

# KUAT TEKAN *PAVING BLOCK* GEOPOLIMER ABU SAWIT (*PALM OIL FUEL ASH*) DENGAN PERAWATAN SUHU RUANG

Harriad Akbar Syarif<sup>1)</sup>, Monita Olivia<sup>2)</sup>, Edy Saputra<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

<sup>2)</sup>Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

<sup>3)</sup>Dosen Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya J. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode Pos 28293

Email : [harriad.akbar@gmail.com](mailto:harriad.akbar@gmail.com)

## Abstract

*Geopolymer is an environmentally friendly alternative construction material made from the process of activating the base material rich in silicon (Si) and aluminum (Al) with a solution of alkaline activators. In this study, using the ashes of oil derived from Dumai, Riau Province as the base material of geopolymer. With the eco-friendly construction material that the product is made with reference to a standard paving blocks. This study is based on variations of modulus activator, dosage activators, and the addition of cement type 1 (Ordinary Portland Cement) for the treatment of room temperature (setting time) on the composition of the mixture. This study aims to determine the amount of use of the base material (palm oil fuel ash) from the comparison alkaline activator with palm oil fuel ash used in paving block geopolymer based treatment time and its influence on the physical properties of the geopolymer paving block. The results showed that the strong increase in modulus of paving blocks are influenced by activators in combination with the addition of cement to each composition.*

*Keywords: palm oil fuel ash, geopolymer, paving block, modulus activator, dosage activator*

## A. PENDAHULUAN

### A.1 Latar belakang

Abu limbah kelapa sawit atau disebut juga *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) merupakan masalah bagi industri kelapa sawit karena memerlukan lahan pembuangan yang luas. Jumlah POFA yang meningkat setiap tahunnya dapat mengancam kelestarian lingkungan. Salah satu cara menekan jumlah POFA dan mencegah kerusakan lingkungan adalah dengan memanfaatkan POFA sebagai bahan stabilisasi tanah.

Pada tahun 1980-an, Professor Joseph Davidovits menemukan sebuah perekat alternatif pengganti semen yang dikenal dengan geopolimer. Pembuatan material geopolimer menggunakan bahan yang banyak mengandung unsur-unsur silikon dan aluminium. *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) atau abu kelapa sawit merupakan salah satu bahan

yang mengandung unsur-unsur tersebut, sehingga bahan ini mulai banyak dijadikan bahan campuran *paving block*.

### A.2 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengkaji kuat tekan *paving block* geopolimer pada umur 7 dan 28 hari dengan tambahan semen type 1 (OPC) berdasarkan variasi alkali aktivator yang digunakan.
2. Mengetahui karakteristik kandungan abu sawit.
3. Mengkaji faktor – faktor yang mempengaruhi geopolimer.

- sejenisnya, air dan agregat dengan atau tanpa bahan tambahan lainnya yang tidak mengurangi mutu bata beton itu.

- c. Bata beton mutu C, digunakan untuk pejalan kaki.
- d. Bata beton mutu D, digunakan untuk taman dan penggunaan lainnya.

Tabel 1. Sifat - Sifat Fisika *Paving Block*

Mutu	Kuat tekan		Ketahanan aus (mm/menit)		Penyerapan air rata-rata maks. (%)
	Rata-rata	Min	Rata-rata	Min	
A	40	35	0,09	0,103	3
B	20	17	0,13	0,149	6
C	15	12,5	0,16	0,184	8
D	10	8,5	0,219	0,251	10

Sumber : SNI 15-2049-2004

### B.3 Bahan Penyusun *Paving Block* Geopolimer

#### B.3.1 Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash)

Abu sawit yang disebut juga dengan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dihasilkan dari pembakaran limbah padat kelapa sawit pada suhu sekitar 800 - 1.000°C pada pembangkit listrik tenaga uap di pabrik kelapa sawit (Tangchirapat, 2009). Industri kelapa sawit menghasilkan limbah padat seperti serat, cangkang dan tandan kosong.

