

ANALISIS NILAI CBR CAMPURAN FABA DAN SEMEN SEBAGAI MATERIAL TIMBUNAN PILIHAN

Hary Kusuma¹, Muhammad Jazir Alkas², Heri Sutanto³

¹Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman
Jl. Sambaliung No. 9, Samarinda, Kalimantan Timur 75119

E-mail: harykusuma2357@gmail.com

²Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman
Jl. Sambaliung No. 9, Samarinda, Kalimantan Timur 75119

E-mail: mjalkaz@gmail.com

³Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman
Jl. Sambaliung No. 9, Samarinda, Kalimantan Timur 75119

E-mail: hery_soetanto@yahoo.com

ABSTRAK

Pulau Kalimantan merupakan salah satu pulau dengan kekayaan sumber daya alam yang melimpah, salah satunya batu bara. Dibalik kekayaan sumber daya alamnya, sebagian besar tanah yang menutupi Pulau Kalimantan adalah tanah gambut yang menjadi kendala dalam kegiatan konstruksi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut digunakan *fly ash* dan *bottom ash* sebagai material timbunan pilihan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengukur parameter FABA untuk digunakan sebagai material timbunan pilihan. Parameter utama yang diukur adalah nilai CBR Laboratorium rendaman. Selain nilai CBR, parameter lainnya seperti sifat fisis hingga permeabilitas juga akan dianalisis. Terdapat 4 variasi sampel yang akan dianalisis yaitu FB 97.5, FB 95, FB 92.5, dan FB 90 yang masing-masing mengandung kadar semen sebesar 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10%. Dalam uji fisis, sampel yang digunakan terlebih dahulu mengalami perlakuan pemadatan lalu pengeringan udara dan pengeringan dalam oven. Sehingga hasil uji fisis merupakan nilai setelah mengalami proses pemadatan.

Hasil uji laboratorium menunjukkan semua sampel memenuhi syarat CBR timbunan pilihan yaitu sebesar 10%, masing-masing dengan nilai CBR Laboratorium rendaman 43,23%, 66,87%, 81,49%, dan 114,23%. Pada uji analisis distribusi ukuran butiran ditemukan hubungan antara kadar semen dengan ukuran butiran. Pada masing-masing sampel dihasilkan butiran setara pasir sebesar 66,22%, 68,13%, 74,41%, dan 76,36%. Sehingga semakin tinggi kadar semen yang digunakan maka semakin tinggi butiran setara pasir yang dihasilkan, dan sebaliknya. Selain itu hasil uji batas Atterberg juga menunjukkan bahwa semua sampel tidak memiliki nilai Indeks Plastisitas (PI) sehingga tidak memiliki potensi sifat kembang susut tanah yang mana itu baik untuk material timbunan pilihan. Nilai koefisien permeabilitas yang dihasilkan dimulai dari terbesar yaitu FB 97.5 dengan nilai $1,70 \times 10^{-1}$ hingga yang terkecil yaitu FB 90 dengan nilai $5,71 \times 10^{-2}$. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar semen yang digunakan maka semakin kecil nilai koefisien permeabilitas sampel, dan sebaliknya.

Kata kunci: *Fly Ash, Bottom Ash, Timbunan Pilihan, CBR Laboratorium*

ANALYSIS OF CBR VALUE OF FABA AND CEMENT MIXTURE AS ALTERNATIVE FILL MATERIAL

ABSTRACT

Borneo Island is one of the islands with abundant natural resource, one of which is coal. Behind the wealth of natural resources, most of the land that covers the island of Borneo is peat soil which is an obstacle in construction activities. To overcome this problem, fly ash and bottom ash are used as the alternative fill material.

The purpose of this study was to measure the FABA parameter to be used as alternative fill material. The main parameter that was measured was the soaked CBR Laboratory value. In addition to the CBR value, other parameters such as physical properties to permeability will also be analyzed. There are 4 variations of the sample to be analyzed, namely FB 97.5, FB 95, FB 92.5 and FB 90 each of which contains cement content of 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%. In the physical test, the sample used was first subjected to compaction treatment, then air drying and drying in an oven. So that the result of the physical test are the values after undergoing the compaction process.

The results of laboratory showed that all sample met the CBR requirement of alternative fill material, which is 10%, each with a soaked CBR Laboratory value of 43.23%, 66.78%, 81.49%, and 114.23%. In the grain size distribution analysis, it is found that there is a relationship between cement content and grain size. In each of the samples produced sand equivalent grains of 66.22%, 68.13%, 74.41%, and 76.36%. So, the higher the cement content being used, the higher the grain equivalent of sand produced, and vice versa. In addition, the results of Atterberg limit test also show that all sampels don't have any Plasticity Indeks (PI) value so it does not have the potential for swelling and shrinkage properties of the soil which is good for alternative fill material. The result value of permeability coefficient starts from the largest which is FB 97.5 with a value of 1.70×10^{-1} to the smallest which is FB 90 with a value of 5.71×10^{-2} . This shows that the higher the cement content used, the smaller the coefficient of permeability of the sampel, and vice versa.

