

Fresh Karakteristik Beton Pasta Geopolimer Berbasis POFA dan OPC

Cut Yusnar

Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe
Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA
cut_yusnar@pnl.ac.id

Abstrak- Beton pasta geopolimer dibuat dari limbah pabrik industri kelapa sawit, yaitu cangkang sawit sisa dari biji sawit yang telah diperas minyaknya. Cangkang ini selanjutnya dibakar sehingga menjadi abu cangkang sawit. Abu cangkang sawit atau *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) yang sudah dibakar selanjutnya dicampur dengan *Ordinary Portland Cement* (OPC). Sebagai bahan pereaktif campuran ini digunakan activator larutan alkalin. Campuran ini disebut dengan pasta geopolimer. Penelitian ini bertujuan untuk melihat seberapa besar kontribusi POFA dalam rangka mencari bahan pengganti semen (*Cement Substitution*) dengan cara memberikan larutan alkalin dengan persentase yang beragam. Hasil penelitian menunjukkan persentase larutan alkalin yang terbaik adalah dengan persentase 10%. Penelitian juga dilakukan terhadap *fresh properties* dari pasta geopolimer POFA serta *rheology* material pembentuk pasta geopolimer. Hasil pengamatan terhadap *fresh properties* berupa pengujian inisial *setting* dan kekentalan campuran memperlihatkan semakin besar presentase larutan alkalin akan memperbesar waktu pengerasan serta menurunkan kekuatan.

Kata Kunci : Pasta Geopolimer, POFA, OPC.

Abstract- Geopolymer paste concrete is made from waste from the palm oil industry, namely palm shells left over from palm kernels that have been squeezed for oil. This shell is then burned so that it becomes palm shell ashes. Palm oil fuel ash (POFA) that has been burned is then mixed with Ordinary Portland Cement (OPC). As a reactive ingredient in this mixture, an alkaline solution activator is used. This mixture is called geopolymer paste. This study aims to see how big the contribution of POFA in finding cement substitutes by giving alkaline solutions with various percentages. The results showed that the best percentage of alkaline solution was 10%. Research was also conducted on the fresh properties of the POFA geopolymer paste and the rheology of the geopolymer paste-forming material. The results of observations on fresh properties in the form of initial setting and mixture viscosity tests show that the greater the percentage of alkaline solution will increase the setting time and reduce strength.

Keyword : Geopolymer Paste, POFA, OPC.

I. PENDAHULUAN

Produksi semen menghasilkan emisi yang diperkirakan meningkat sebesar 100% dari level saat ini pada tahun 2020, sehingga mengakibatkan dampak pemanasan global yang terjadi di dunia. Seiring dengan kemajuan teknologi didalam dunia teknik sipil saat ini banyak didapatkan teknologi-teknologi beton yang dapat dipergunakan dalam dunia konstruksi yang disebut dengan geopolimer. [1]

Menurut Davidovits (2017) beton geopolimer merupakan sintesa bahan-bahan alami non organik yang melalui proses polimerisasi. Ikatan polimerik yang dihasilkan berupa ikatan Si-O-Al-O (*sialate*) dengan cara membentuk senyawa SiO₄ dan AlO₄ yang membentuk ikatan segi empat secara bersamaan dalam tiga arah dengan oksigen. Penggantian Al³⁺ dengan Si⁴⁺ menyebabkan muatan negatif, sehingga membutuhkan alkali atau alkali tanah untuk menyeimbangkan, oleh karenanya ditambahkan material Na⁺, K⁺, Ca²⁺, atau Mg²⁺. [2]

Struktur geopolimer dapat dikategorikan menjadi tiga jenis, yaitu; poli *sialate* (Si-O-Al-O), poli *sialate-siloxo* yang membentuk rangkaian Si-O-Al-O-Si-O dan poli *sialate-disiloxo* yang membentuk rangkaian Si-O-Al-O-Si-O-Si-O. Pengikatan geopolimer yang diandai dengan adanya pengerasan merupakan hasil dari hidrolisis aluminat dan polikondensasi silikat. [3]