Limbah ini adalah sisa produksi minyak sawit kasar berupa tandan kosong, serat dan cangkang sawit. Limbah tersebut digunakan sebagai bahan bakar ketel (*boiler*) untuk menghasilkan energi mekanik dan panas. Uap dari *boiler* dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dan untuk merebus TBS sebelum diolah di dalam pabrik. Masalah yang kemudian timbul adalah sisa dari pembakaran pada ketel (*boiler*) berupa abu (POFA) dengan jumlah yang terus meningkat sepanjang tahun. Namun POFA sendiri sampai saat ini masih belum dimanfaatkan secara optimal. Kondisi limbah POFA yang terus menerus meningkat seiring peningkatan industri kelapa sawit semakin membutuhkan lahan yang besar untuk menampung POFA.

#### B.3.2 Larutan Alkali Aktivator

Pada umumnya, larutan alkali yang digunakan dalam geopolimerisasi adalah kombinasi dari natrium hidroksida (NaOH) atau potasium hidroksida (KOH) dengan natrium silikat atau potasium silikat (Hardjito dan Rangan, 2005 dalam Surini, 2006). Dari beberapa penelitian geopolimer, diketahui bahwa penggunaan campuran NaOH dan natrium silikat sebagai larutan alkali aktivator menghasilkan kekuatan yang terbaik (Adam, 2009).

NaOH digunakan karena harganya lebih murah, memiliki viskositas rendah, dan sangat banyak ditemukan di pasaran. NaOH berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur silikon (Si) dan aluminium (Al) yang terkandung dalam abu sawit sehingga menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Ion  $\text{OH}^-$  pada NaOH merupakan elemen penting pada tahap awal proses geopolimerisasi. Ion ini diperlukan untuk meningkatkan reaksi pemutusan rantai silika dan alumina. Ketika konsentrasi ion  $\text{OH}^-$  tinggi, maka rantai Si-Al akan terputus sangat cepat, kemudian membentuk ikatan Si-OH dan Al-OH dalam jumlah besar. Konsentrasi NaOH dapat menentukan hasil akhir kuat tekan benda uji geopolimer, dimana kuat tekan akan meningkat seiring meningkatnya konsentrasi NaOH.

Natrium silikat terdapat dalam dua bentuk, yaitu padat atau bubuk dan larutan. Pada campuran beton lebih banyak digunakan dalam bentuk larutan. Natrium silikat memiliki viskositas tinggi yang berpengaruh terhadap *workability* selama pencampuran geopolimer. Natrium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Natrium silikat pada geopolimer tidak hanya meningkatkan hasil akhir kuat tekan, tetapi juga berguna sebagai perekat antara material-material sehingga membentuk pasta yang padat (Olivia, 2005).

Kombinasi NaOH dan Natrium Silikat dengan perbandingan yang tepat dapat menghasilkan material padat hampir tanpa pori dan memiliki ikatan yang kuat antara agregat dengan pasta geopolimer. Namun, penggunaan natrium silikat yang berlebihan tidak hanya meningkatkan

workability, tetapi juga mengakibatkan material menjadi berpori (Shindunata, 2006 dalam Olivia, 2011).



Gambar 2. Larutan Alkali Aktivator  
Sumber : Davidovits, 1994

### B.3.3 Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat yang semua butirnya menembus ayakan berlubang 4,75 mm. Agregat halus umumnya terdapat di sungai-sungai besar. Namun sebaiknya agregat halus yang digunakan untuk bahan-bahan bangunan dipilih yang memenuhi syarat.

### B.3.4 Air

Air adalah salah satu unsur yang paling penting untuk menghasilkan beton. Air yang digunakan harus tidak mengandung zat sebagai kehadiran zat lainnya dapat berbahaya bagi proses hidrasi semen dan daya tahan beton. Air yang mengandung kotoran yang cukup banyak akan mengganggu proses pengerasan atau ketahanan beton.

Air dalam campuran geopolimer tidak terlalu banyak, sehingga kekuatan paving block yang dihasilkan lebih tinggi. Pengurangan jumlah air berdampak pada rendahnya tingkat *workability* yang berakibat sulitnya proses pengadukan dan pencetakan.