Key words: Fly Ash, Bottom Ash, Alternative Fill, CBR Laboratory

1. PENDAHULUAN

Pulau Kalimantan merupakan salah satu pulau dengan kekayaan sumber daya alam yang melimpah. Mulai dari hasil hutan berupa kayu, pertanian berupa kelapa sawit, hingga pertambangan berupa batu bara, dll. Batu bara merupakan bahan bakar fosil yang digunakan untuk bahan bakar pembangkit listrik. Hasil dari pembakaran batu bara ini menghasilkan limbah berupa abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) yang sangat berbahaya bagi lingkungan.

Dibalik kekayaan sumber daya alamnya, Pulau Kalimantan juga memiliki kekurangan. Salah satu kekurangannya ialah sebagian besar jenis tanah yang menutupi Pulau Kalimantan adalah jenis tanah gambut. Sehingga untuk kegiatan konstruksi sering mengalami kendala karena jenis tanah ini susah stabil.

Penggunaan campuran *fly ash* batu bara dan semen sebagai timbunan pilihan sangat penting untuk mendapatkan mutu timbunan yang lebih baik serta lebih stabil. Penggunaan *fly ash* sebagai timbunan pilihan juga dapat menurunkan biaya pengelolaan limbah B3 yang diakibatkan residu batu bara pasca operasi.

Oleh karena itu, di penelitian ini akan dibahas tentang peningkatan kualitas tanah atau stabilisasi tanah menggunakan material timbunan yang menggunakan abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) atau yang selanjutnya disebut dengan FABA serta dengan campuran semen ditinjau dari nilai CBR (*California Bearing Ratio*) yang terjadi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fly Ash dan Bottom Ash

Berdasarkan SNI 2460-2014, *fly ash* (abu terbang) merupakan material berupa residu halus yang dihasilkan dari tungku pembakaran

batu bara dan ditransportasikan oleh aliran udara panas.

Penggunaan *fly ash* dalam campuran beton dapat meningkatkan mutu beton. Pada umumnya semen portland mengandung sekitar 65% kapur. Kapur ini tidak semuanya terhidrasi dan masih ada sebagian yang tertinggal. Ketika *fly ash* bercampur dengan kapur yang tersisa maka akan terjadi reaksi kimia yang akan menghasilkan material bersifat mengikat yang akan meningkatkan mutu beton [1].

Bottom ash adalah abu yang dihasilkan pada proses pembakaran batu bara sebagai sumber energi pada boiler. *Bottom ash* dianggap dapat menjadi pengganti semen karena mempunyai salah satu unsur kimia semen yang penting pada proses pengikatan yaitu silika [1].

2.2 Kadar Air

Kadar air dinyatakan dalam persentase terhadap berat tanah dalam keadaan kering, sehingga:

$$w_c = \frac{W_w}{w_s} \times 100\%$$

2.3 Berat Volume Tanah dan Hubungannya

Untuk tanah kering sempurna, berat volume kering dinyatakan oleh persamaan:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e}$$

Porositas (n), adalah perbandingan antara volume rongga (V_v) dengan volume total (V) [2].

Angka Pori (e), didefinisikan sebagai perbandingan antara volume rongga (V_v) dengan volume volume butiran (V_s) [2].

$$e = \frac{n}{1-n} \quad n = \frac{e}{1+e}$$

2.4 Berat Spesifik

Specific gravity dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

2.5 Indeks Plastisitas

Indeks plastisitas (PI) adalah selisih batas cair dan batas plastis, seperti pada persamaan berikut:

$$PI = LL - PL$$

2.6 Analisis Ukuran Butiran

Analisis ukuran butiran tanah adalah penentuan persentase berat butiran.

Kemiringan dan bentuk umum dari kurva distribusi butiran digambarkan oleh koefisien keseragaman (*coefficient of uniformity*), C_u , dan koefisien gradasi (*coefficient of gradation*), C_c , yang diberikan menurut persamaan:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60})(D_{10})}$$

Tanah bergradasi baik jika mempunyai koefisien gradasi $1 < C_c < 3$ dengan $C_u > 4$ untuk kerikil, dan $C_u > 6$ untuk pasir. Tanah disebut bergradasi sangat baik, bila $C_u > 15$ [2].

2.7 Klasifikasi Tanah

1. Sistem Klasifikasi USCS

Tanah diklasifikasikan ke dalam tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomor 200, dan sebagai tanah berbutir halus (lanau/lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200. Selanjutnya, tanah diklasifikasikan dalam subkelompok.

2. Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi AASHTO membagi tanah ke dalam 8 kelompok, A-1 sampai A-8.

2.8 Permeabilitas

Berikut persamaan untuk menghitung koefisien permeabilitas secara teoritis.

Persamaan Kozeny-Carman (1956)

$$K = \frac{g}{v} \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \left(\frac{n^3}{(1-n)^2} \right) \cdot d_{10}^2$$

Keterangan:

K : koefisien permeabilitas (cm/detik)

g : percepatan gravitasi (m/detik²)

v : kinematic viscosity (m²/detik)

n : nilai porositas

d_{10} : ukuran butiran di 10% massa total

Persamaan ini tidak cocok digunakan untuk tanah berukuran efektif lebih dari 3 mm atau untuk tanah berlempung [3].