Pada proses pembuatan minyak dari buah kelapa sawit segar diekstraksi, selanjutnya sisa padatan dari produk berupa cangkang, serat, dan tandan kosong (70%

dari buah kelapa sawit segar) dihasilkan dari proses pembuatan minyak kelapa sawit. [1]

Danil Tarmizi (2014) dalam penelitiannya menyatakan bahwa limbah pembuatan minyak kelapa sawit digunakan kembali di pabrik kelapa sawit (PKS) sebagai bahan bakar *boiler* untuk menghasilkan *steam* yang berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dan menjalankan operasi internal. Pada proses pembakaran ini akan menyisakan abu sekitar 5% yang dikenal dengan abu pembakaran biomasa kelapa sawit (*palm oil fuel ash*/POFA). Abu cangkang kelapa sawit ini memiliki kandungan utama Silikon oksida (SiO₂) yang memiliki sifat reaktif. [4]

Berdasarkan SNI 15-7964-2004, *Ordinary Portland Cement* (OPC) adalah semen Portland tipe I yang merupakan perekat hidrolis yang dihasilkan dari penggilingan klinker yang terdiri dari oksida-oksida kapur (CaO), silikat (SiO₂), alumina (Al₂O₃), dan besi (Fe₂O₃).

Aktivator yang biasa digunakan untuk membuat geopolimer diantaranya adalah kombinasi antara Sodium hidroksida (NaOH) dengan Sodium silikat (Na₂SiO₃), atau Potassium hidroksida (KOH) dengan Potassium silikat (K₂SiO₃). Menurut Davidovits (2018) alkali aktivator memiliki fungsi dalam menghasilkan geopolimer dan meningkatkan laju reaksi. [5]

NaOH digunakan sebagai alkali aktivator dengan alasan harganya yang murah, memiliki viskositas rendah, dan mudah terurai menjadi Na⁺ dan ion OH⁻. Ion ini sangat penting dalam meningkatkan laju reaksi dari penguraian ikatan alumina dan silika. [5]

Workability adalah investigasi untuk mengukur parameter *rheology* dalam beton segar. *Workability* dari beton geopolimer lebih kecil dari *workability* beton konvensional. Hal ini disebabkan karena reaksi pada geopolimer lebih bersifat kohesif dibandingkan dengan beton konvensional, sehingga mengurangi segregasi dan *bleeding* pada beton segar. [6]

Sifat *workability* tergantung pada rasio larutan alkalin ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$). Konsentrasi larutan NaOH yang tinggi memberikan laju reaksi geopolimer yang lebih tinggi sedangkan konsentrasi larutan Na_2SiO_3 yang tinggi akan memberikan viskositas yang tinggi. Bila penggunaan NaOH saja tanpa Na_2SiO_3 akan mengurangi *workability* pada beton segar geopolimer. Kombinasi larutan NaOH dan Na_2SiO_3 dapat meningkatkan *workability* dan laju reaksi geopolimer. [6]

Pengamatan karakteristik *rheology* lainnya adalah *setting time*. *Setting time* geopolimer dipengaruhi oleh material larutan alkalin dan proporsi campuran. Material geopolimer dengan rasio Si : Al yang tinggi memberikan *setting time* yang lebih lama. Hal ini disebabkan karena silika larut pada polimerisasi tinggi yang menyebabkan pengurangan laju disolusi campuran dan mempromosikan pembentukan spesies yang lebih besar. Hal ini mengidentifikasi semakin lama *setting time* yang diperlukan oleh konten silika semakin lama *setting time* yang diperlukan oleh konten silika yang tinggi akan mengaktifkan kondensasi antara silika yang terhubung kepada oksigen (Si-O-Si) atau silica dan alumina (Si-O-Al). [7]