### B.3.5 Bahan Tambah Kimia

*Chemical admixture* digunakan sesuai dengan kondisi dari lingkungan dan keinginan dari sifat pengerjaan. Penggunaan air pada campuran geopolimer sedikit. *Chemical admixture* tipe F yaitu *High Range Water Reducing* (HRWR) berfungsi untuk mengatasi kekurangan air dalam jumlah besar dan akan memperbaiki *workability* dari adukan beton geopolimer yang penggunaan airnya sedikit. Salah satu produk yang dapat digunakan untuk campuran ini adalah *Sikament NN* produk dari SIKA yang tergolong *chemical admixture* tipe F.

Menurut ASTM C 494 beberapa tipe *chemical admixture* yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Tipe *Chemical Admixture*

Type	Nama	Fungsi
Type A	Water Reducing (WR)	Mengurangi penggunaan air
Type B	Set Retarding (SR)	Memperlambat proses pengerasan beton
Type C	Set Accelerating (SA)	Mempercepat pengerasan beton
Type D	WR+SR	Mengurangi penggunaan air dan memperlambat proses pengerasan beton
Type E	WR+SR	Mempercepat pengerasan beton
Type F	HRWR	Mengurangi air dalam jumlah yang banyak
Type G	HRWR+SR	Mengurangi penggunaan air dalam jumlah banyak dan memperlambat proses pengerasan beton

Sumber : ASTM C 494

*Superplasticizer* yang terdapat di pasaran adalah jenis *Sikament- NN* produk dari SIKA. Dosis yang biasanya digunakan berkisar 1%-2% dari berat binder, dan pada penelitian geopolimer sebelumnya digunakan *superplasticizer* sebanyak 1,5% dari berat binder (Olivia, 2011).

### B.3.6 Semen Type 1 (*Ordinary Portland Cement*)

Semen *Portland* adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas *kalsium silikat* yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa *kalsium sulfat* dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain (SNI 15-2049-2004).

Semen *Portland* Tipe 1 digunakan untuk keperluan konstruksi umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus yaitu :

1. Tidak memerlukan ketahanan sulfat
2. Tidak memerlukan persyaratan panas hidrasi
3. Tidak memerlukan kekuatan awal yang tinggi.

## C. METODOLOGI PENELITIAN

### C.1 Persiapan Penelitian

Pada tahap ini dilakukan analisis pendahuluan terhadap abu sawit (Palm Oil Fuel Ash) Dumai, untuk mengetahui karakteristik kimia dari abu sawit tersebut, serta melakukan analisis material bahan pembuat paving block yaitu pasir.

### C.2 Pelaksanaan Penelitian

Pada tahap ini dilakukan pembuatan paving block geopolimer dengan dimensi 20x10x6 cm. Bahan-bahan penyusun paving block geopolimer diperoleh dengan perhitungan rencana adukan paving block berdasarkan perbandingan (abu sawit+alkali aktivator) : pasir (75% dari berat campuran) yaitu 1 : 3, dimana variasi yang dilakukan adalah perbandingan antara Abu sawit dengan larutan alkali aktivator (Ms) yaitu 0,8 ; 0,9 ; 1 ; 1,1 ; 1,2. Dengan memakai NaOH 16M, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 2,3 mol dan perbandingan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> : NaOH adalah 2. Penambahan semen untuk campuran yaitu 35% dari berat abu sawit yang dipakai.

Pencampuran paving block geopolimer dilakukan secara manual untuk menjamin campuran menjadi rata. Pada tahap pencetakan paving block dilakukan di tempat usaha pencetakan dengan alat pressing untuk mengurangi ketidakseragaman data akibat proses pemadatan yang berbeda.

### C.3 Tahap Pengujian

Pada tahap ini dilakukan pengujian paving block geopolimer sesuai umur rencana 7 hari dan 28 hari. Pengujian yang dilakukan yaitu sifat-sifat fisika paving block pengujian kuat tekan dan pengujian absorpsi (penyerapan) dengan mengacu standar mutu paving block. Setiap variasi memiliki 3 buah benda uji per setiap pengujian dan data yang diolah dengan merata-ratakan ketiga hasil benda uji tersebut.

