

**KARAKTERISTIK FISIS DAN MEKANIS  
ABU SAWIT (*PALM OIL FUEL ASH*) DALAM GEOTEKNIK**

Rizqi Yuliana  
Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau  
Email: rizqiyuliana90@gmail.com

Muhardi  
Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau  
Email: muhardi@unri.ac.id

Ferry Fatnanta  
Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau  
Email: fatnanto1964@gmail.com

***ABSTRACT***

POFA is an agrowaste ash which is produced from fibers, nut shells, and empty fruit bunches when burnt at temperatures of about 800-1000<sup>0</sup>C in boiler. The production of POFA is rising every year, it is disposed for landfills, now become an important environmental disposal issue. A large area is required for the disposal of these POFA waste materials. The landfill of POFA is the problem for the palm oil industry when it is not reused for any work.

POFA contains a large amount of silicon dioxide with high pozzolanic reactivity and has high potential to be used in any engineering work. This research examined POFA characteristics in geotechnical application and its influence by curing periods on 0, 7 and 28 days.

In this paper, physical and mechanical characteristics of POFA in geotechnical work will be shown. The chemical composition of POFA prove the existence of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO as important substances supporting pozzolan reaction during cured. The result shows that the characteristic of POFA has similar behaviour with sands. Coefficient of permeability decreased during curing periods. Besides, cohesion shear strength, angle of friction, cohesion undrained, and CBR value are improve during curing periods.

Keywords: POFA, geotechnic, pozzolan reaction

**PENDAHULUAN**

Indonesia merupakan salah satu produsen *Crude Palm Oil* (CPO) terbesar di dunia dan memiliki lahan kelapa sawit terluas di dunia. Luas areal kelapa sawit di Indonesia tahun 2006 diperkirakan mencapai 5,9 juta ha ( Dirjen Perkebunan Deptan, 2006). Luas areal perkebunan kelapa sawit meningkat menjadi 6,6 juta ha pada tahun 2007 dan produksi CPO pada tahun tersebut mencapai 17,3 juta ton.

Wilayah perkebunan sawit terluas terdapat di Sumatera, yaitu Provinsi Riau seluas 1,3 juta ha, dengan total produksi 3,7 juta ton ( Badan Pusat Statistik Riau, 2003). Pada tahun 2008 kebun kelapa sawit terluas di Indonesia masih dimiliki oleh Provinsi Riau. Luas kebun kelapa sawit di Provinsi Riau mencapai 1,6 juta ha yang semuanya tersebar di seluruh kabupaten dan kota di Provinsi Riau. Areal ini setiap tahun terus meningkat, sehingga abu limbah kelapa sawit juga terus meningkat.

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.

POFA dapat digunakan sebagai pozzolan, yaitu bahan halus yang mengandung silika dan alumina yang dapat bereaksi dan membentuk bahan semen (ASTM, 2001). POFA mengandung silikon dioksida yang tinggi dan berpotensi untuk digunakan sebagai bahan pengganti semen. POFA adalah bahan pozzolanic yang menjanjikan dan banyak tersedia di seluruh bagian dunia (Tangchirapat, 2009). Pemanfaatan POFA yang tepat dapat mengurangi penggunaan semen dan mengurangi volume limbah sehingga sangat bermanfaat bagi kelestarian lingkungan (Tangchirapat, 2009).

Sejauh ini pemanfaatan POFA di bidang teknik sipil sudah sering dilakukan. Aplikasi pemanfaatan POFA sebagai *filler* sudah dilakukan pada campuran beton dan aspal. Pemanfaatan POFA untuk stabilisasi tanah juga telah dilakukan. Namun, penelitian tentang karakteristik POFA masih jarang dilakukan. Maka perlu adanya upaya dalam memanfaatkan POFA yang lebih efisien dan tepat guna dengan terlebih dahulu melakukan penelitian tentang karakteristik dari POFA di laboratorium.

Berdasarkan uraian yang telah dipaparkan maka dapat dirumuskan masalah yang akan diteliti yaitu: bagaimana karakteristik fisis dan mekanis dari POFA yang berasal dari PT. Sarikat Putera Riau, serta pengaruh perilaku mekanis POFA dalam geoteknik akibat adanya masa pemeraman selama 0, 7 dan 28 hari.

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui sifat fisis dan mekanis POFA yang berasal dari PT. Sarikat Putera Riau
2. Untuk mengetahui pengaruh perilaku mekanis POFA dalam geoteknik akibat adanya masa pemeraman selama 0, 7 dan 28 hari.
3. Untuk menjadi acuan dalam aplikasi geoteknik selanjutnya.

### **Abu sawit (POFA)**

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.

Proses ekstraksi 100 ton tandan buah segar akan menghasilkan 20 ton cangkang, 7 ton serat, dan 25 ton tandan kosong (Tay, 1995). Perkembangan industri kelapa sawit yang terus meningkat akan berdampak pada peningkatan limbah padat yang dihasilkan dari pengolahan tandan buah segar (TBS).

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 (Endriani, 2012). 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.

Pemanfaatan POFA hingga kini masih minim dan belum terkelola dengan baik, sementara jumlahnya terus meningkat 0,1 juta ton per tahun dan membutuhkan lahan untuk pembuangan sehingga menimbulkan masalah lingkungan (Tangchirapat et al, 2006).

