

## Efek Penambahan Bahan Aditif Non-Alami terhadap Perilaku Lempung Plastisitas Tinggi yang Distabilisasi dengan Semen

### Effect of Non-Natural Additives on Behavior of High Plasticity Clay Stabilization based Cement

Soewignjo Agus Nugroho<sup>\*a</sup>, Bambang Wisaksono<sup>b</sup>, Heru Suharyadi<sup>b</sup>, Andy Hendri<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau, H.R. Subrantas KM 12 Panam, Pekanbaru, 28293, Indonesia*

<sup>b</sup> *Jurusan Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Univ. Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Jl. SWK 104(Lingkar Utara) Condong Catur, Yogyakarta, 55281, Indonesia*

#### Artikel History:

Diterima 12 April 2023  
Diterima dalam revisi 5 Mei 2023  
Diterima 21 Juni 2023  
Online 3 Juni 2023

**ABSTRAK:** Penggunaan semen terbukti meningkatkan kekuatan lempung lunak. Monmorillonite mempunyai kembang susut tinggi sementara Kaolin, mineral lempung yang lain, kembang susutnya sangat kecil. Pemanfaatan limbah sebagai bahan konstruksi atau bahan stabilisasi banyak dilakukan dekade ini. BAFA dan POFA kaya akan Silika dan Alumina, sehingga bisa sebagai pengganti semen. Penelitian mengkaji pengaruh Monmorillonite, Kaolin, limbah abu batubara (BAFA) dan abu sawit (POFA) dicampur semen pada stabilisasi lempung. Bentonite dari 4% sampai 16% disamakan dengan kadar BAFA dan POFA, pada rasio 2:1. Kaolin sebesar 2,5%, dipakai untuk mereduksi kembang susut lempung. Kadar semen yang dipakai sebesar 3% dan 5%. Perilaku tanah akan dikaji dari uji Laboratorium pada kondisi curing-noncuring dan soaked-unsoaked. Hasil pengujian menunjukkan perubahan nilai Atterberg Limits serta nilai Hydraulic Conductivity (permeabilitas, k). Kadar semen serta BAFA dan POFA berhasil menurunkan Plastic Limit lebih besar daripada Liquid Limit sehingga Plasticity Index menurun. Pengujian permeabilitas menunjukkan, penggunaan semen dan limbah abu menurunkan nilai permeabilitas. Semakin rendah semen dan semakin tinggi limbah abu, tanah akan semakin kedap air. Penambahan semen 3% dan 5% pada kadar Bentonite dan limbah abu yang sama, meningkatkan nilai UCS serta CBR berturut-turut dari 14,32 kPa dan 0,78% menjadi 81,20 kPa dan 4,20% dan 589,68 kPa dan 42,12%.

**Kata Kunci:** BAFA; bentonite; kaolin; permeabilitas; POFA

**ABSTRACT:** Cement is proven increasing the strength of soft clays. Monmorillonite has a high shrinkage. Another hand, Kaolin has a small shrinkage. Waste material usage for stabilization agent was widely carried out this decade. BAFA (bottom ash fly ash) and POFA (palm oil fuel ash) are rich in Silica and Alumina, so they used to substitute of cement. The study examined the effect of Monmorillonite, Kaolin, BAFA and POFA on stabilization of clay with cement. Bentonite from 4% to 16% (is equated to BAFA and POFA, in ratio of 2:1) and Kaolin by 2.5%, used to reduce clay shrinkage, mixed with cement by 3% and 5%. Soil behavior will be reviewed from laboratory tests on curing-noncuring and soaked-unsoaked conditions. The results show changes in Atterberg Limits and Hydraulic Conductivity (permeability, k). Cement as well as BAFA and POFA reduce Plastic Limit greater than Liquid Limit. So, Plasticity Index decreased. It's can be seen that cement and ash waste decreasing the permeability value. More Ash and less cement, make more impermeable soil. Addition of 3% and 5% cement increased the UCS values from 14.32 kPa to 81.20 kPa and 589.68 kPa and CBR value from 0.78% to 4.20% and 589.68 42.12% respectively.