Kandungan kalsium (Ca) juga memainkan peran penting dalam menentukan *setting time*. Kandungan kalsium yang rendah akan menyebabkan perpanjangan *setting time* beton geopolimer dan sebaliknya. Kuat tekan yang tinggi pada usia awal diperoleh dengan *setting time* yang singkat, yang diperoleh dengan mengacu pada material yang mempunyai kalsium (Ca), sedangkan *setting time* yang lama pada kandungan Ca yang rendah menyebabkan perlambatan reaksi dalam system geopolimer yang menyebabkan kuat tekan rendah. [8]

Pengaruh suhu perawatan atau *curing* yang tinggi mampu mempercepat reaksi dalam system geopolimer sehingga apabila dalam campuran geopolimer yang mempunyai kadar kalsium yang rendah dapat dilakukan perawatan/*curing* pada suhu yang tinggi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kadar Ca sebesar 5-15% diperkirakan mempunyai peran penting pada *setting time* dan kuat tekan. [6]

Menurut Hardjito, et al. (2012) menjelaskan bahwa kuat tekan geopolimer meningkat secara proporsional seiring dengan peningkatan rasio larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ sebesar 2,5 untuk geopolimer berbahan *fly ash*. Lebih lanjut, rasio larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ adalah 0,24 untuk material geopolimer berbahan metakaolin. [9]

Penelitian terhadap lumpur merah sebagai material geopolimer untuk mengungkapkan bahwa terjadi

peningkatan kuat tekan dari hari 1 hingga hari ke-28 seiring dengan penambahan waktu. [9]

Penelitian ini bertujuan untuk mencari bahan pengganti semen dengan cara mensubstitusi 70% semen dengan bahan geopolimer. Dalam penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap *rheology* dan sifat mekanis pasta geopolimer berupa *workability* dan *setting time*. Sedangkan, pengamatan terhadap sifat mekanis pasta geopolimer dilakukan dengan serangkaian pengujian kuat tekan benda uji kubus ukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm dengan uji tekan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang digunakan pada penelitian ini memanfaatkan POFA yang diambil dari pabrik kelapa sawit Bumi Sejahtera. Selanjutnya, abu POFA disaring dengan menggunakan saringan no. 200 untuk memperoleh partikel yang halus. POFA yang digunakan dalam campuran adalah sebanyak 70%, sedangkan 30% nya adalah OPC.

Larutan alkalin aktivator dipersiapkan dengan konsentrasi 10 Molar (M) dengan variasi perbandingan antara $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ adalah 1,1; 1,2; dan 1,3. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel jumlah benda uji berikut ini.

Tabel 1. Jumlah Sampel Benda Uji Kubus 50 x 50 x 50 (mm)

OPC(gr)	POFA (gr)	LA	Na_2SiO_3	NaOH	Jumlah Sample
150 (30%)	350 (70%)	550(1.1)	1	3	15
150 (30%)	350 (70%)	600 (1.2)	1	3	15
150 (30%)	350 (70%)	650 (1.3)	1	3	15

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konstruksi dan Bahan Bangunan Politeknik Negeri Lhokseumawe, meliputi pengujian sebagai berikut :

1. Pengujian *fresh properties* terdiri atas pengujian kekentalan (*workability*) campuran dan pengujian waktu pengikatan awal (*setting time*).
2. Pengujian sifat mekanis geopolimer berupa pengujian kuat tekan.

Pembuatan benda uji diawali dengan mencampurkan POFA dan OPC sesuai dengan komposisi yang telah direncanakan, selanjutnya ditambahkan larutan alkalin dengan konsentrasi 10 M. Larutan alkalin dibuat dengan cara melarutkan NaOH ke dalam sejumlah air kemudian ditambahkan dengan larutan Natrium Silikat (Na_2SiO_3).