### **Pemanfaatan POFA**

POFA adalah salah satu abu limbah industri yang komposisi kimianya mengandung kadar silika yang tinggi dan sangat berpotensi tinggi untuk digunakan sebagai pengganti semen (Tangchirapat et al., 2003). Menurut Sata (2004), POFA dengan kehalusan yang tinggi dengan  $d_{50} = 10.1 \mu\text{m}$  adalah material reaktif pozzolanic yang bisa digunakan untuk membuat beton dengan mutu tinggi.

Tangchirapat (2006), dalam penelitiannya memanfaatkan POFA yang berasal dari PKS di Thailand Selatan dalam campuran beton. Pada penelitiannya, Tangchirapat (2006) menggunakan POFA yang telah disaring menggunakan saringan No. 16 (1,18 mm). Menurutnya, POFA digunakan sebagai bahan penelitian adalah POFA yang telah lolos saringan No. 16 karena telah terpisahkan dari serabut dan arangnya. POFA yang digunakannya ini disebut *original* POFA.

Mohammed et al (2007) meneliti perilaku tanah granit yang distabilisasi dengan POFA dan kapur. POFA pada penelitian tersebut diambil dari PKS di Johor, Malaysia. Mohammed et al (2007) menggunakan POFA yang disaring hingga berukuran  $300 \mu\text{m}$  hingga  $425 \mu\text{m}$ . Ukuran ini menurut standar ASTM, adalah POFA yang lolos saringan No. 40 dan tertahan saringan No.50.

Fitri et al (2007) meneliti POFA sebagai bahan stabilisasi pada tanah lempung yang terganggu. POFA pada penelitian tersebut diambil dari PKS di Malaysia. Dalam penelitiannya, Fitri et al (2007) menggunakan POFA yang berukuran  $300 \mu\text{m}$  hingga  $425 \mu\text{m}$ . Ukuran ini menurut standar ASTM, adalah POFA yang lolos saringan No. 40 dan tertahan saringan No.60.

Aplikasi dalam ilmu teknik, POFA dimanfaatkan sebagai bahan tambahan pengeras semen dalam desain beton mutu tinggi, pengganti sebagian semen, bahan pengisi dalam lapisan perkerasan jalan raya, bahan stabilisator campuran tanah lempung dan tanah dasar pada lapisan jalan raya (Endriyani, 2012).

## **METODOLOGI PENELITIAN**

Pelaksanaan penelitian dilakukan secara eksperimental, di Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau. Pengujian yang dilakukan antara lain pengujian karakteristik fisis dan mekanis.

Pengujian perilaku fisis meliputi analisa saringan dan berat jenis. Selanjutnya dilakukan pengujian proktor untuk memperoleh kadar air optimum yang akan digunakan sebagai kadar air campuran pada POFA untuk pembuatan benda uji. Penelitian ini dilanjutkan dengan persiapan benda uji yang diperam sesuai umurnya untuk pengujian perilaku mekanis seperti pengujian geser langsung, permeabilitas, UCS dan CBR.

Benda uji selanjutnya diuji sesuai dengan masa pemeraman yaitu 0, 7, dan 28 hari. POFA yang digunakan berasal dari PT. Sarikat Putera Riau, di Riau. Pengujian komposisi kimia POFA dilakukan di Laboratorium Pusat Sumber Daya Geologi di Bandung.

## **ANALISA HASIL PENELITIAN**

### **Hasil Pengujian Karakteristik Kimia POFA**

Komposisi kimia dari POFA sebagian besar tersusun dari unsur-unsur Si, Al, Fe, Ca, serta Mg, S, Na dan unsur kimia lainnya. Hasil pengujian dan perbandingan komposisi kimia

POFA yang berasal dari PT. Sarikat Putera Riau pada penelitian ini dan beberapa penelitian terdahulu dengan sumber POFA yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan komposisi kimia POFA

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Referensi
43,60	11,50	4,70	8,40	4,80	2,80	3,50	Awal, 1997
57,70	4,50	3,30	6,50	4,20	0,20	8,20	Jaturapitakul, 2007
57,80	4,60	3,30	6,60	4,20	0,30	8,30	Chindaprasirt, 2007
63,60	1,60	1,40	7,60	3,90	0,20	6,90	Chindaprasirt, 2008
48,99	3,78	4,89	11,69	1,22	-	10,51	Eldagal, 2008
65,30	2,50	1,90	6,40	3,00	0,40	5,70	Tangchirapat, 2009
63,60	1,50	1,50	7,50	3,90	0,20	6,90	Rukzon, 2009
45,17	1,21	0,32	19,77	3,01	5,2	7,35	Kaosol, 2010
79,30	3,15	7,12	2,79	1,21	0,45	3,23	Safiuddin, 2010
67,40	10,01	0,01	1,54	3,02	-	-	Endriyani, 2012
<b>64,36</b>	<b>4,36</b>	<b>3,41</b>	<b>7,92</b>	<b>4,58</b>	<b>0,04</b>	<b>5,57</b>	<b>Hasil Pengujian, 2013</b>