## D. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### D.1 Analisis Karakteristik Abu Sawit

Tabel 3. Karakteristik Abu Sawit

Parameter	Hasil (%)
Silikon dioksida (SiO <sub>2</sub> )	54,53
Aluminium oksida (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15,90
Feroksida (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,86
Kalsium oksida (CaO)	7,49
Magnesium oksida (MgO)	1,21
Natrium oksida (Na <sub>2</sub> O)	0,09
Potassium oksida (K <sub>2</sub> O)	4,31
Mangan oksida (MnO)	0,07
Fosfor pentaoksida (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	4,90
Sulfur trioksid (SO <sub>3</sub> )	0,87
Tembaga (Cu)	0,02
Seng (Zn)	0,01
Kadar air	1,37

Sumber : Hasil Analisis Balai Riset dan Standarisasi Industri Padang, 2015

Dari tabel 3 diketahui bahwa abu sawit PT Surya Dumai, sebagian besar tersusun atas Silikon Dioksida (SiO<sub>2</sub>) sebesar 54,53% disusul dengan Aluminium Oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sebesar 15,90%. Dengan demikian abu sawit banyak mengandung unsur Si dan Al yang dapat bereaksi dengan ion OH<sup>-</sup> membentuk reaksi geopolimer.

### D.2 Analisis Propertis Pasir

#### D.2.1 Ukuran Partikel Pasir

Nilai modulus kehalusan pasir adalah 2,83. Nilai ini sudah sesuai dengan SNI-03-1968-1990 yaitu pada range 1,5 – 3,8. Dari hasil pemeriksaan ukuran butiran pasir yang dilakukan menunjukkan pasir termasuk dalam agregat halus zona 2 yaitu pasir agak halus, karena sebagian besar hasil ayakan berada pada range grafik gradasi dan batas gradasi agregat halus zona 2.

#### D.2.2 Analisis Kandungan Lumpur dan Kandungan Organik pasir

Pengujian kadar lumpur dihitung dengan perbandingan antara tinggi pasir dan



tinggi lumpur sebesar 4,12%. Persentase < 5% sehingga memenuhi syarat.

### D.2.3 Analisis Kadungan Organik Pasir

Sampel Pasir dimasukkan ke dalam wadah bening dan dicampurkan dengan larutan NaOH 3% kemudian didiamkan selama sehari. Amati perubahan warna dan cocokkan dengan warna standar. Warna yang dihasilkan sesuai warna standar adalah nomor 2 yang berarti sesuai dengan syarat yang minimal warna yang dihasilkan yaitu nomor 3 berdasarkan SNI 03-2816-1992.

### D.2.4 Analisis Kadar Air Pasir

Pemeriksaan kadar air pasir dilakukan dalam kondisi SSD. Dari hasil analisis laboratorium diketahui kadar pasir kondisi SSD sebesar 4,11% yang berarti sudah memenuhi SNI 03-1971-1990 yang mempunyai range 3 - 5%.

### D.2.5 Analisis Berat Jenis dan Berat Volume Pasir

Tabel 4. Hasil Pemeriksaan Berat Jenis dan Berat Volume

Analisis	Kondisi SSD	
Berat Jenis	2,60	kg/dm <sup>3</sup>
Berat Isi Padat	1,76	kg/dm <sup>3</sup>
Berat Isi Gembur	1,58	kg/dm <sup>3</sup>

Sumber : Hasil Analisis laboratorium (2015)

Hasil pemeriksaan terhadap berat jenis dan berat volume pasir sudah memenuhi SNI 03-1969-1990 (berat jenis) dan SNI 03-4804-1998 (berat volume).

