Building Materials. Vol. 46, pp. 136 – 143
- Phoo-ngernkham T, Hanjitsuwan S, Detphan S, Thumrongvut J, Suksiripattanapong C, Damrongwiriyanupap, N., Chindapasirt, P., Hatanaka, S., (2018), Shear bond strength of FA-PC Geopolymer under different sand to binder ratios and sodium hydroxide concentrations, International Journal of Geomate, Issue:42, Vol.14, pp. 52-57
- Rahman, A., and Ekaputri, J. J., (2018), The Effect of Additional Aluminium to the Strength of Geopolymer Paste. MATEC Web of Conferences 195, 01011
- Reddy, D., Edouard, J., and Sobhan, K., (2012), Durability of Fly Ash-Based Geopolymer Structural Concrete in the Marine Environment, Journal of Materials in Civil Engineering, Issue:25, Vol. 6, pp. 781–787
- SNI 03-0691-1996 (1996) Concrete brick (paving block)
- Wallah, S. E., (2014), Pengaruh Perawatan dan Umur terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang, Jurnal Ilmiah Media Engineering. Nomor 4, Vol.1, pp, 1–7