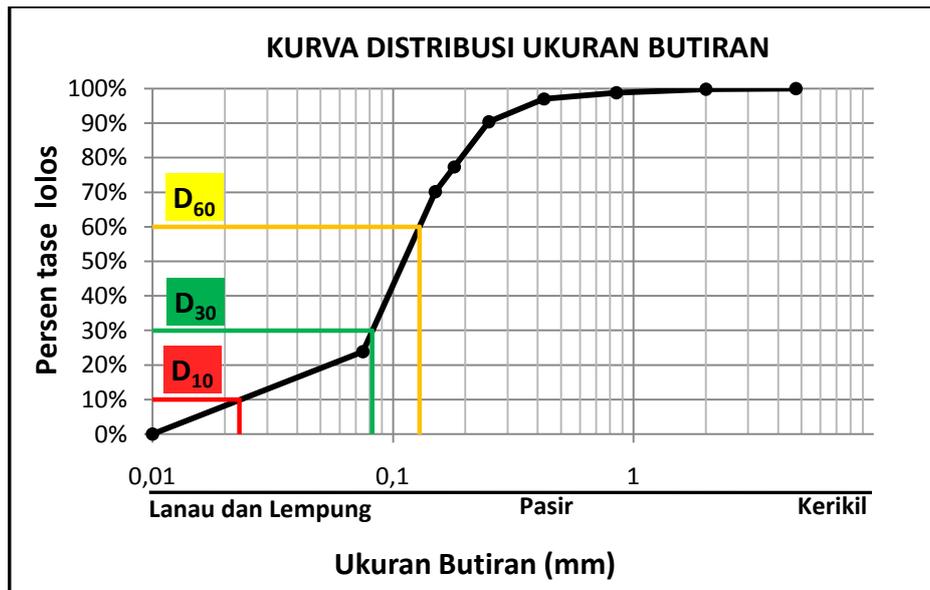
Tabel 1 menunjukkan komposisi senyawa kimia yang terkandung dalam POFA dari berbagai penelitian. Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat bahwa jumlah kandungan SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dari POFA pada penelitian ini lebih dari 70%. Menurut ASTM C618 (ASTM, 2001), hal ini berarti bahwa POFA pada penelitian ini termasuk ke dalam bahan pozzolan tipe F. Hal ini juga bersesuaian dengan penelitian Safiuddin (2010) dan Endriyani (2012) dimana POFA pada penelitian tersebut juga tergolong ke dalam kategori bahan pozzolan tipe F.

#### **Hasil Pengujian Karakteristik Fisis POFA**

Pengujian karakteristik fisis POFA meliputi pengujian analisa ukuran butiran dan berat jenis. Secara visual POFA benda uji berwarna hitam keabu-abuan dan berbutir halus.

#### **Hasil Pengujian Analisa Ukuran Butiran**

Kurva distribusi ukuran butiran POFA berdasarkan pengujian analisa saringan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva distribusi ukuran partikel POFA

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa ukuran butiran dari POFA pada penelitian ini didominasi oleh butiran seperti pasir yang seragam dengan ukuran partikel berkisar 0,076 mm - 4,75 mm. Hasil pengujian analisa ukuran butiran POFA pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil pengujian analisa ukuran butiran benda uji

Benda Uji	$\leq 0,075$ mm	0,075 mm $\leq 4,75$ mm	$> 4,75$ mm	Koefisien Gradasi, $C_c$	Koefisien Keseragaman, $C_u$	USCS	AASHTO
S0-1	18,89	81,11	-	1,963	4,690	SP	A-3
S0-2	23,71	76,29	-	2,227	5,500	SP	A-3
S0-3	23,85	76,15	-	2,266	5,609	SP	A-3

Sumber: Hasil pengujian, 2013

Pada Tabel 2 dapat dilihat nilai  $C_c$  dan  $C_u$  dari POFA yang diuji pada penelitian ini. Nilai  $C_c$  POFA berkisar antara 1,963 - 2,266 dan nilai  $C_u$  berkisar antara 4,690 - 5,609. Berdasarkan pengklasifikasian USCS, nilai  $C_c$  dan  $C_u$  POFA pada penelitian ini dapat diklasifikasikan ke dalam golongan *poorly graded sand* (SP) atau pasir bergradasi buruk. Sedangkan berdasarkan AASHTO, POFA pada penelitian ini dapat diklasifikasikan ke dalam golongan A-3 yaitu tanah granular.

#### Hasil Pengujian *Specific Gravity*

Berdasarkan pengujian *specific gravity*, diperoleh nilai rata-rata *specific gravity* POFA yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebesar 2,47. Hal ini sesuai dengan nilai *specific gravity* pada penelitian yang dilakukan Jaturapitakul (2007) yaitu 2,43, Chindaprasirt (2007) yaitu 2,43 dan Sata (2010) 2,50.