2.9 Sifat Ekspansifitas Tanah

Tanah ekspansif merupakan tanah yang bisa mengalami perubahan volume akibat perubahan kadar air di dalam tanah. Beberapa metode identifikasi tanah ekspansif antara lain:

1) Indeks Plastisitas (PI)

Indeks Plastisitas dapat digunakan sebagai indeks tunggal untuk mengidentifikasi tanah ekspansif, seperti pada tabel berikut.

Tabel 1. Hubungan Indeks Plastisitas dengan potensi mengembang

Indeks Plastisitas (PI)	Potensi Mengembang
0 – 15	Rendah
10 – 35	Sedang
20 – 55	Tinggi
> 35	Sangat Tinggi

(Sumber: [4])

2) Tingkat Keaktifan

Batas Atterberg dan fraksi lempung dapat dikombinasikan menjadi satu parameter yang dinamakan tingkat keaktifan (*activity*).

$$Ac = \frac{PI}{CF}$$

Keterangan:

Ac = tingkat keaktifan

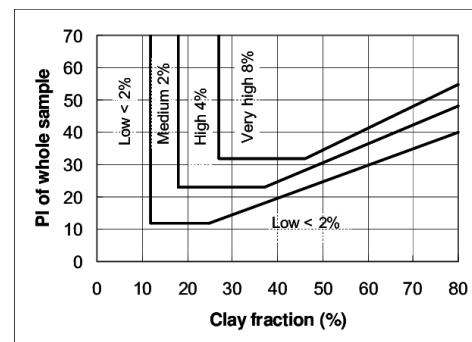
CF = persentase fraksi lempung

Tabel 2. Hubungan tingkat keaktifan dengan potensi pengembangan

Tingkat Keaktifan	Potensi Pengembangan
< 0,75	Rendah
0,75 – 1,25	Sedang
1,25 – 2,00	Tinggi
> 2,00	Sangat Tinggi

(Sumber: [5])

Van Der Merwe juga mengklasifikasikan tingkat pengembangan suatu tanah dengan nilai aktif. Klasifikasi keaktifan berdasarkan Van Der Merwe dapat dilihat di Gambar 1.



Gambar 1. Grafik klasifikasi Van Der Merwe

2.10 Pengujian Pemadatan

Hubungan berat volume kering (γ_d) dengan berat volume basah (γ_b) dan kadar air (w), dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_b}{1+w}$$

2.11 California Bearing Ratio

Prinsip dasar dari pengujian CBR adalah membandingkan besarnya beban (gaya) yang diperlukan untuk menekan piston penetrasi dengan luas penampang 3 inci² ke dalam lapisan perkerasan sedalam 0,1 inci atau 0,2 inci dengan beban standar. Oleh karena itu, kekokohan lapisan perkerasan dinyatakan dalam “kekokohan relatif” atau persen kekokohan. Besarnya beban standar untuk penetrasi 0,1 inci adalah 3000 lb (*pound*), sedangkan besarnya beban standar untuk penetrasi 0,2 inch adalah 4500 lb (*pound*) [6].

2.12 Timbunan

Berikut persyaratan teknis tanah untuk timbunan berdasarkan Spesifikasi Umum 2018:

- 1) Timbunan Biasa
 - a) Bahan yang dipilih sebaiknya tidak termasuk tanah yang berplastisitas tinggi, yang diklasifikasikan sebagai A-7-6 menurut SNI-03-6797-2002 (AASHTO M145) atau sebagai CH menurut “*Unified Soil Classification System*”.
 - b) Timbunan untuk lapisan ini bila diuji dengan SNI 03-1744-1989, harus memiliki nilai CBR tidak kurang dari 6% (CBR setelah perendaman 4 hari bila dipadatkan 100 % kepadatan kering maksimum (MDD) seperti yang ditentukan oleh SNI 03-1742-1989).
 - c) Tanah sangat *expansive* yang memiliki nilai aktif lebih besar dari 1,25 atau derajat pengembangan yang diklasifikasikan oleh AASHTO T258 sebagai “*very high*” atau “*extra high*” tidak boleh digunakan sebagai bahan timbunan.
 - d) Bahan untuk timbunan tidak boleh dari bahan galian tanah yang mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:
 1. Tanah dengan kadar air alamiah sangat tinggi yang tidak praktis dikeringkan.
 2. Tanah yang mempunyai sifat kembang susut tinggi dan sangat tinggi dalam klasifikasi Van Der Merwe.
- 2) Timbunan Pilihan
 - a) Timbunan yang diklasifikasikan sebagai timbunan pilihan harus terdiri dari bahan tanah atau batu. Seluruh timbunan pilihan harus, bila diuji sesuai dengan SNI 03-1744-1989, memiliki CBR paling sedikit 10% setelah 4 hari perendaman bila dipadatkan sampai 100% kering maksimum sesuai dengan SNI 1742:2008

- b) Bahan timbunan pilihan yang digunakan pada lereng atau pekerjaan stabilisasi timbunan atau pada situasi lainnya memerlukan kuat geser cukup, bilamana dilaksanakan dengan pemadatan kering normal, maka timbunan pilihan dapat berupa timbunan batu atau kerikil lempungan bergradasi baik atau lempung pasir atau lempung berplastisitas rendah

3) Timbunan Pilihan Berbutir di Atas Tanah Rawa

Bahan timbunan pilihan di atas tanah rawa dan untuk keadaan saat penghamparan dalam kondisi jenuh atau banjir tidak dapat dihindarkan haruslah batu, pasir atau kerikil atau bahan berbutir bersih lainnya dengan Indeks Plastisitas maksimum 6% [7].