**Keywords:** BAFA; bentonite; kaolin; permeability; POFA

---

\* Corresponding Author

Email address: [nugroho.sa@eng.unri.ac.id](mailto:nugroho.sa@eng.unri.ac.id)

## 1. Pendahuluan

Dilansir dari kemenperin.go.id tahun 2021 BAFA yang dihasilkan PLTU mencapai 12 juta ton. Tahun 2027 diperkirakan sebesar 16,2 juta ton, 5% sampai 6% dari total produksi batubara nasional sebesar 548 juta ton. PT. Indah Kiat Pulp and Paper (IKPP) Perawang, konsumsi batubara sebesar 2 ribu ton/hari (Zulnasari et al., 2021). Bottom Ash dari PT IKPP mengandung senyawa Silika (SiO<sub>2</sub>) 58,79%; Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 20,33%; besi (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 9,78% dan Kalsium (CaO) 3,17% (Nugroho et al., 2020). Sementara senyawa dalam fly ash terdiri silika 45,58%; Alumimium 37,53%; besi 11,17%, dan kalsium 1,74% (Muhardi et al., 2014). BAFA (*bottom fly ash*) merupakan limbah dari pembakaran batubara. Berdasarkan lampiran 14 PP No. 22 Tahun 2021, BAFA dikategorikan sebagai limbah non-B3 (bahan berbahaya dan beracun) karena mengandung logam berat tetapi tidak beracun, diantaranya Silika (SiO<sub>2</sub>), Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Ferro Oksida (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dan Kalsium Oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu Magnesium Oksida (MgO), Titanium Oksida (TiO<sub>2</sub>), Alkali (Na<sub>2</sub>O dan K<sub>2</sub>O), Sulfur Trioksida (SO<sub>3</sub>), Phosphor Oksida (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) dan Carbon (Kemsekab, 2021).

Tabel 1. Hasil Analisis Komposisi Bahan Aditif

Kandungan senyawa (%)	BAFA	POFA	Bentonite *	Metakaolin **	PCC ***
Silika (SiO <sub>2</sub> )	40,090	45,16	49,680	48,08	23,04
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	30,720	15,96	20,380	36,13	7,40
Besi (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	35,740	0,47	6,420	0,65	3,36
Kalsium (CaO)	18,660	9,72	1,120	0,014	57,38
(MgO)	5,460	1,61	3,240	0,016	-
(Na <sub>2</sub> O)	0,590	0,05	0,200	0,042	-
(K <sub>2</sub> O)	2,100	6,57	0,280	0,329	-

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium, 2021)

\* Bentonite dibeli dari PT, Bentonit Alam Indonesia

\*\* Metakaolin berasal dari Kepulauan Bangka-Belitung (hasil kalsinasi)

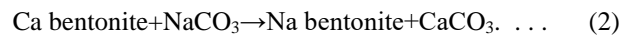
\*\*\* Semen PCC produksi Semen Padang

BAFA merupakan bahan tambah (*additive*) yang memiliki sifat dan kandungan yang hampir sama, hanya berbeda ukuran butiran dan kadar senyawa. ukuran butiran bottom ash tertahan pada saringan ukuran # no.200, sementara butiran fly ash <0,074 cm (pass #200) Bottom ash dengan fly ash berbeda pada besar prosentase unsur senyawa yang dikandung seperti Kalsium, Silika, Alumimium, dan kadar besi. ASTM C-618 membagi fly ash menjadi 2 kelas yaitu kelas F (CaO <10%) dan kelas C (CaO > 10%) (Nugraha & Antoni, 2008). *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) adalah limbah abu yang dihasilkan dari pembakaran serabut kelapa sawit dan cangkang untuk menghasilkan listrik dan energi di pabrik kelapa sawit.

POFA memiliki kandungan SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang tinggi, sehingga memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan aditif untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan tanah (Tangchirapat et al., 2009). Bentonite merupakan lempung yang bersifat koloid dan sifat plastis tinggi dengan kandungan utama mineral Monmorillonite pada kadar lebih dari 85% (Rahman et al., 2015). rumus teoritis dan mineral Monmorillonite adalah:



dengan komposisi Silika (SiO<sub>2</sub>) 66,79%, Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 28,30% dan air (H<sub>2</sub>O) 5,00%. secara Commercial dikenal dua jenis bentonite yaitu kalsium bentonite dan natrium bentonite. Natrium bentonite (*swelling bentonite*) mengandung relatif lebih banyak ion Na<sup>+</sup> dibandingkan ion Ca<sup>2+</sup> dan Mg<sup>2+</sup>. Kalsium bentonite (*non-swelling bentonite*) mengandung lebih banyak ion Ca<sup>2+</sup> dan Mg<sup>2+</sup> dibandingkan dengan ion Na<sup>+</sup>. Sodium bentonite bisa mengembang hingga 8 -- 15 kali apabila dicelupkan dalam air dan tetap terdispersi beberapa waktu di dalam air sehingga banyak digunakan sebagai bahan penyerap, zat perekat pasir cetak pada proses pengecoran baja, sebagai katalisator dalam industri kimia dan sebagainya. Murray (Murray H., 2007) menyampaikan, Na bentonite secara luas digunakan sebagai lumpur pembilas dalam pengeboran minyak, gas dan panas bumi, pencampuran semen, bahan penyumbat kebocoran bendungan dan sebagainya. pada aplikasinya di industri, untuk mendapatkan karakteristik *swelling* yang baik, kalsium bentonite diaktivasi menjadi *activated sodium bentonite* melalui proses pertukaran Ion dengan natrium-karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) dengan reaksi sebagai berikut:



Metakaolin adalah material yang diperoleh dari pengolahan tanah lempung kaolin dengan pemanasan pada suhu 600-800 derajat Celsius untuk menghasilkan produk yang lebih stabil dan berpori. proses pembakaran telah mengubah struktur mineral lempung kaolin, menghilangkan air dan membentuk silika dan alumina amorf yang sangat reaktif (*metakaolin*). Metakaolin memiliki sifat yang mirip dengan fly ash, yang juga digunakan sebagai tambahan semen.

Semen PCC (*Portland Composite Cement*) memiliki karakteristik khusus dibandingkan semen Ordinary (OPC), yaitu kecepatan pengerasan yang relatif cepat dan kekuatan yang tinggi pada umur muda. semen PCC mengandung tricalcium silicate lebih tinggi dan dicalcium silicate lebih sedikit dibandingkan semen OPC. Semen PCC juga dapat mengandung bahan tambahan lain seperti fly ash, slag. Ketersediaan bahan aditif, baik yang natural maupun non-natural perlu dikaji terlebih dahulu teknisnya seperti kekuatan, ketahanan, ketersediaan, dan regulasi (Nugroho et al., 2021). Penggunaan bahan tambah beberapa material akan dikaji yaitu BAFA, POFA, bentonite, metakaolin, dan semen PCC dengan komposisi kimia seperti Tabel 1.

Tabel 2. Hasil pengujian Properties Material aditif (Sumber: Hasil Analisis Laboratorium, 2021),

Jenis Pengujian	unit	Bahan Aditif					
		Clay	PCC	Bentonite	Metakaolin	BAFA*	POFA**
Spesific Gravity (Gs)	-	2,61	3,12	2,45	2,35	2,54	2,43
Unit Weight	gr/cc	1,56	1,15	2,42	2,61	1,17	0,75
Water Content	%	62,41	0,12	-	-	3,06	0,70
Liquid Limit	%	69,59	-	212,32	25,46	NP	NP
Plastic Limit	%	32,39	-	33,42	20,13	NP	NP

\* BAFA diambil dari PLTU Tenayan Raya Pekanbaru, Riau, \*\* POFA diambil dari PT. IKPP Perawang-Siak, Riau

Tabel 3. Variasi Sampel pengujian

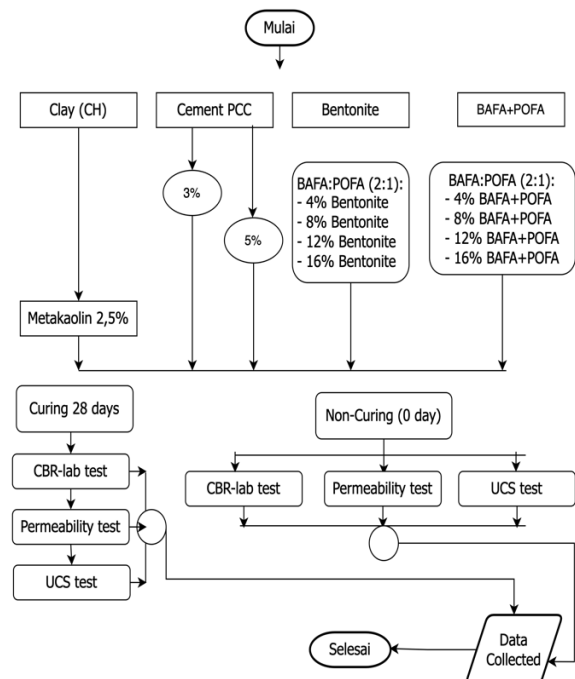
No.	Diskripsi	simbol	Kadar Bahan dalam campuran (%)					
			Clay	PCC	Bentonite	Metakaolin	BAFA	POFA
1.	Tanah Asli	S	100	-	-	-	-	-
2.	Variasi I	S-C <sub>3</sub> -B <sub>4</sub>	100	3	4,00	2,50	2,67	1,33
3.	Variasi II	S-C <sub>3</sub> -B <sub>8</sub>	100	3	8,00	2,50	5,33	2,67
4.	Variasi III	S-C <sub>3</sub> -B <sub>12</sub>	100	3	12,00	2,50	8,00	4,00
5.	Variasi IV	S-C <sub>3</sub> -B <sub>16</sub>	100	3	16,00	2,50	10,67	5,33
6.	Variasi V	S-C <sub>5</sub> -B <sub>4</sub>	100	5	4,00	2,50	2,67	1,33
7.	Variasi VI	S-C <sub>5</sub> -B <sub>8</sub>	100	5	8,00	2,50	5,33	2,67
8.	Variasi VII	S-C <sub>5</sub> -B <sub>12</sub>	100	5	12,00	2,50	8,00	4,00
9.	Variasi VIII	S-C <sub>5</sub> -B <sub>16</sub>	100	5	16,00	2,50	10,67	5,33