Apabila dibandingkan dengan nilai  $G_s$  OPC, maka nilai  $G_s$  POFA pada penelitian ini dan penelitian sebelumnya memperlihatkan nilai yang lebih kecil. Sedangkan apabila dibandingkan dengan *waste material* lainnya seperti *fly ash*, maka nilai  $G_s$  POFA pada penelitian ini dan penelitian sebelumnya lebih besar dari nilai  $G_s$  *fly ash*. Sedangkan untuk

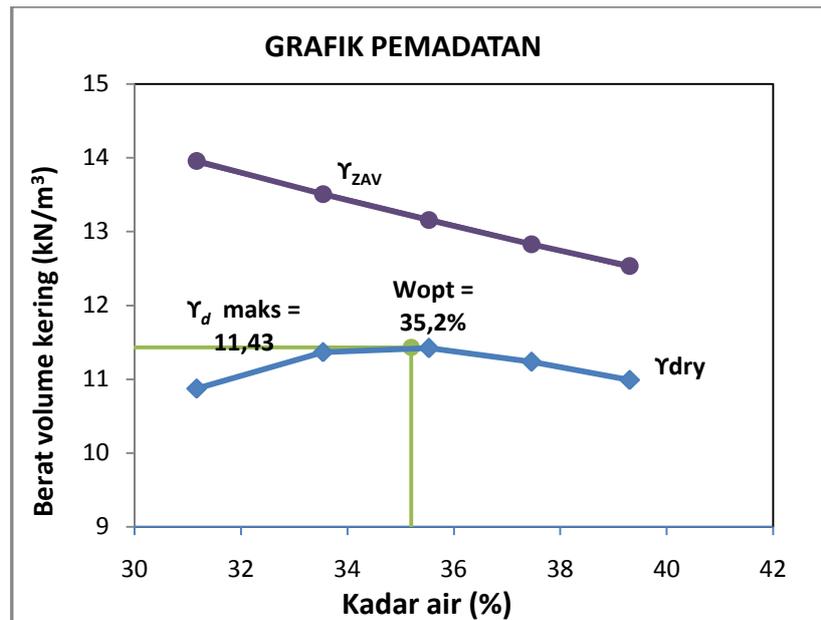
waste material seperti *bottom ash*, maka nilai  $G_s$  POFA pada penelitian ini mendekati nilai  $G_s$  *bottom ash*.

### Hasil Pengujian Karakteristik Mekanis POFA

Pengujian karakteristik mekanis POFA meliputi pemadatan proktor standar, permeabilitas, geser langsung, UCS, dan CBR.

### Hasil Pengujian Proktor Standar

Perilaku pemadatan standar pada POFA dari PT. Sarikat Putera Riau yang diuji pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perilaku pemadatan POFA

Pada puncak kurva dapat dilihat nilai kadar air optimum ( $w_{opt}$ ) sebesar 35,2% dan berat volume kering maksimum ( $\gamma_d \max$ ) yaitu 11,43 kN/m<sup>3</sup>. Nilai kadar air optimum ( $w_{opt}$ ) yaitu 35,2% ini selanjutnya digunakan dalam setiap pembuatan benda uji untuk pengujian karakteristik mekanis lainnya.

Kurva pemadatan POFA memperlihatkan jenis kurva yang mempunyai 1 puncak dan berbentuk bel. Kurva hubungan antara ( $\gamma_d$ ) dan ( $w_{opt}$ ) POFA ini memperlihatkan bentuk yang serupa dengan kurva pemadatan *waste material* lainnya seperti *bottom ash* yang diuji oleh Megel et al (2006).

### Hasil Pengujian Permeabilitas

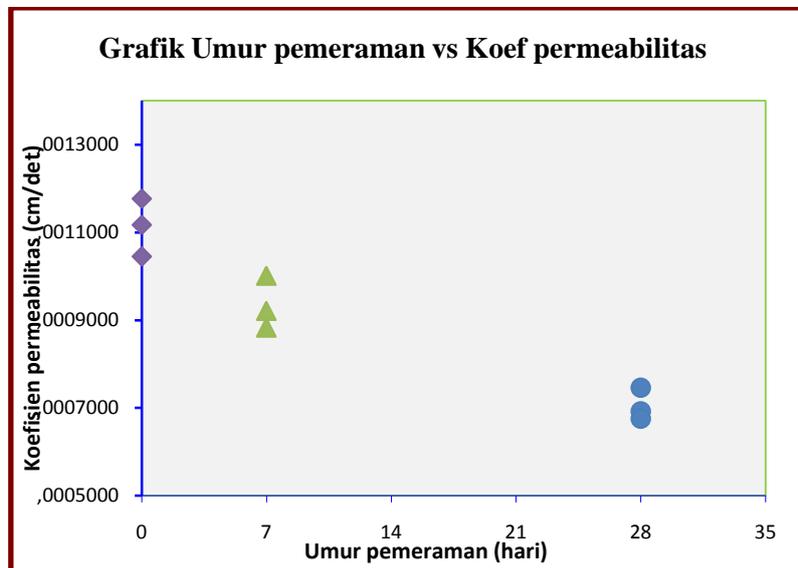
Pengujian permeabilitas digunakan untuk memperoleh nilai koefisien permeabilitas dari suatu material. Pada pengujian ini digunakan metode tinggi konstan (*constant head*) karena POFA merupakan material granular.