2.13 Bahan Berbahaya Beracun

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun, *fly ash* dan *bottom ash* termasuk ke dalam salah satu kategori limbah B3 dan termasuk ke dalam limbah B3 kategori 2. Tetapi kategori itu direvisi pada peraturan yang baru yaitu pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Dalam peraturan yang baru, *fly ash* dan *bottom ash* digolongkan ke dalam kategori limbah non-B3.

2.14 Validasi Data

Akurasi adalah nilai yang menunjukkan kedekatan dengan nilai yang sebenarnya. Sedangkan presisi adalah nilai yang menunjukkan kedekatan antar nilai yang lain.

Persen kesalahan adalah selisih nilai terukur dengan nilai yang diketahui dan dinyatakan dalam persen. Berikut persamaan yang digunakan untuk menghitung persen kesalahan [8].

$$\delta = \left(\frac{x_o - x}{x} \right) 100\%$$

Keterangan:

δ : persen kesalahan
 x_o : data yang diperoleh
 x : data yang diharapkan

Agar presisi data dapat diterima, maka rentang data haruslah memiliki batasan tertentu. Berikut persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung jarak yang dapat diterima.

$$d2s = 1s \times f$$

Keterangan:

$d2s$: difference two-sigma limit
 $1s$: standar deviasi
 f : faktor pengali

Untuk faktor pengali dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. Faktor pengali untuk jarak maksimum yang diterima

Jumlah pengujian	Faktor pengali	Jumlah pengujian	Faktor pengali
2	2,8	7	4,2
3	3,3	8	4,3
4	3,6	9	4,4
5	3,9	10	4,5
6	4,0		

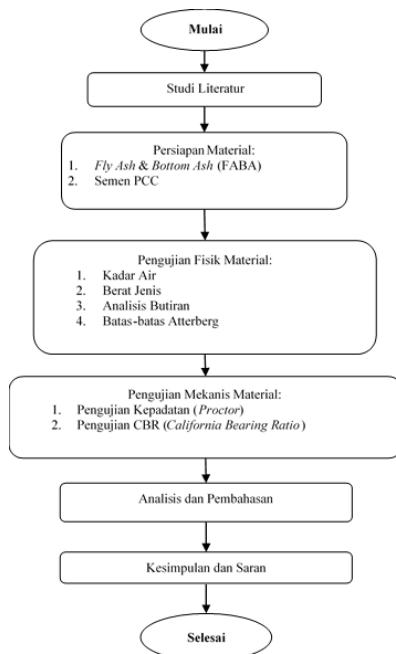
(Sumber: [9])

Jika rentang yang dihasilkan antara data tertinggi dengan data terendah melebihi hasil dari jarak yang dapat diterima, maka kemungkinan besar telah terjadi kesalahan dalam pengujian dan perlu dilakukan pengujian ulang. Hasil tersebut dapat menjadi dasar untuk evaluasi prosedur, kondisi pengujian, atau alat yang digunakan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Bagan Alur Penelitian

Bagan alur pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. Bagan alur penelitian

3.2 Komposisi Campuran

Berikut ini adalah persentase dari masing-masing bahan yang digunakan.

Tabel 4. Persentase bahan yang digunakan

Campuran	Fly Ash (%)	Bottom Ash (%)	Semen (%)
FB 97.5	73,125	24,375	2,5
FB 95	71,25	23,75	5
FB 92.5	69,375	23,125	7,5
FB 90	67,50	22,50	10

3.3 Parameter Analisis dan Pembahasan

Parameter-parameter yang akan dianalisis pada penelitian ini antara lain:

1. Nilai CBR, sampel harus memiliki nilai CBR paling sedikit 10% setelah 4 hari perendaman
2. Tingkat plastisitas, sampel tidak termasuk jenis A-7-6 menurut AASHTO atau CH menurut USCS.
3. Nilai aktif, sampel harus memiliki nilai aktif lebih kecil dari 1,25
4. Tingkat kembang susut, sampel tidak memiliki sifat kembang susut yang tinggi dalam klasifikasi Van Der Merwe

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Data

Data-data yang digunakan pada penelitian ini telah diuji menggunakan 2 cara, yaitu persen kesalahan dan jarak maksimum data yang dapat diterima.

Untuk persen kesalahan, digunakan batas maksimal 5% (+5% dan -5%) terhadap nilai rata-rata. Karena tidak ada standar terhadap uji material FABA, maka persen kesalahan dikoreksi terhadap nilai rata-rata hasil uji.

Ketika ada hasil uji yang melampaui persen kesalahan, maka dapat menggunakan cara kedua yaitu, jarak maksimum data yang dapat diterima, sebelum data tersebut dianggap outlier.