Tujuan penelitian untuk mengetahui pengaruh additive limbah BAFA dan POFA, bentonite, metakaolin, serta semen PCC terhadap perubahan plastisitas dan permeabilitas tanah dengan beberapa variasi campuran. Penelitian fokus perubahan Atterberg Limit, permeabilitas, dan nilai CBR pada lempung plastisitas tinggi sebelum dan sesudah dicampur semen dan limbah BFA dengan kadar semen 3% dan 5% sementara BAFA sebesar 4%, 8%, 12%, dan 16%. Pemeraman (curing) 0, dan 28 hari perendaman (soaked) 0, 4 hari (lihat Tabel 3).

## 2. Metode Penelitian

Metode penelitian yaitu terdiri dari studi literatur dan melakukan eksperimen yaitu melakukan pengujian sesuai standar dalam memperoleh data yang diinginkan. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Batuan Fakultas Teknik Universitas Riau. Serangkaian pengujian dilakukan pada tanah asli, lempung plastisitas tinggi (CH) sesuai klasifikasi USCS, yang diambil dari Muara Fajar, Riau, Indonesia dan campuran tanah. Serangkaian pengujian pendahuluan berupa penentuan Gs (ASTM D-854, 2009), Atterberg limit (ASTM D 4318-95, 2003), constant head permeability (ASTM, 2009), UCS (*Unconfined Compression Strength*), dan Laboratory CBR test. Pengujian utama dilakukan pada sampel ditambah additive semen dan BAFA. Variasi campuran tanah asli dengan semen dan BAFA dirangkum dalam **Tabel 1**. Kadar semen campuran dipilih sebesar 3% dan 5%, dengan pertimbangan semen mengikat air. bentonite yang mengembang (swelling) jika terkena air divariasikan sebesar 4%, 8%, 12%, dan 16%. Metakaolin diambil kadar 2,50% karena sifatnya yang mempunyai batas plastisitas sangat rendah. BAFA dan POFA dipilih pada perbandingan

yang tetap yaitu 2:1 dengan total jumlah sama dengan kandungan bentonite. Pengujian pendahuluan pada bahan material asli yaitu lempung plastisitas tinggi, semen, BAFA, POFA, bentonite dan metakaolin dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Tanah asli dan campuran langsung dicari batas-batas plastisitas tanah. Campuran tanah ditimbang dengan berat sama untuk kemudian ditambah air sehingga kadar air sama

dengan batas cair tanah asli ( $w=62,41\%$ ), selanjutnya dimasukan/dicetak pada tabung sampel untuk treatment. Perawatan (treatment) dilakukan dengan diperam 0 hari (*non-curing*) dan 28 hari (*curing* 28 hari). Setelah treatment selesai sampel diuji permeabilitas, UCS, dan CBR. Tahapan pelaksanaan penelitian ditampilkan dalam bentuk bagan alir seperti Gambar 1.

Nilai Specific Gravity BAFA pada Tabel 2 berada dalam rentang penelitian oleh Kim (Kim, H., 2015), dimana mengukur Gs dari *bottom ash* berada pada rentang antara 2,00 dan 2,60; *fly ash* berkisar dari 1,95 sampai 2,55. Pembuatan sampel dilakukan dengan mencampur kondisi kering, lempung; semen, bentonite, metakaolin, BAFA; POFA, secara merata sesuai perbandingan (Tabel 1).