Berdasarkan pengujian permeabilitas POFA pada pengujian ini, nilai koefisien permeabilitas POFA (0 hari) yaitu 0,0011 cm/det termasuk dalam rentang kategori pasir halus yaitu 0,001 - 0,01 cm/detik. Hasil pengujian permeabilitas POFA yang diuji pada penelitian ini disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Hasil pengujian permeabilitas

Benda Uji	Koefisien Rembesan (k) (cm/det)	Benda Uji	Koefisien Rembesan (k) (cm/det)	Benda Uji	Koefisien Rembesan (k) (cm/det)
S0-1	0,0010	S7-1	0,0010	S28-1	0,0007
S0-2	0,0011	S7-2	0,0009	S28-2	0,0007
S0-3	0,0012	S7-3	0,0009	S28-3	0,0007
Rerata	0,0011	Rerata	0,0009	Rerata	0,0007
Max	0,0012	Max	0,0010	Max	0,0007
Min	0,0010	Min	0,0009	Min	0,0007

Grafik hubungan antara umur benda uji terhadap koefisien permeabilitas POFA dapat dilihat pada Gambar 3.



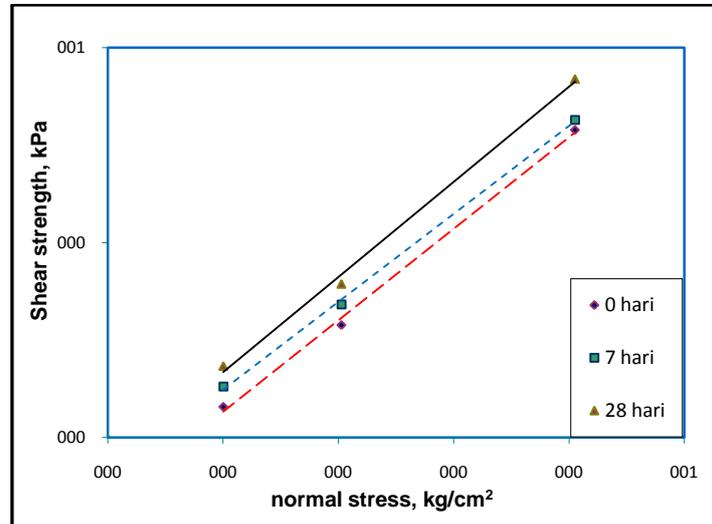
Gambar 3 Grafik hubungan umur pemeraman POFA terhadap koefisien permeabilitas

Berdasarkan grafik hubungan antara umur pemeraman POFA terhadap koefisien permeabilitas, dapat dilihat bahwa nilai koefisien permeabilitas POFA menurun seiring dengan pertambahan umur pemeraman. Pengecilan koefisien permeabilitas ini dapat terjadi akibat adanya pengaruh POFA sebagai bahan pozzolan, yaitu terjadi pembesaran partikel POFA setelah pemeraman seperti yang dikemukakan oleh Muhardi et al (2010) pada penelitiannya terhadap sampel berupa *bottom ash*. Reaksi ini juga dapat menyebabkan rongga pori pada POFA mengecil dan memperlambat laju aliran air melalui pori-porinya.

Koefisien permeabilitas POFA pada penelitian ini lebih besar dari koefisien permeabilitas *fly ash* dan mendekati koefisien permeabilitas *bottom ash*. Artinya POFA baik digunakan sebagai salah satu alternatif material *backfill* atau *fill material* pada timbunan jalan.

### Hasil Pengujian Geser Langsung

Nilai sudut geser POFA pada penelitian ini berkisar antara  $40,83^\circ$  hingga  $44,25^\circ$ . Sedangkan nilai kohesi POFA berkisar antara 0,10 kPa hingga 0,17 kPa. Grafik hubungan antara tegangan normal terhadap tegangan geser POFA pada umur 0, 7 dan 28 hari pada penelitian ini terhadap umur pemeramannya dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Grafik hubungan tegangan geser POFA terhadap tegangan geser

Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat bahwa nilai tegangan geser POFA pada penelitian ini terus meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan normal.

Dari hasil pengujian geser langsung terjadi peningkatan nilai sudut geser terhadap umur pemeraman POFA pada penelitian ini. Nilai kohesi POFA juga terus meningkat seiring dengan pertambahan umur pemeraman POFA. Peningkatan sudut geser POFA pada penelitian ini dapat disebabkan oleh adanya pembesaran partikel selama masa pemeraman benda uji. Pembesaran partikel tersebut membuat bidang kontak antar butiran POFA tersebut menjadi semakin besar dan meningkatkan sudut geser POFA tersebut.

Berdasarkan pengklasifikasian jenis tanah berdasarkan nilai sudut geser, maka nilai sudut geser POFA (0 hari) yang berkisar  $40,83-43,83^\circ$  menurut Das (1985) termasuk ke dalam kategori tanah pasir bersudut, padat.

Apabila dibandingkan dengan sudut geser *waste material* lainnya, maka nilai sudut geser POFA mendekati nilai sudut geser *bottom ash* dan lebih besar dari sudut geser *fly ash*. Hal ini berkaitan dengan pengklasifikasian POFA dan *fly ash* yang berbeda dalam USCS, dimana POFA termasuk dalam kategori pasir, sedangkan *fly ash* tergolong ke dalam kategori lanau.