## D.3 Hasil Pengujian Paving Block

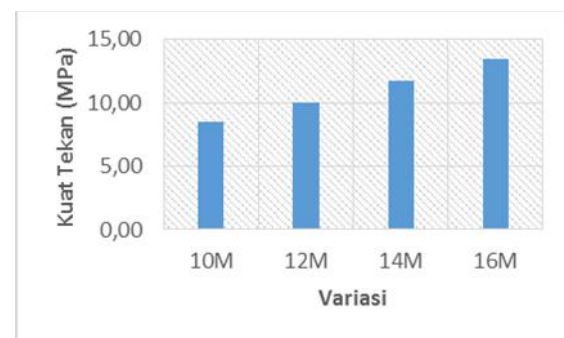
### D.3.1 Variasi Natrium Hidroksida (NaOH)

Pada Pengujian ini dilakukan variasi molar NaOH yaitu 10M, 12 M, 14M, 16M. Semakin tinggi nilai molar NaOH maka makin banyaknya ketersediaan ion OH<sup>-</sup> untuk bereaksi dengan Sil dan Al.

Tabel 5. Hasil Kuat Tekan Variasi M NaOH

Nomor Benda Uji	Kuat Tekan (Mpa)			
	Variasi Molar NaOH			
	10M	12M	14M	16M
1	8,4	9,9	12	13
2	9	10,5	11,6	13,5
3	8,2	9,8	11,8	14
Rerata	8,53	10,07	11,80	13,50

Sumber : Data Penelitian



Gambar 3. Grafik Hasil Kuat Tekan Variasi M NaOH

Sumber : Data Penelitian

### D.3.2 Variasi Perbandingan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan NaOH

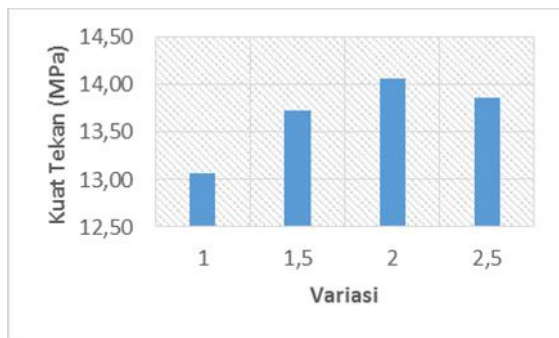
Pada Pengujian ini dilakukan Variasi Ms untuk larutan alkali aktivator yaitu 1, 1,5, 2, 2,5. Semakin tinggi nilai perbandingan maka jumlah Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> semakin banyak pada larutan alkali aktivator.

Tabel 6. Hasil Kuat Tekan Variasi Ms

Nomor Benda Uji	Kuat Tekan (Mpa)			
	Variasi (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> : NaOH)			
	Ms 1	Ms 1,5	Ms 2	Ms 2,5
1	13,6	13,7	13,8	13,8
2	12,4	14	14	14
3	13,2	13,5	14,4	13,8
Rerata	13,07	13,73	14,07	13,87

Sumber : Data Penelitian

Spesifikasi larutan alkali aktivator yang dipakai pada variasi ini adalah NaOH 16M dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 2,3 mol. NaOH 16M dipakai berdasarkan pengujian berdasarkan nilai optimum kuat tekan yang didapat.



Gambar 4. Grafik Hasil Kuat Tekan Variasi Perbandingan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$

Sumber : Data Penelitian

### D.3.3 Variasi Penambahan Semen (%)

Pada Pengujian ini dilakukan variasi penambahan semen. Penambahan semen dicampur dalam komposisi paving block geopolimer dari berat abu sawit yang berfungsi sebagai mempercepat reaksi dan masa perawatan dengan suhu ruang.

Semen yang dipakai adalah semen type 1 (Ordinary Portland Cement), yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas *kalsium silikat* yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa *kalsium sulfat* dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain (SNI 15-2049-2004).

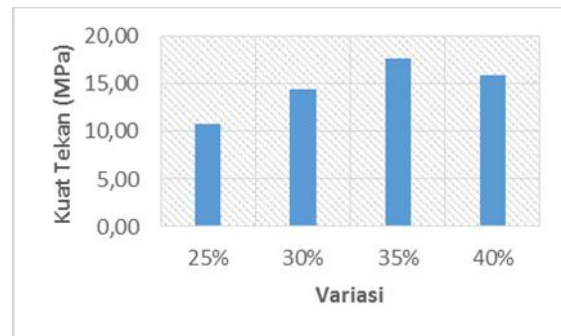
Tabel 7. Hasil Kuat Tekan Variasi Penambahan Semen