4.2 Sifat Fisik

4.3.1 Kadar Air

Pengujian kadar air hanya dilakukan terhadap material utama dalam penelitian ini, yaitu fly ash dan bottom ash. Berikut hasil uji kadar air material yang digunakan.

Tabel 5. Hasil uji kadar air

Fly Ash						
Kadar air (%)	31.3	26.1	20.7	23.5	30.4	36.2
Rata-rata	28.01					
Simpangan (%)	11.72	-6.99	-25.96	-16.24	8.42	29.05
Bottom Ash						
Kadar air (%)	15.7	32.9	42.4	8.7	7.5	8.0
Rata-rata	19.19					
Simpangan (%)	-44.03	17.42	51.45	-69.12	-73.10	-71.60

Hasil uji kadar air menunjukkan nilai dengan tingkat simpangan yang tinggi. Hal ini membuat benda uji tidak dapat digunakan nilai reratanya. Variasi nilai kadar air yang tinggi dapat menimbulkan masalah dalam pengujian selanjutnya, yang merupakan campuran antara fly ash, bottom ash, dan semen.

Masalah dapat timbul dikarenakan oleh dasar perbandingan campuran yang digunakan adalah terhadap massa bahan. Sehingga kadar air memegang peranan penting dalam ketepatan perbandingan campuran.

Untuk mengatasi hal ini, ketika pembuatan campuran dapat menggunakan bahan yang telah dikeringkan dalam oven dan/atau dapat melakukan uji kadar air setiap ketika akan membuat campuran.

4.3.2 Berat Jenis

Untuk sampel campuran, sampel berat jenis diambil dari sampel yang telah dipadatkan (*proctor test*) dan telah dibiarkan dalam kondisi kering udara sebelum dikeringkan dalam oven. Berikut hasil uji berat jenis (*specific gravity*).

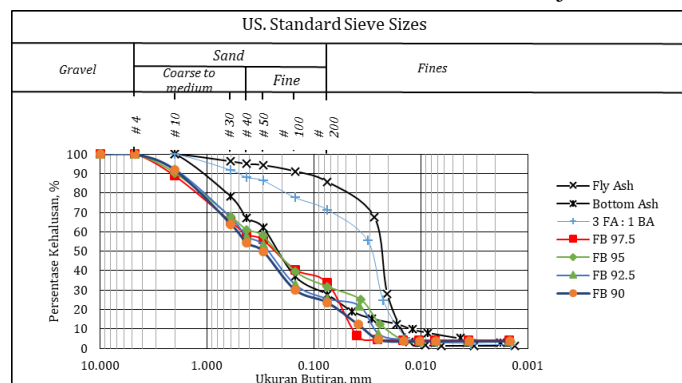
Tabel 6. Hasil uji berat jenis (specific gravity)

Sampel	Gs	Sampel	Gs
Fly ash	2,77	FB 95	2,36
Bottom ash	1,44	FB 92.5	2,30
FB 97.5	2,22	FB 90	2,31

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa penambahan semen tidak berpengaruh terhadap peningkatan nilai berat jenis.

4.3.3 Distribusi Ukuran Butiran

Untuk sampel campuran, benda uji diambil dari sampel yang telah dipadatkan (*proctor test*) dan telah dibiarkan dalam kondisi kering udara. Berikut hasil uji distribusi ukuran butiran.



Gambar 3. Grafik distribusi ukuran butiran

Tabel 7. Analisis distribusi ukuran butiran

Grain Size Analysis	Fly ash	Bottom ash	FB 97.5	FB 95	FB 92.5	FB 90
Gravel (%)	0	0	0	0	0	0
Sand (%)	14,15	72,19	66,22	68,13	74,41	76,36
Silt/Clay (%)	85,85	27,81	33,78	31,87	25,59	23,64

Pada Tabel 7, setelah dicampur dengan perbandingan 3 fly ash : 1 bottom ash lalu ditambah semen dan dipadatkan, ukuran butiran menjadi terikat dengan butiran lain atau

menggumpal. Menggumpal dalam artian ikatan antar butirannya tidak mudah terlepas dalam kondisi terendam air.

Selain itu penambahan persentase semen juga berpengaruh terhadap zona butiran yang dihasilkan. Semakin tinggi semen yang digunakan maka butiran yang tertahan di saringan no.200 juga akan semakin besar.

Ukuran butiran yang tertahan saringan no.200 juga menunjukkan bahwa penggunaan semen sebagai bahan pengikat berhasil. Karena salah satu permasalahan yang dikhawatirkan timbul dari penggunaan *fly ash* adalah karena ukuran partikelnya yang halus dikhawatirkan dapat

meresap ke dalam lingkungan. Walaupun ikatan yang dihasilkan tidak sekuat pada campuran beton, tetapi persentase butiran pasir yang dihasilkan mengalami peningkatan 368% hingga 440% terhadap *fly ash*. Sehingga diharapkan risiko material halus yang akan meresap ke lingkungan dapat berkurang.

Berikut ini nilai ukuran butiran (*mm*) berdasarkan persentase terhadap massa total, nilai *Coefficient of uniformity* (*Cu*), dan nilai *Coefficient of gradation* (*Cc*).