### 3. Hasil dan Pembahasan

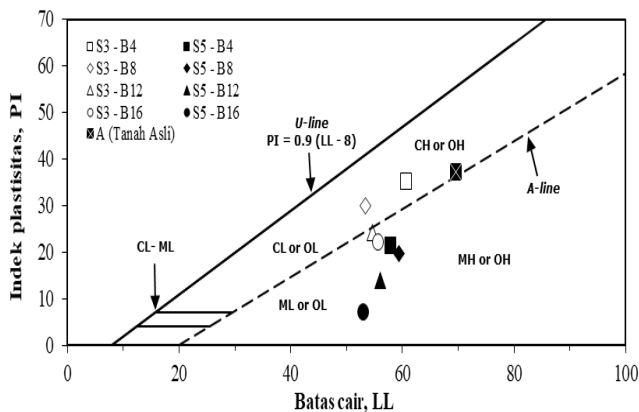
Sampel yang digunakan pada pengujian pengecekan ulang *Atterberg Limit* merupakan sampel yang telah mengalami pemeraman 28 hari. Pengujian ini dilakukan untuk melihat pengaruh BAFA dan semen OPC terhadap perubahan nilai-nilai *Atterberg Limit*. Semen dan BAFA, sebagai aditif, membutuhkan waktu untuk bereaksi dengan lempung untuk menimbulkan ikatan yang kuat. Penambahan bahan-bahan aditif berpengaruh pada sampel campuran dengan perubahan klasifikasi tanah sesuai standar USCS, dari lempung plastisitas tinggi. Hasil pengujian *Atterberg Limit* untuk pemeraman (*Curing*) 28 hari dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Atterberg Limit

No.	Variasi Sampel	Symbol	Nilai Atterberg Limits (%)					
			Non-Curing			Curing 28 hari		
			Liq Limit	Plast. Limit	Plast. Index	Liq. Limit	Plast. Limit	Plast. Index
1.	Lempung Asli	S	69,59	32,39	37,20	69,59	32,39	37,20
2.	Variasi I	S-C <sub>3</sub> -B <sub>4</sub>	60,51	25,32	35,19	60,62	25,40	35,22
3.	Variasi II	S-C <sub>3</sub> -B <sub>8</sub>	56,06	33,52	22,54	53,32	23,40	29,92
4.	Variasi III	S-C <sub>3</sub> -B <sub>12</sub>	54,64	35,86	18,78	54,64	30,57	24,07
5.	Variasi IV	S-C <sub>3</sub> -B <sub>16</sub>	52,89	37,26	15,63	55,55	33,31	22,25
6.	Variasi V	S-C <sub>5</sub> -B <sub>4</sub>	57,53	36,13	21,4	57,83	36,32	21,51
7.	Variasi VI	S-C <sub>5</sub> -B <sub>8</sub>	59,35	45,13	14,22	59,35	39,63	19,72
8.	Variasi VII	S-C <sub>5</sub> -B <sub>12</sub>	58,00	46,86	11,14	56,03	42,13	13,90
9.	Variasi VIII	S-C <sub>5</sub> -B <sub>16</sub>	56,83	48,89	7,94	52,89	45,72	7,17

#### 3.1. Pengujian Atterberg Limit

Membandingkan nilai plastisitas campuran dengan dan tanpa pemeraman pada Tabel 3, terjadi perubahan nilai batas cair maupun batas plastis. Perubahan ini disebabkan karena kadar semen dan kadar bentonite yang berbeda.

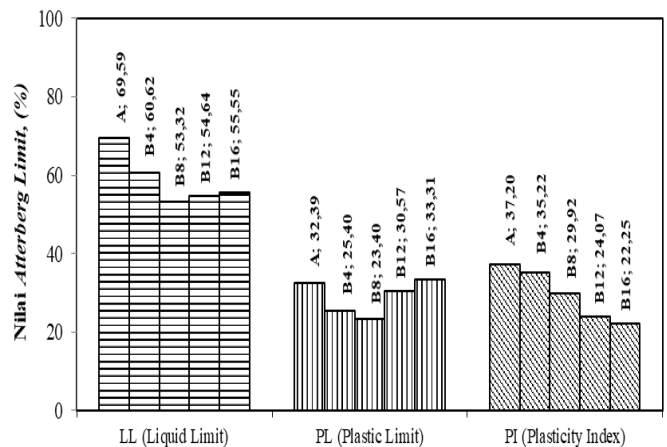


Gambar 2. Klasifikasi Tanah sesuai Kurva Plastisitas

Menurut USCS, tanah asli masuk pada kelas lempung plastisitas tinggi (CH) menjadi tanah lempung plastisitas rendah (CL), untuk penambahan semen 3% dan BFA sampai kadar 8%. Penambahan BAFA diatas 8% atau semen 5% merubah sampel menjadi lanau, lanau plastisitas tinggi (MH) untuk sampel S-C<sub>5</sub>-B<sub>12</sub> serta S-C<sub>5</sub>-B<sub>16</sub> dan