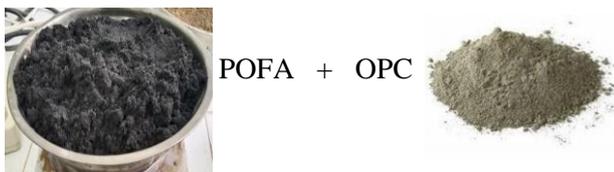
Campuran larutan alkalin ini dimasukkan ke dalam campuran POFA dan OPC lalu dimixer selama kurang lebih 10 menit, selanjutnya dimasukkan ke dalam cetakan kubus ukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm yang telah diolesi dengan oli sebelumnya.

Sebanyak 10 buah benda uji kubus dilakukan terhadap pengujian *rheology* (pengujian *workability* dan *setting time*), sedangkan 5 buah benda uji lagi dipersiapkan untuk pengujian karakteristik mekanis pasta geopolimer. Tata cara pengujian *workability* dan

setting time sesuai dengan SNI 03-2834-2000. Adapun, pengujian kuat tekan mortar sesuai dengan SNI 03-6825-2002 untuk umur mortar 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.

Hasil pengujian diperlihatkan dalam bentuk grafik. Adapun, pengujian terhadap mikrostruktur dilakukan pengujian FTIR dan pengujian SEM. Pengamatan mikrostruktur (FTIR dan SEM) dilakukan untuk melihat model ikatan senyawa rantai geopolimer.

Gambar berikut memperlihatkan cara pembuatan mortar geopolimer berbahan POFA + OPC.



Gambar 1. Bubuk POFA dan OPC

III. Hasil dan Pembahasan

3.1. Fresh Property untuk pengujian Workability dan Setting Time

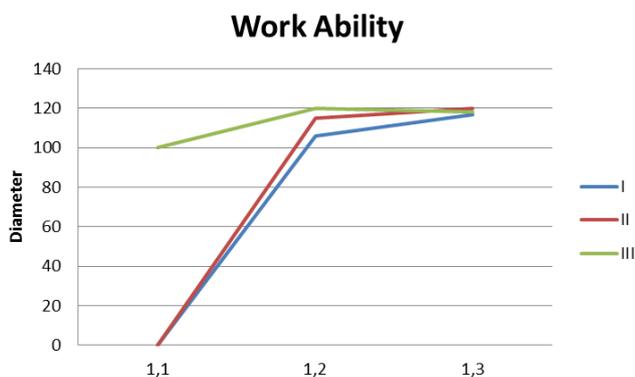
Fresh property yang diamati pada penelitian ini adalah data berupa kelecakan campuran (*workability*) dari campuran dengan komposisi konsentrat $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ masing-masing 1,1; 1,2 dan 1,3. Data fresh property yang kedua adalah waktu pengikatan awal (*Inisial Setting*) dan waktu pengikatan akhir (*Final Setting*).

3.1.1. Workability

Hasil pengamatan terhadap *workability* untuk campuran mortar geopolimer dengan komposisi $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 1,1; 1,2$ dan $1,3$ dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Komposisi Larutan Alkalin

Workability Pasta Geopolimer 10 M			
Campuran	Ø Benda Uji I	Ø Benda Uji II	Ø Benda Uji III
1,1	97,5	99,5	100
1,2	106	115	120
1,3	117	120	118



Gambar 2. Grafik Hubungan Antara Diameter Kekentalan Dengan Komposisi Alkalin

Workability dari campuran alkalin dengan perbandingan 1,1; 1,2 dan 1,3, dari grafik terlihat bahwa semakin besar perbandingan campuran Na_2SiO_3 terhadap NaOH memperlihatkan campuran semakin lama semakin encer yang ditandai dengan diameter lingkaran yang semakin besar. Dengan semakin besarnya perbandingan ion ini sangat penting dalam meningkatkan laju reaksi dari penguraian ikatan alumina dan silika. [6]