Tabel 8. Ukuran butiran, Cu, dan Cc

Ukuran Butiran	<i>Fly ash</i>	<i>Bottom ash</i>	FB 97.5	FB 95	FB 92.5	FB 90
D ₁₀ (mm)	0.01464	0.01236	0.04307	0.02069	0.02672	0.03395
D ₃₀ (mm)	0.02085	0.08836	0.06867	0.06146	0.11425	0.14792
D ₆₀ (mm)	0.02583	0.28100	0.45666	0.37814	0.46330	0.52070
<i>Cu</i>	1.765	22.740	10.603	18.276	17.341	15.338
<i>Cc</i>	1.150	2.249	0.240	0.483	1.055	1.238

4.3.4 Batas Atterberg

Meskipun *fly ash* hampir sebagian besar tersusun atas partikel lolos saringan no.200 (yang dalam klasifikasi tanah disebut lempung/clay), tetapi *fly ash* tidak dapat diuji untuk mengetahui batas cair dan plastisnya (batas atterberg).

Karena tidak mengandung mineral lempung, baik *fly ash* dan *bottom ash*, maka campuran yang dihasilkan juga akan berperilaku sama.

4.3.5 Klasifikasi Tanah

Jenis klasifikasi tanah yang digunakan adalah USCS dan AASHTO. Berikut hasil klasifikasinya.

1. Klasifikasi USCS

Karena *fly ash* tidak memiliki nilai indeks plastisitas, sehingga *fly ash* dapat disetarakan sebagai jenis tanah lanau anorganik (ML). Sedangkan *bottom ash*, *FB 97.5*, *FB 95*, *FB 92.5*, dan *FB 90* dapat disetarakan sebagai jenis tanah pasir berlanau (SM).

2. Klasifikasi AASHTO

Fly ash dapat disetarakan berjenis tanah berlanau (A-4). Untuk sampel lainnya, yaitu sampel *bottom ash*, *FB 97.5*, *FB 95*, *FB 92.5*, dan *FB 90* dapat disetarakan sebagai jenis tanah pasir (A-1-b). Jenis tanah ini memiliki penilaian umum sangat baik hingga baik sebagai fungsi tanah dasar.

4.3.6 Angka Pori dan Porositas

Karena campuran tidak memiliki kondisi kepadatan asli di lapangan, maka nilai angka

pori dan porositas diperoleh dari nilai kepadatan di laboratorium.

Berikut ini nilai angka pori dan porositas dari semua sampel.

Tabel 9. Nilai angka pori (e) dan porositas (n)

Sampel	Nilai	Kisaran
FB 97.5	γ_d	0,924 - 1,044
	e	1,117 - 1,392
	n	52,8% - 58,2%
FB 95	γ_d	0,997 - 1,048
	e	1,239 - 1,354
	n	55,3% - 57,5%
FB 92.5	γ_d	0,970 - 1,068
	e	1,146 - 1,363
	n	53,4% - 57,7%
FB 90	γ_d	1,029 - 1,103
	e	1,085 - 1,236
	n	52,0% - 55,3%

Karena nilai angka pori dan porositas dipengaruhi oleh *specific gravity*, maka nilai angka pori dan porositas juga tidak berbanding lurus dengan penambahan semen.

4.3.7 Permeabilitas

Nilai porositas dan ukuran butiran yang digunakan berasal dari sampel uji proctor yang telah dibiarkan dalam kondisi kering udara. Berikut nilai koefisien permeabilitas dari sampel.

Tabel 10. Nilai koefisien permeabilitas (k)

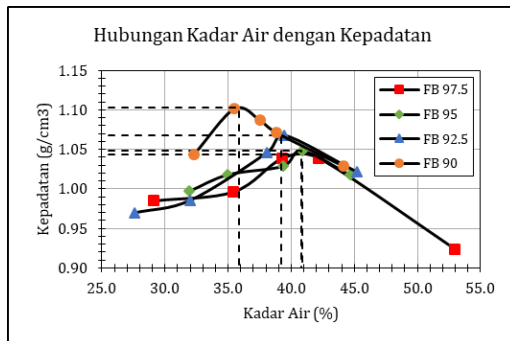
Sampel	n		d_{10} (mm)	k (mm/dt)	
	Min.	Maks.		Min.	Maks.
FB 97.5	52,8%	58,2%	0,04307	$9,94 \times 10^{-2}$	$1,70 \times 10^{-1}$
FB 95	55,3%	57,5%	0,02069	$2,94 \times 10^{-2}$	$3,66 \times 10^{-2}$
FB 92.5	53,4%	57,7%	0,02672	$4,06 \times 10^{-2}$	$6,22 \times 10^{-2}$
FB 90	52,0%	55,3%	0,03395	$5,71 \times 10^{-2}$	$7,91 \times 10^{-2}$

Nilai koefisien permeabilitas (k) menunjukkan hasil yang berbanding lurus terhadap pertambahan persentase semen yang digunakan. Semakin tinggi semen yang digunakan maka nilai koefisien permeabilitas-nya semakin kecil, dan sebaliknya.