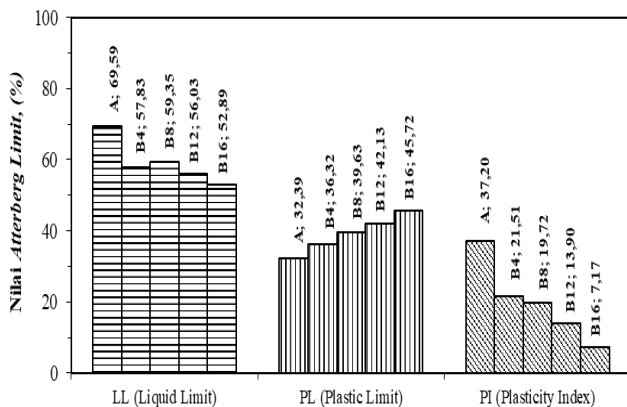
lanau plastisitas rendah (ML) untuk sampel tersisa. Perubahan sifat tanah yang mendasar yaitu dari plastisitas tinggi menjadi plastisitas rendah (Gambar 2).

Hasil pengujian menjelaskan sampel campuran mempunyai *trend* nilai yang beragam, diantaranya nilai LL yang naik dan turun dari kenaikan kadar BAFA/POFA di setiap variasi semen 3% dan 5%. Sama halnya dengan nilai LL, nilai PL juga mengalami nilai yang naik dan turun. Berbeda dengan nilai LL dan PL, nilai PI mempunyai nilai yang menurun secara konstan



Gambar 3. Nilai Plastisitas Tanah pada kadar semen 3%

Berdasarkan hasil dan uraian yang diperoleh terlihat perubahan-perubahan dari batas-batas nilai *Atterberg Limit* campuran semen 3%. Perubahan nilai tersebut karena tanah yang awalnya plastisitas tinggi mulai berkurang karena pengaruh penambahan semen dan limbah BAFA serta telah mengalami pemeraman (*curing*) 28 hari. Nilai *Atterberg Limit* saat penambahan kadar semen sebesar 5%, penambahan kadar BAFA pada sampel mengakibatkan kecenderungan penurunan nilai pada batas cair tanah. Nilai batas plastis tanah pada sampel semen 5% mengalami kenaikan nilai. Hal ini menjadi bukti pengaruh penambahan kadar semen PPC pada tanah yang dicampur BAFA membuat nilai batas plastis tanah meningkat. Nilai indeks plastisitas mengalami kenaikan nilai yang diakibatkan penurunan nilai LL dan kenaikan nilai PL sehingga nilai PI tanah menjadi meningkat, seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 4. Nilai Plastisitas Tanah pada kadar semen 5%

### 3.2 Pengujian Permeabilitas, UCS dan CBR

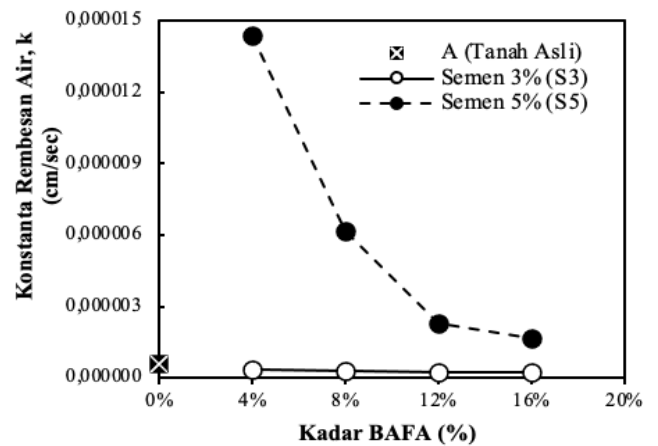
Sampel yang digunakan pada pengujian Permeabilitas Tanah sampel CBR Campuran *Curing* 28 hari. Data yang diperoleh berupa nilai konstanta rembesan air melalui benda uji, seperti yang terlihat pada **Tabel 5**.