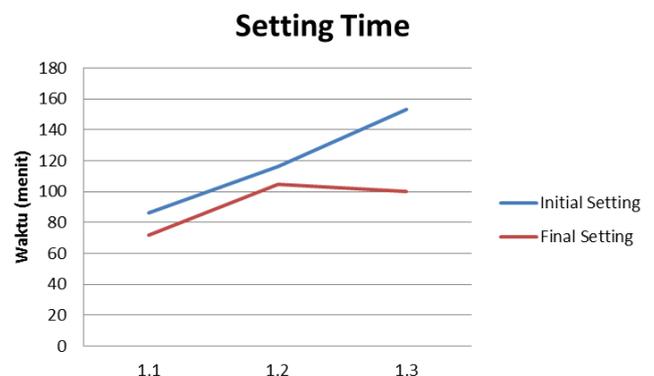
Kecepatan laju reaksi penguraian ikatan alumina dan silika ditandai dengan mengerasnya campuran mortal geopolimer. Untuk mengukur berapa lama waktu yang dibutuhkan agar terjadi proses peningkatan awal diuji dengan pengujian *setting time*. Berikut diperlihatkan *setting time* untuk campuran 1,1; 1,2 dan 1,3.

3.1.2. Setting Time

Hasil penelitian terhadap waktu pengikatan baik pengikatan awal maupun pengikatan akhir pada konsentrat campuran $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 1,1; 1,2$ dan $1,3$ diperlihatkan pada tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Setting Time Untuk Berbagai Campuran Alkalin Pada Komposisi 70% POFA dan 30% OPC

Setting Time Pasta Geopolimer 10 M		
Campuran	Waktu Inisial Setting (menit)	Waktu (menit) Inisial Setting
1,1	86	72
1,2	116	105
1,3	153	100



Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Waktu Pengikatan Dengan Komposisi Campuran NaOH dan Na_2SiO_3

Inisial *setting* pada perbandingan campuran $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ 1,1 waktu pengikatan awal terjadi pada menit ke 86 sedangkan untuk konsentret alkalin 1,2 waktu pengikatan awal terjadi pada menit ke 116 sedangkan pada konsentret alkalin 1,3 waktu pengikatan awal terjadi pada menit ke 153.

Adapun waktu *final setting* atau pengikatan akhir untuk konsentret 1,1 terjadi pada menit ke 72, untuk konsentret 1,2 *final setting* terjadi pada menit 105 dan untuk konsentret 1,3 *final setting* terjadi pada menit ke 100.

Dari hasil pengamatan pada penelitian substitusi semen (OPC) sebanyak 70% dengan POFA

sebanyak 30% dan konsentrat larutan alkalin masing-masing dengan perbandingan 1,1; 1,2 dan 1,3 terlihat waktu yang dibutuhkan baik untuk pengerasan awal atau inisial *setting* maupun pengerasan akhir semakin tinggi konsentrat semakin lama waktu pengerasannya hal ini sesuai dengan hasil penelitian Nath, (2014). Hal ini disebabkan karena terjadi karena silika larut pada polimerisasi tinggi yang menyebabkan pengurangan laju disolusi kandungan yang mempromosikan pembentukan rantai yang lebih besar.

Pada konsentrat yang semakin tinggi membutuhkan waktu pengikatan akhir yang lebih lama karena senyawa silika membutuhkan waktu yang lama untuk mengaktifkan kondensasi antara silika yang terhubung kepada oksigen atau rantai (Si-O-Si) dan alumina Si-O-Al hasil pengamatan ini sesuai dengan hasil penelitian. [8]

3.2. Pengujian Mekanis Mortar Geopolimer Berupa Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dalam penelitian ini menggunakan benda uji kubus mortar dengan ukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm. Prosedur pelaksanaan kuat uji tekan mortar geopolimer mengacu kepada prosedur kuat tekan mortar OPC. Namun, mortar geopolimer tidak mengalami perendaman sebelum pengujian. Hal ini dikarenakan sifat reaksi geopolimer yang bukan berasal dari proses hidrasi. Berikut hasil pengujian kuat tekan dari mortar geopolimer.