4.3 Sifat Mekanis

4.4.1 Kepadatan Maksimum Laboratorium

Nilai kepadatan maksimum diperoleh dari pengujian Proctor menggunakan *modified hammer* pada *mold* berukuran $\pm 10,16$ cm. Berikut hasil uji pepadatan dalam laboratorium.



Gambar 4. Grafik hasil uji pepadatan

Tabel 11. Nilai kepadatan maksimum dan kadar air optimum

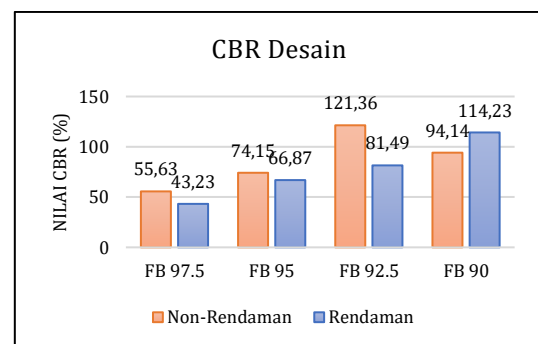
Sampel	$\gamma.maks$ (gr/cm^3)	$w.opt$ (%)
FB 97.5	1.044	40.90
FB 95	1.048	40.80
FB 92.5	1.068	39.20
FB 90	1.103	35.90

Dapat dilihat pada tabel, nilai kepadatan maksimum berbanding lurus terhadap penambahan persentase semen, yaitu semakin tinggi persentase semen yang digunakan, maka kepadatan maksimumnya juga akan semakin tinggi. Dan sebaliknya nilai kadar air optimum berbanding terbalik terhadap persentase penambahan semen.

Perlu digaris bawahi, bahwa nilai kepadatan yang diperoleh adalah nilai kepadatan langsung, sesuai prosedur pengujian *proctor*. Dalam artian setelah dilakukan proses pemadatan langsung diambil sampel untuk dilakukan uji kadar air. Proses pengambilan kadar air yang cepat (< 24 jam) dianggap tidak menimbulkan reaksi hidrasi semen.

4.4.2 CBR Desain

Pada pengujian CBR benda uji dидiamkan sekitar 24 jam (semalam) agar semen dalam campuran menghasilkan sifat mengikat dengan bahan lainnya. Jadi uji penetrasi CBR dilakukan setelah ± 24 jam untuk CBR non-rendaman dan ± 24 jam dидiamkan lalu 96 jam direndam untuk CBR rendaman. Berikut hasil uji CBR desain.



Gambar 5. Grafik nilai CBR desain

Dapat dilihat pada Gambar 5, nilai CBR rendaman berbanding lurus dengan nilai pertambahan persentase semen dalam campuran. Sedangkan untuk nilai CBR non-rendaman terjadi penurunan nilai CBR desain pada sampel FB 90.

Penurunan nilai CBR non-rendaman mungkin disebabkan oleh persentase semen yang tinggi pada FB 90 jika dibanding sampel yang lain. Didukung juga oleh jumlah air optimum yang digunakan lebih sedikit dibanding sampel lainnya. Hal ini menyebabkan tidak cukupnya air untuk menyempurnakan reaksi hidrasi atau pengikatan campuran oleh semen tidak sempurna. Sehingga masih ada sebagian semen

yang tidak mengikat partikel lain dengan sempurna. Sehingga kekuatan CBR yang dihasilkan tidak maksimal.

Sebaliknya, pengaruh rendaman yang biasanya memperburuk nilai CBR desain, justru meningkatkan nilai CBR bagi sampel FB 90. Hal ini mungkin dikarenakan oleh persentase semen yang tinggi, yang akan membuat proses rendaman seperti *curing* yang akan meningkatkan kekerasan sampel.

4.4 Analisis terhadap Syarat Timbunan Pilihan

Berikut perbedaan syarat timbunan biasa dengan timbunan pilihan.

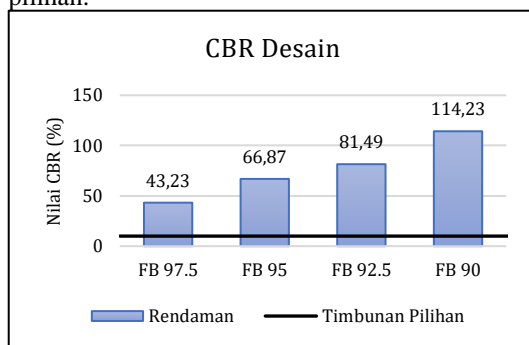
Tabel 12. Syarat timbunan biasa dan pilihan

No.	Parameter	Timbunan Biasa	Timbunan Pilihan
1	Jenis tanah	Selain A-7-6 menurut AASHTO atau CH menurut USCS	Batu, kerikil, pasir, atau bahan berbutir bersih lainnya.
2	CBR Rendaman	≥ 6%	≥ 10%
3	Nilai aktif	≥ 1,25	
4	Klasifikasi Van Der Merwe	Tidak termasuk golongan tinggi atau sangat tinggi	
5	Indeks Plastisitas		≤ 6%

Sumber: *Spesifikasi Umum* (2018)

4.5.1 Syarat CBR Timbunan Pilihan

Spesifikasi Umum 2018 mensyaratkan bahwa timbunan pilihan hendaknya memiliki nilai CBR minimal sebesar 10% setelah direndam selama 4 hari. Berikut ini grafik hasil nilai uji CBR rendaman terhadap syarat timbunan pilihan.