Tabel 4. Nilai Pengujian k, qu, dan CBR

Variasi Sampel	Simbol	Hydraulics. Cond., k(cm/s)	qu (kPa)	CBR (%)
1. Tanah asli	S	0,000000604	14,35	0,78
2. Variasi I	S-C <sub>3</sub> -B <sub>4</sub>	0,000000343	31,46	2,42
3. Variasi II	S-C <sub>3</sub> -B <sub>8</sub>	0,000000311	41,55	2,77
4. Variasi III	S-C <sub>3</sub> -B <sub>12</sub>	0,000000265	80,15	4,01
5. Variasi IV	S-C <sub>3</sub> -B <sub>16</sub>	0,000000234	81,20	4,20
6. Variasi V	S-C <sub>5</sub> -B <sub>4</sub>	0,000014405	43,29	3,33
7. Variasi VI	S-C <sub>5</sub> -B <sub>8</sub>	0,000006164	207,30	13,82
8. Variasi VII	S-C <sub>5</sub> -B <sub>12</sub>	0,000002316	601,83	35,40
9. Variasi VIII	S-C <sub>5</sub> -B <sub>16</sub>	0,000001695	589,68	42,12

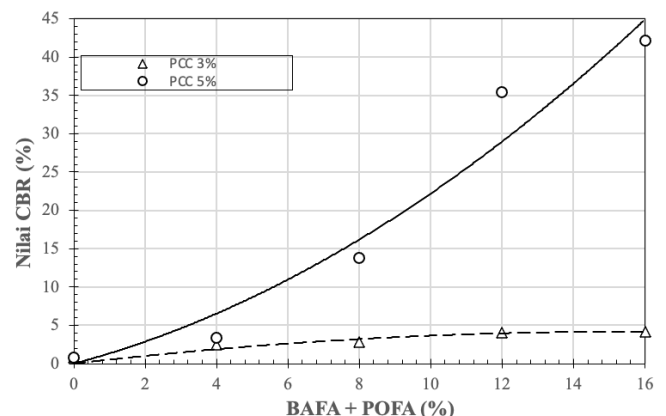
Kadar air yang digunakan untuk mencetak sampel uji permeabilitas, UCS, dan CBR sebesar 50%. Sampel dicampur secara merata, kemudian digetarkan pada tabung

cetak sampai merata dan mencapai tinggi sampel rencana (sesuai ASTM).



Gambar 5. Hydraulic Conductivity (k) Semen 3% dan Semen 5% curing 28 hari

Sampel diperam selama 28 hari pada ruang tertutup. Nilai k untuk variasi sampel Tanah Asli sebesar  $k=6,04 \times 10^{-7}$  cm/s yang merupakan acuan perbandingan untuk variasi dengan Semen 3% dan Semen 5%.

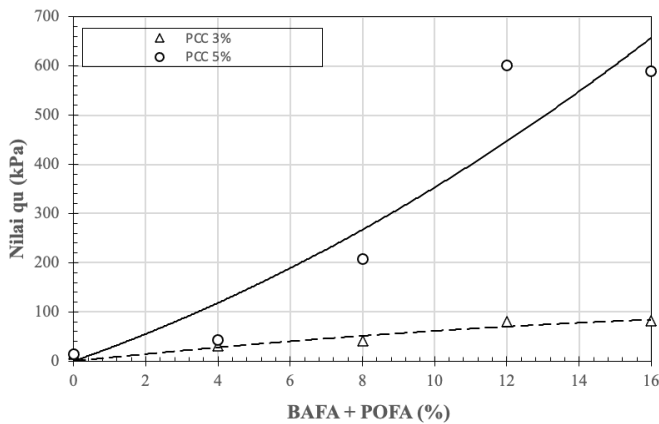


Gambar 6. Nilai CBR vs BAFA+POFA

Penambahan semen 3% di setiap variasi BAFA dimulai dari kadar B4 sampai B4 jika dibandingkan dengan nilai k tanah asli mengalami penurunan, nilai (k) yang jauh lebih kecil dibanding kadar semen 5%. Nilai k pada semen 5% jika dibandingkan dengan tanah asli mengalami kenaikan, dan mempunyai nilai yang jauh lebih besar dibanding kadar semen 3%. Nilai k terbesar pada S5 terdapat pada kadar BAFA 4% dan terus menurun hingga pada kadar BAFA 16%.

Keseluruhan hasil jika digambarkan kedalam diagram garis maka akan tampak seperti pada Gambar 4. Tanah asli dengan  $k=6,04 \times 10^{-7}$  cm/s, setelah ditambah semen 3% dan 16% kombinasi BAFA dan POFA, berubah menjadi  $2,34 \times 10^{-7}$  cm/s. berbanding terbalik dengan penambahan semen PCC 5% yang menjadi  $1,695 \times 10^{-6}$  cm/s. Semakin rendah penambahan kadar semen OPC dan semakin besar

kombinasi BAFA dan POFA, tanah akan semakin kedap air ditandai dengan nilai  $k$  yang menurun.