Nomor Benda Uji	Kuat Tekan (Mpa) Variasi Semen			
	25%	30%	35%	40%
1	11	15,2	18	16
2	10,8	14	18	16
3	10,5	14	17,2	16
Rerata	10,77	14,40	17,73	16,00

Sumber : Data Penelitian

Reaksi hidrasi pada semen akan menghasilkan energi panas saat semen dicampur dengan air (Nart, P, 2014). Energi panas ini yang digunakan mempercepat reaksi proses polimerisasi untuk membuat gel-gel yang dapat merekatkan antar partikel. Penambahan semen pada komposisi

geopolimer dimaksudkan untuk mempercepat reaksi sampai akhirnya mengeras dengan perawatan suhu ruang.



Gambar 5. Grafik Hasil Kuat Tekan Variasi Penambahan Semen

Sumber : Data Penelitian

### D.3.4 Mix Design

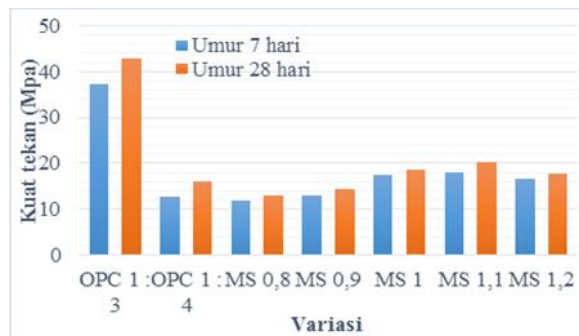
Dengan pengujian variasi yang dilakukan diambil kesimpulan komposisi paving block geopolimer memakai  $\text{NaOH}$  16M,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  2,3 mol dan penambahan semen 35% dari berat abu sawit.

Pengujian kuat tekan dilakukan pada saat *paving block* berumur 7 hari dan 28 hari dengan variasi Ms (alkali aktivator : abu sawit) untuk melihat perbedaan dari hasil yang didapatkan. Nilai kuat tekan berdasarkan nilai beban yang diterima *paving block* dengan luas permukaan tekan *paving block*. Sebagai kontrol dibuat paving block dengan semen type 1, dengan variasi perbandingan semen dan pasir

Tabel 8. Hasil Pengujian Kuat Tekan *Mix Design*

No.	Jenis	Variasi	Kuat tekan (Mpa)	
			Umur 7 hari	Umur 28 hari
1.	<i>Paving block</i> semen	OPC 1 : 3	37,33	42,83
		OPC 1 : 4	12,83	16,17
		Ms 0,8	11,83	13,00
2.	<i>Paving block</i> geopolimer	Ms 0,9	13,00	14,50
		Ms 1	17,33	18,67
		Ms 1,1	18,00	20,17
		Ms 1,2	16,67	17,67

Sumber : Data Penelitian



Gambar 6. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan Mix Design

Sumber : Data Penelitian

Kuat tekan *paving block* geopolimer meningkat dengan peningkatan modulus aktivator hingga Ms = 1,1, kemudian kuat tekan menurun pada nilai Ms = 1,2. Kuat tekan mortar geopolimer tertinggi diperoleh menggunakan mix 6 (Ms = 1,1) yaitu 20,17 Mpa pada umur 28 hari (mutu B). Sedangkan kuat tekan terendah menggunakan mix 3 (Ms = 0,8) sebesar 13 MPa pada umur 28 hari (mutu C).

## E. KESIMPULAN DAN SARAN

### E.1 Kesimpulan

1. Kuat tekan *paving block* abu sawit dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti variasi modulus aktivator (Ms), dosis aktivator (%Na<sub>2</sub>O), suhu perawatan, pengolahan abu sawit dan penambahan semen.
2. Peningkatan jumlah modulus aktivator dalam campuran geopolimer abu sawit akan meningkatkan kuat tekan *paving block* geopolimer.
3. Penambahan hasil kuat tekan *paving block* geopolimer dari umur 7 hari ke umur 28 hari tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan penambahan hasil kuat tekan *paving block* semen.
4. Hasil Pengujian kuat tekan dan absorpsi *paving block* geopolimer berbanding terbalik dari hasil pengujian. Semakin besar hasil kuat tekan, sebaliknya semakin kecil absorpsi dari *paving block* geopolimer.
5. Penambahan semen type 1 untuk geopolimer mempersingkat waktu ikat awal dan waktu ikat akhir.