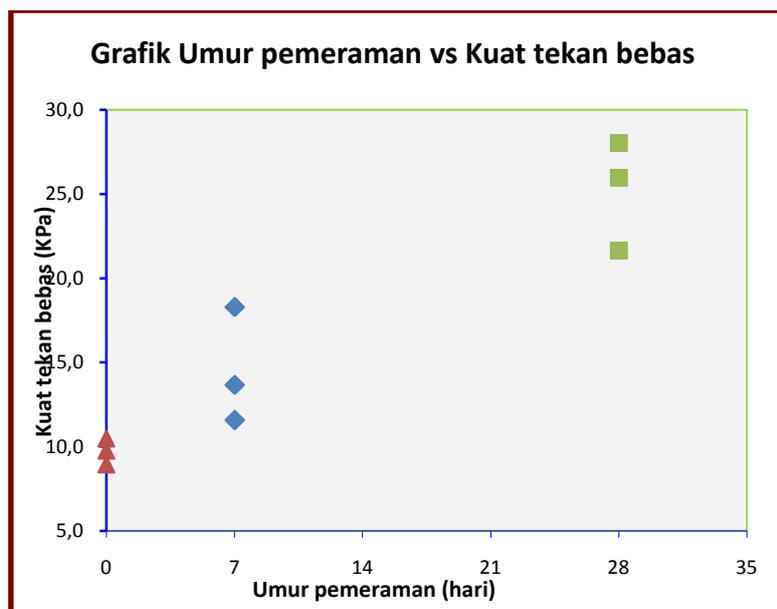
## Hasil Pengujian UCS

Hasil pengujian kuat tekan bebas POFA pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil pengujian UCS benda uji

Benda uji	qu	cu	Benda uji	qu	cu	Benda uji	qu	cu
	(KPa)	(KPa)		(KPa)	(KPa)		(KPa)	(KPa)
S0-1	10,47	5,24	S7-1	18,28	9,14	S28-1	25,97	12,98
S0-2	8,95	4,47	S7-2	13,67	6,83	S28-2	21,63	10,82
S0-3	9,76	4,88	S7-3	11,57	5,79	S28-3	28,03	14,01
<i>Rerata</i>	<i>9,73</i>	<i>4,86</i>	<i>Rerata</i>	<i>14,51</i>	<i>7,25</i>	<i>Rerata</i>	<i>25,21</i>	<i>12,61</i>
<i>Max</i>	<i>10,47</i>	<i>5,24</i>	<i>Max</i>	<i>18,28</i>	<i>9,14</i>	<i>Max</i>	<i>28,03</i>	<i>14,01</i>

Nilai kuat tekan bebas (qu) POFA pada umur pemeraman 0 hari adalah 9,73 KPa dengan nilai *cohesion undrain* (cu) sebesar 4,86 KPa. Nilai ini terus meningkat seiring dengan penambahan umur pemeraman POFA. Hubungan umur pemeraman dengan kuat tekan bebas POFA pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.



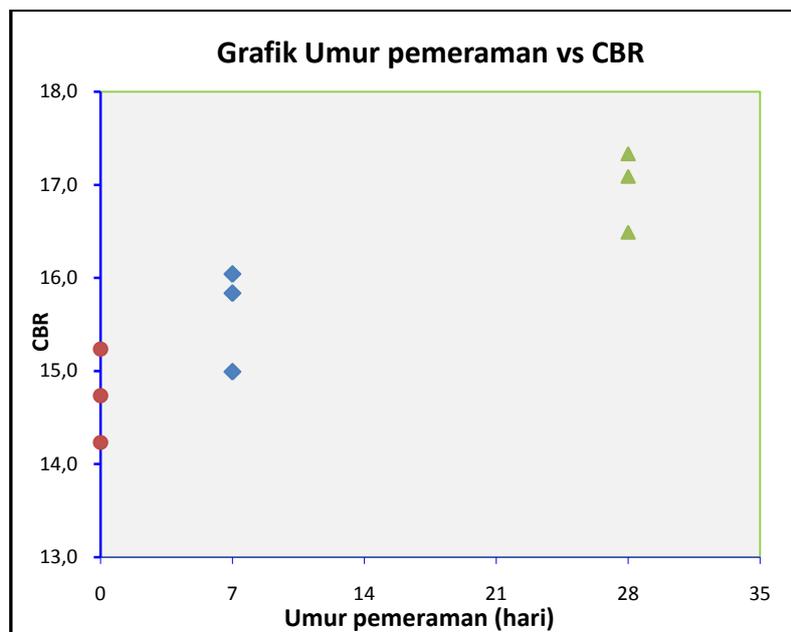
Gambar 5 Hubungan umur pemeraman POFA benda uji dengan kuat tekan bebas

Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa berdasarkan penambahan umur pemeraman, nilai kuat tekan bebas (qu) POFA pada penelitian ini semakin meningkat. Dimana cu adalah setengah dari nilai qu, maka nilai cu POFA pada penelitian ini juga mengalami peningkatan seiring dengan penambahan umur pemeraman. Hal ini terjadi karena ukuran partikel POFA yang membesar dan menyebabkan bidang kontak semakin besar.

Apabila dibandingkan dengan *waste material* seperti *bottom ash* dan *fly ash*, maka nilai kuat tekan bebas POFA pada penelitian ini lebih kecil dari kedua *waste material* tersebut.