Gambar 7. Nilai  $q_u$  vs BAFA+POFA

Gambar 6 merupakan kurva hasil pengujian kuat tekan bebas dan Gambar 7 grafik CBR sampel tanah campuran. Pada kadar PCC 3% terlihat nilai CBR dan  $q_u$  sangat kecil dan kurang dari 6% (yang merupakan nilai minimum kekuatan tanah dasar sesuai regulasi). Hal tersebut juga terjadi pada nilai  $q_u$  dari uji UCS (regulasi  $q_u > 250$  kPa).

Pada kadar semen PCC 5%, sebagian nilai CBR dan  $q_u$  melebihi nilai minimum standard tanah yang bisa digunakan sebagai tanah dasar (CBR soaked  $> 6\%$ ,  $q_u > 250$  kPa). artinya kandungan semen masih menjadi faktor utama peningkatan kekuatan dan ketahanan tanah. Penambahan sifat kembang susut tanah (*swelling*) dari 4% sampai dengan 16% dari kandungan bentonite, bisa diimbangi dengan kombinasi BAFA dan POFA.

#### 4. Kesimpulan

Bertambahnya nilai kembang susut tanah dan tingginya indeks plastisitas, bisa membuat kekuatan tanah menurun drastis. Penurunan kekuatan dan kekuatan tanah bisa dikurangi dengan menambahkan bahan aditif BAFA dan POFA. Tingkat plastisitas yang tinggi karena mineral montmorillonite bisa direduksi dengan menambahkan material non plastis seperti BAFA dan POFA. Stabilisasi tanah plastisitas tinggi dengan BAFA dan POFA dengan kombinasi dengan aditif semen bisa meningkatkan kekuatan tanah. Penambahan semen 5% dan BAFA+POFA minimal 10% bisa dijadikan campuran untuk material sub-grade jalan. Untuk penelitian selanjutnya, diupayakan untuk lebih banyak menggunakan material limbah (green ekonomi) dan penggantian atau penghapusan semen sebagai aditif. Perlu dikaji kekuatan, ketahanan, ketersediaan, dan ekonomi. pemakaian BAFA dan POFA dengan alkali aktivator untuk membuat geopolimer yang bisa menggantikan semen

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih, penulis haturkan kepada Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau dan Universitas Pembangunan

Nasional “Veteran” Yogyakarta yang telah ber-Kolaborasi bersama sehingga tulisan ini dapat diselesaikan.

#### Daftar Pustaka

- ASTM D-854. (2009). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. In Annual Book of ASTM Standards (pp. 1–6). ASTM International.
- ASTM, D.-1999. (2009). Standard method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). In Annual Book of ASTM Standards (pp. 1–5). ASTM International.
- ASTM D 4318-95. (2003). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soil. ASTM International.
- Kemsekab, R. (2021). Lampiran XIV PP NO. 21 Tahun 2021. Kementerian Sekretaris Negara Republik Indonesia. <https://jdih.setkab.go.id>
- Kim, H., K. (2015). Utilization of Sieved and Ground Coal Bottom Ash Powders as a Coarse Binder in High-Strength Mortar to Improve Workability. *Construction and Building Materials*, 2(1), 57–64.
- Muhardi, Nugroho, S. A., & Ningrum, P. (2014). Perubahan Nilai CBR Pada Kadar Air Optimum-Basah Campuran Tanah Lempung Dan Abu Terbang. The 18th Annual National Conference on Geotechnical Engineering, 199–206.
- Murray H., H. (2007). Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonite, Palygorskitesepiolite, and Common Clays. *Applied Clay Science*, 55(6), 171–180.
- Nugraha, P., & Antoni. (2008). TEKNOLOGI BETON Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi (2nd ed.). Andi Offset.
- Nugroho, S. A., Ningrum, P., & Muhardi. (2020). Pemanfaatan Geopolimer Abu Terbang Sebagai Pozzolanic Tanah Lempung Untuk Material Tanah Dasar Perkerasan. *Jurnal Fondasi*, 9(1), 77–86.
- Nugroho, S. A., Wibisono, G., Ongko, A., & Mauliza, A. Z. (2021). Effects of High Plasticity and Expansive Clay Stabilization with Limestone on Unconfined Compression Strength. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 7(2), 147–154.
- Rahman, A., Aryanto, Y., Juwono A., L., & Roseno, S. (2015). Sintesis dan Karakterisasi Organik Lempung dari Bentonit Indonesia. *Spektra*, 16(1), 42–47.
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.008>
- Zulnasari, A., Nugroho, S. A., & Fatnanta, F. (2021). Perubahan Nilai Kuat Tekan Lempung Lunak Distabilisasi Dengan Kapur dan Limbah Pembakaran Batubara. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 17(1), 24–36.