6. Penambahan semen pada komposisi abu sawit bertujuan untuk mempercepat ikatan antar butiran (pasir) yang dirawat pada suhu ruang.

### E.2 Saran

1. Perlu adanya pengujian tambahan untuk *paving block* geopolimer seperti ketahanan aus serta umur pengujian yang lebih lama agar hasil penelitian lebih lengkap.
2. Perlu adanya penelitian lanjutan dengan menggunakan abu sawit yang diambil dari beberapa tempat yang berbeda.
3. Perlu adanya penelitian lanjutan mengenai larutan alkali aktivator yang dipakai untuk membuat komposisi geopolimer.

## DAFTAR PUSTAKA

Adam, A. A. 2009. *Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolimer concrete*. PhD Thesis of Civil, Environmental and Chemical Engineering. Melbourne: RMIT University.

ASTM C 55. 2001. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. United States: ASTM.

ASTM C 618-12a. 2012. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. United States : ASTM.

ASTM C 494. 2004. *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. United States : ASTM.

ASTM C 150. 2007. *Standard Specification for Portland Cement*. United States : ASTM.

ASTM C 642. 2006. *Standard Test Methods Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. United States: ASTM.

Davidovits, J. 1994. *Properties of geopolimer cements*. Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. 131-149.

Fernandez-Jimenez, A. dan Palomo, A. 2005. *Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the*



activator. *Cement and Concrete Research*. 35:1984-1992.

**Hardjito, D. dan Rangan, B.V.** 2005. *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete*. Research Report GC1 Faculty of Engineering. Perth : Curtin University of Technology.

**Laksmi, D. N et al.** 2010. *Pemanfaatan limbah fly ash sisa pembakaran batu bara dengan metode solidifikasi-stabilisasi sebagai bahan campuran paving block geopolimer*. Tugas Akhir Program Studi Teknik Lingkungan. Semarang : Universitas Diponegoro.

**Nart, P. dan Prabir, K.** 2014. *Use of OPC to Improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature*. Research Report GPO Faculty of Engineering. Perth : Curtin University of Technology.

**Nelville, A, M dan Brooks, J. J.** 2010. *Properties of Concrete*. Harlow : Pearson Education Limited.

**Nurzal, dan Joni. M.** 2013. *Pengaruh komposisi fly ash terhadap daya serap air pada pembuatan paving block*. *Jurnal Teknik Mesin*. 3:41-48.

**Olivia, M.** 2011. *Durability related properties of low calcium fly ash based geopolymer concrete*. Tesis Sarjana School of Civil and Mechanical Engineering Department of Civil Engineering. Perth : Curtin University of Technology.

**Palomo et al.** 1999. *Alkali-activated fly ashes A cement for the future*. *Cement and Concrete Research*. 29:1323–1329.

**Pamungkas et al.** 2007. *Komparasi mutu paving block antara metode mekanis dan konvensional dengan campuran endapan sampah ( studi kasus tpa banyu urip, magelang )*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik. Semarang : Universitas Diponegoro.

**Rakhmawati, A.** 2004. *Pengaruh Variasi Perbandingan campuran pasir dan Limbah Pengecoran Logam Terhadap Kualitas Paving*

*Block*. *Jurnal Fakultas Teknik Sipil*. Magelang : Universitas Tidar.

**SNI 03-0691-1996.** 1996. *Tentang bata beton (paving block)*. Bandung : Badan Standarisasi Nasional.

**SNI 15-2049-2004.** 2004. *Tentang sement portland*. Bandung : Badan Standarisasi Nasional.

**Tangchirapat, W.** 2007. *Use of waste ash from palm oil industry in concrete* ; 27; 81-8