### Hasil Pengujian CBR

Nilai CBR POFA yang diuji pada penelitian ini saat berumur 0 hari berkisar antara 14,24% hingga 15,23%. Nilai CBR POFA pada umur 7 hari berkisar 14,99% hingga 16,04%, dan nilai CBR POFA pada umur 28 hari berkisar antara 16,49% hingga 17,33%. Nilai-nilai CBR POFA hasil pengujian ini secara umum dapat dikategorikan meningkat seiring bertambahnya umur pemeraman. Pada Gambar 6 ditampilkan grafik hubungan umur pemeraman dengan nilai CBR dari POFA yang diuji pada penelitian ini.



Gambar 6 Grafik hubungan umur pemeraman dengan nilai CBR

Peningkatan nilai CBR POFA dapat disebabkan oleh adanya pembesaran partikel yang membuat bidang kontak antar partikel POFA semakin besar, serta reaksi pozzolan yang dapat meningkatkan kohesi benda uji sehingga rekatan antar partikel menjadi semakin kuat. Sehingga seiring dengan bertambahnya umur pemeraman maka nilai CBR POFA juga semakin meningkat.

Sukirman (1985) mengklasifikasikan berbagai jenis tanah berdasarkan nilai CBR. Nilai CBR POFA hasil pengujian pada penelitian ini yaitu 14,24% – 15,23% termasuk dalam rentang nilai CBR pasir berlanau dan pasir bergradasi buruk yaitu antara 10% - 40%. Pengklasifikasian POFA berdasarkan nilai CBR ini juga mendukung klasifikasi POFA dalam USCS dimana POFA termasuk ke dalam kategori pasir.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. POFA yang berasal dari PT. Sarikat Putera Riau mengandung  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{CaO}$  dengan persentase kandungan berturut-turut 64,36 %, 4,36 %, 3,41 %, dan 7,92 %. POFA tergolong ke dalam kategori bahan pozzolan tipe F.
2. Berdasarkan USCS POFA pada penelitian ini dapat diklasifikasikan sebagai SP yaitu pasir bergradasi buruk. Sedangkan berdasarkan sistem klasifikasi AASHTO POFA pada penelitian ini termasuk dalam kategori A-3 yaitu tanah granular.

3. *Specific gravity* rata-rata POFA dalam penelitian ini adalah 2,47 yang secara umum lebih besar dibandingkan *specific gravity bottom ash* dan *fly ash*, maka POFA dapat digolongkan sebagai *lighweight material* yang dapat dijadikan sebagai alternatif untuk *fill material* seperti material *backfill*.
4. Dari pengujian pemadatan POFA pada penelitian ini diperoleh nilai  $\gamma_d$  max POFA sebesar 11,43 kN/m<sup>3</sup> dengan kadar air optimum sebesar 35,20 %.
5. Koefisien permeabilitas POFA termasuk dalam rentang kategori pasir halus yaitu 0,001 – 0,01 cm/detik yang secara umum lebih besar dari *fly ash* dan mendekati koefisien permeabilitas *bottom ash*, maka POFA dengan sifat *drain* yang tinggi baik digunakan untuk timbunan pada jalan. Terjadi pengecilan koefisien permeabilitas seiring dengan bertambahnya umur pemeraman. Hal ini dapat terjadi akibat adanya pembesaran partikel dan reaksi pozzolan.
6. Kohesi dan sudut geser POFA pada penelitian ini terus meningkat seiring dengan bertambahnya umur pemeraman. Peningkatan kohesi dapat terjadi akibat adanya reaksi pozzolan, sedangkan peningkatan sudut geser dapat terjadi akibat adanya pembesaran partikel selama masa pemeraman.
7. Dari pengujian UCS dapat diperoleh nilai kuat tekan bebas dan kohesi yang terus meningkat seiring pertambahan umur pemeraman. Hal ini dapat terjadi akibat pembesaran partikel selama masa pemeraman.
8. Nilai CBR Tanpa Rendaman POFA meningkat seiring dengan bertambahnya umur pemeraman. Hal ini sesuai dengan meningkatnya sudut geser dan kohesi. Peningkatan sudut geser akibat pembesaran partikel membuat bidang kontak menjadi semakin besar, sedangkan peningkatan kohesi akibat adanya reaksi pozzolan membuat benda uji tersementasi, mengikat dan mengeras.

## DAFTAR PUSTAKA

- Tangchirapat, W., Saeting, Jaturapitakkul, T.C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A. 2006. *Use of waste ash from palm oil industry in concrete*. Thailand: Department of Civil Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Tungkr, Bangkok
- Karim, M. R., Zain, M.F.M., Jamil M., Islam, M. N. 2011. Strength of Concrete as Influenced by Palm Oil Fuel Ash. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(5): 990-997.
- Rukzon, S., P. Chindaprasirt, 2009. Strength and Chloride Resistance of Blended Portland Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash and Fly Ash. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 16(4): 475-481.
- Isaia, G.C., A.L.G. Gastaldini and R. Moraes, 2003. Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High-Performance Concrete. *Cement and Concrete Composite*, 25: 69-76.
- Cheerarat, R. and C. Jaturapitakkul, 2004. A Study of Disposed Fly Ash from Landfill to Replace Portland Cement. *Waste Management*, 24(7): 701-709.
- Sata, V., C. Jaturapitakkul and R. Chaiyanunt, 2010. Compressive Strength and Heat Evolution of Concretes Containing Palm Oil Fuel Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(10): 1033-1038.