Hasil pengujian kuat tekan rata-rata mortar geopolimer untuk konsentrat perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH masing-masing dengan perbandingan 1,1; 1,2 dan 1,3 untuk pengujian 1 hari, 3 hari, 7 hari, dan 28 hari dapat dilihat pada tabel 4 berikut ini.

Tabel 4. Kuat Tekan Rata-Rata Untuk Perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH Pada Umur 1, 3, 7, dan 28 Hari

Umur (Hari)	Kuat Tekan (Km/mm ²)		
	1,1	1,2	1,3
1	10,4	9,4	6,5
3	23,7	17,2	12,3
7	28,7	25,4	21,1
28	32,3	28,2	25,7



Gambar 4. Grafik Kuat Tekan Mortar Geopolimer POFA dan OPC = 70% : 30% Dengan Molaritas NaOH = 10 M

Pada gambar 4 diperlihatkan hasil pengujian kuat tekan pada 1 hari, 3 hari, 7 hari dan 28 hari untuk benda uji kubus geopolimer dengan komposisi 70% dan 30% OPC pada konsentrat Na_2SiO_3 : NaOH = 1,1; 1,2 dan 1,3. Grafik pengujian kuat tekan untuk konsentrat 1,2 memperlihatkan kecenderungan nilai kuat tekan berbanding lurus pada umur benda uji 3 hari dan 7 hari. Sedangkan, pada konsentrat 1,1 dan 1,3 nilai kuat tekan membentuk parabolik pada pengujian kuat tekan 3 hari, 7 hari dan 28 hari.

Nilai kuat tekan optimum diperoleh sebesar 32,3 mpa yang terjadi pada konsentrat 1,1 pada umur 28 hari. Adapun, kuat tekan minimum terjadi pada rasio konsentrat 1,3 dengan nilai kuat tekan 25,7 mpa pada umur 28 hari. Hasil penelitian memperlihatkan pada konsentrat 1,3 terjadi penurunan kekuatan sebesar 3 mpa pada umur 28 hari. Hal ini dapat dikaitkan dengan makin tingginya larutan alkalin menyebabkan terjadinya penurunan kekuatan. Dapat disimpulkan bahwa dengan semakin tingginya penggunaan alkalin pada campuran mortar geopolimer dengan perbandingan POFA : OPC = 70% : 30% mengakibatkan menurunnya kuat tekan.

3.3. Karakteristik Mortar Geopolimer POFA : OPC = 70% : 30% Dalam Kaitannya Antara *Setting Time*, *Workability* dan Nilai Kuat Tekan Pada Umur 28 Hari

Analisa karakteristik mortar geopolimer berbahan POFA dan OPC dengan perbandingan 70 : 30 pada umur mortar 28 hari dapat dijelaskan sebagai berikut, rata-rata kuat tekan pada umur 28 hari tertinggi adalah pada konsentrat 1,1 sebesar 32,3 mpa dengan waktu pengikatan awal sebesar 86 menit dan waktu pengikatan akhir selama 72 menit dengan diameter kekentalan campuran atau *workability* sebesar 97,5. Dalam kondisi ini ada kaitan antara diameter *workability*, waktu pengerasan awal serta nilai kuat tekan. [10]

Adapun pada kosentrat perbandingan Na_2SiO_3 : $\text{NaOH} = 1,2$ nilai kuat tekan yang diperoleh sebesar 28,2 mpa atau terjadi penurunan sebesar 12,69 % hal ini ditandai juga dengan semakin panjangnya waktu pengikatan awal yaitu 116 menit dan waktu peningkatan akhir 105 menit gejala ini juga sudah ditunjukkan dengan melebarnya diameter pada pemeriksaan *workability* hingga mencapai 106 dari 97,5. Pada kosentrat yang ketiga yaitu dengan perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH kekuatan beton semakin menurun sebesar 20,4 % dari kekuatan optimum pada kosentrat 1,1 sebesar 32,3 mpa. Gejala lainnya diperlihatkan juga oleh waktu pengikatan awal yang semakin panjang yaitu 153 menit dari 86 menit pada kosentrat 1,1 dan nilai pengikatan akhir sebesar 100.