Sata, V., C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, 2007. Influence of Pozzolan from Various By-product Materials on Mechanical Properties of High-strength Concrete. *Construction and Building Materials*, 21(7): 1589-1598.

Tangchirapat, W., C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, 2009. Use of Palm Oil Fuel Ash as a Supplementary Cementitious Material for Producing High-strength Concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7): 2641-2646.

Tay, J.H. and K.Y. Show, 1995. Use of Ash Derived from Oil-Palm Waste Incineration as a Cement Replacement Material. *Resources, Conservation and Recycling*, 13: 27-36.

Tangchirapat, W., T. Saeting, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol and A. Siripanichgorn, 2007. Use of Waste Ash from Palm Oil Industry in Concrete. *Waste Management*, 27: 81-88.

Awal, A.S.M.A and M.W. Hussin, 1997. The Effectiveness of Palm Oil Fuel Ash in Preventing Expansion due to Alkali-silica Reaction. *Cement and Concrete Composite*, 19(4): 367-372.

Chindaprasirt, P., S. Homwuttiwong and C. Jaturapitakkul, 2007. Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash. *Construction and Building Material*, 21: 1492-1499.

Chindaprasirt, P., S. Rukzon, V. Sirivivatnanon, 2008. Resistance to Chloride Penetration of Blended Portland Cement Mortar Containing Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash and Fly Ash. *Construction and Building Material*, 22(5): 932-938.

Eldagal, O.E.A., 2008. *Study on the Behaviour of High Strength Palm Oil Fuel Ash (POFA) Concrete*. M. Engineering Thesis (Civil and Structure). Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia.

Endriani, D. 2012. *Pengaruh Penambahan Abu Cangkang Sawit Terhadap Daya Dukung dan Kuat Tekan pada Tanah Lempung Ditinjau dari Uji UCT dan CBR Laboratorium*. Tesis Program Pasca Sarjana Fakultas Teknik. Medan: Universitas Sumatera Utara.

Ermiyati. 2007. Abu Kelapa Sawit Sebagai Pengganti Sebagian Semen Terhadap Kuat Tekan dan Resapan Air pada Mortar. *Jurnal Sains dan Teknologi* 6(2), September: 31-34

Sukuntapree, S., Namarak, C. & Jaturapitakkul, C. (2002). "Use of calcium carbide residue and palm oil fuel ash in concrete." *Proc., 2002 Annual Conf. of the Engineering*, Bangkok, Thailand, 191-199

Abdulahi, M. Muazu. 2009. *Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Road Construction Material*. Minna: Federal University of Technology, Civil Engineering Department.

Das, Braja M. 1985. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)* Jilid Penerbit Erlangga : Jakarta

Hardiyatmo, Harry Chistady. 2006. *Mekanika Tanah I Edisi ke 4*. Gajah Mada University Press: Yogyakarta.

Huang, H.W. 1990. The Use of Bottom Ash in Highway Embankments, Subgrade and Subbase. Purdue University: Indiana

Kasemchaisiri, R. Dan Tangtersirikul, S. 2008. Properties of Self-Compacting Concrete in Corporation Bottom Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate.

Majidzadeh, K., Bokowski, G., dan El-Mitiny, R. 1979. Material Characteristics of Power Plant Bottom Ashes and Their Performance in Bituminous Mixtures : A Laboratory Investigation. Fifth International Ash utilization Symposium: Atlanta, Ga.

Megel, Anthony. J., Parker, David. B., Mitra, Rana., Sweeten, John. M. 2006. Assessment of Chemical and Physical Characteristics of Bottom, Cyclone, and Baghouse Ashes from The Combustion of Manure. Portland: ASABE Annual International Meeting.

Muhardi., Marto, Aminaton., Kasim, Khairul Anwar., Makhtar, Ahmad Mahir., Wei, Lee Foo dan Lim, Yap Shih. 2010. Engineering Characteristics of Tanjung Bin Coal Ash. Malaysia.

Pandian, N.S. 2004. Fly Ash Characterization with Reference to Geotechnical Applications. Indian Institute of Science Journal. Vol 84, p 189-216

Pando, Miguel., Sangchul, Hwang, Guadalupe, Yaurel., Reyes, Arleene., Rossi, Lisa dan Ruiz Edgardo. 2006. Possible Applications For Circulating Fluidized Bed Coal Combustion By-Products From The Guayama Aes Power Plant. Puerto Rico : University of Puerto Rico.

Ramme, B. W dan Tharaniyil, M. P. 2000. We Energies Coal Combustion Products Utilization Handbook.

Seals, Roger K., Moulton, Lyle K., dan Ruth, B.E. 1972. Bottom Ash : An Engineering Material, Journal, Soil Mechanics and Foundation Div. American Society of Civil Engineers, Vol 98, No. SM4.

Talib, N. Abdul. 2009. Engineering Characteristics of Bottom Ash from Power Plants in Malaysia. Malaysia : Universiti Teknologi Malaysia.