Dari hasil pengamatan penelitian terhadap *rheology* pasta geopolimer berbahan POFA dan OPC dengan komposisi 70% : 30% dan menggunakan larutan alkalin dengan perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH sama dengan 1,1; 1,2; dan 1,3 pada molaritas NaOH sama dengan 10 Molar terlihat adanya keterkaitan antara *workability*, *setting time* dan nilai kuat tekan yang diperoleh. Nilai optimum kekuatan mortar geopolimer diperoleh dari benda uji yang dibuat dengan menggunakan larutan alkalin aktivator pada komposisi POFA dan OPC 70% : 30% diperoleh dari komposisi perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH sama dengan 1,1.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil pengamatan penelitian terhadap *rheology* pasta geopolimer berbahan POFA dan OPC dengan komposisi 70% : 30% pada komposisi perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH yang melebihi 1,1 terjadi penurunan kekuatan. Rata-rata penurunan kekuatan adalah 12% dan 20%. Hasil penelitian ini

memperlihatkan bahwa pada mortar dengan kombinasi POFA dan OPC tidak terjadi peningkatan kekuatan dengan kenaikan rasio larutan Na_2SiO_3 : NaOH sebagaimana yang dilaporkan oleh Hardjito, et al (2012) dalam penelitiannya terhadap mortar geopolimer berbahan *fly ash* dimana terjadi peningkatan kekuatan seiring dengan peningkatan rasio perbandingan Na_2SiO_3 : NaOH .

Diperlukan investigasi lebih lanjut guna melihat secara detail faktor-faktor yang terkait di dalam komposisi mortar geopolimer berbahan POFA dan OPC.

REFERENSI

- [1] Y. Cut. Substitusi Bahan Pengganti Semen dan Material Geopolimer. Jurnal Teknologi, no.3, 2017.
- [2] J. Davidovits. Geopolimer: Ceramic like Inorganic Polymer. Journal of Ceramic Science and Technology, vol. 8, ed. 3, pp. 335-350, 2017.
- [3] D. Hardjito and B. V. Rangan. Development and Properties of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete. 2005.
- [4] K. N Danil Tarmizi. Sifat-sifat Mekanik Komposisi Propilena Berpengisi Abu Pembakaran Biomassa Kelapa Sawit. Jurnal Teknik Kimia USU, vol. 3, no. 1, 2014.
- [5] J. Davidovits. Why Alkali Activated Material are Not Geopolymers?. 2018.
- [6] P. Nath & P. K Sarker. Effect of GGBFS on Setting Time, Workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Condition. Journal Construction and Building Materials, vol. 66, pp. 163-171, 2014.
- [7] C. Shi., et al. Alkali Activated Cement and Concretes. Taylor & Francis, 2006.
- [8] F. Winnefeld., et al. Assessment of Phase Formation in Alkali Activated Low and High Calcium Fly Ash in Building Materials. Journal Construction and Building Materials, vol. 24, ed. 6, pp. 1086-1093, 2010.
- [9] D. Hardjito., et al. Pozzolanic Activity Assessment of LUSI Mud (Lumpur Sidoarjo) in Semi High Pozzolanic Mortar. Journal Materials, vol. 5, ed. 9, pp. 1645-1660, 2012.
- [10] R. Yuliana. Karakteristik Fisis dan Mekanis Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash). 2013.