Gambar 6. Grafik nilai CBR dan syarat timbunan

Dapat dilihat pada Gambar 6, bahwa semua hasil uji CBR laboratorium kondisi terendam memiliki nilai yang melewati syarat timbunan pilihan.

4.5.2 Tingkat Plastisitas

Untuk tingkat plastisitas, material timbunan disyaratkan memiliki nilai Indeks Plastisitas di bawah 6%. Semua sampel tidak memiliki nilai

Indeks Plastisitas (atau sebesar 0%). Selain itu juga jenis tanah untuk material timbunan tidak boleh berjenis A-7-6 (AASHTO) atau CH (USCS). Dan semua sampel memiliki jenis tanah A-1-b (AASHTO) dan SM (USCS) sehingga semua sampel lolos syarat ini.

4.5.3 Tingkat Kembang Susut

Karena semua sampel tidak memiliki nilai Indeks Plastisitas (PI = 0), maka tingkat kembang susut berdasarkan nilai aktif semua campuran adalah 0.

Sedangkan untuk klasifikasi Van Der Merwe, dapat dilihat pada Gambar 1, diperlukan nilai Indeks Plastisitas (PI) dan persen lempung. Sehingga semua sampel mempunyai posisi tepat sejajar dengan sumbu 0 nilai PI. Sehingga semua sampel lolos syarat nilai aktif dan klasifikasi Van Der Merwe.

4.5.4 Hasil Kesesuaian Terhadap Syarat Timbunan Pilihan

Berdasarkan pembahasan pada subbab sebelumnya, dapat dibuat tabel rekapitulasi lolos syarat material timbunan, seperti berikut.

Tabel 13. Rekapitulasi terhadap syarat timbunan pilihan

Syarat	Nilai Syarat	FB 97.5	FB 95	FB 92.5	FB 90
CBR Rendaman	$\geq 10\%$	43,23%	66,87%	81,49%	114,23%
PI	$\leq 6\%$	-	-	-	-
Nilai Aktif	$\leq 1,25$	-	-	-	-
Klasifikasi Van der Merwe	$\leq \text{Medium}$	Low	Low	Low	Low

Berdasarkan tabel, semua sampel lolos terhadap semua syarat material timbunan. Terutama terhadap syarat nilai CBR rendaman yaitu minimal 10%. Ini berarti semua campuran dapat digunakan sebagai material timbunan pilihan.

Analisis terhadap syarat material timbunan lainnya juga menunjukkan bahwa sampel tidak memiliki nilai PI dan sifat kembang susut.

Untuk penggunaannya dapat menggunakan campuran FB 97.5, karena selain telah memenuhi syarat sebagai timbunan pilihan, kandungan semennya yang sedikit, dapat memberikan sifat lebih ekonomis dibanding campuran lainnya.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Nilai CBR Laboratorium dari masing-masing sampel adalah:
 - FB 97.5 memiliki CBR rendaman sebesar 43,23% dan non-rendaman sebesar 55,63%
 - FB 95 memiliki CBR rendaman sebesar 66,87% dan non-rendaman sebesar 74,15%
 - FB 92.5 memiliki CBR rendaman sebesar 81,49% dan non-rendaman sebesar 121,36%
 - FB 90 memiliki CBR rendaman sebesar 114,23% dan non-rendaman sebesar 94,14%
2. Sampel FB 97.5, FB 95, FB 92.5, dan FB 90, semuanya lolos terhadap syarat nilai CBR Laboratorium untuk material timbunan pilihan.
3. Sampel yang memiliki komposisi paling efektif sebagai material timbunan pilihan adalah FB 97.5, karena paling sedikit menggunakan semen (2,5%).

DAFTAR PUSTAKA

Jurnal:

- [3] Vukovic dan Soro (1992) dalam Jurnal: Odong, Justine. 2008. *Evaluation of Empirical Foemulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size*

Analysis. Wuhan: The Journal of American Science, 4(1), 2008, ISSN 1545-1003.

- [4] Chen (1998) dalam Jurnal: Suherman, M. 2005. *Potensi Sifat Ekspansif Tanah Kelempungan*. Bandung: Jurnal Jalan Jembatan Vol 22 No. 2 (2005).
- [5] Skempton (1953) dalam Jurnal: Suherman, M. 2005.

Buku:

- [1] Nugraha, Paul dan Antoni. 2007. *Teknologi Beton*. Surabaya: Penerbit Andi.
- [2] Christady Hardiyatmo, Hary. 2012. *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: UGM Press.
- [6] Budi, Gogot Setyo. 2011. *Pengujian Tanah di Laboratorium Penjelasan dan Panduan*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [7] Dirjen Bina Marga. 2018. *Spesifikasi Umum 2018*. Jakarta Selatan: Kementerian PUPR.
- [9] ASTM. 2010. ASTM C670-10. *Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials*. West Conshohocken: ASTM International.

Website:

- [8] Weisstein, Eric W. *Relative Error*. From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/RelativeError.html>. Diakses pada 06 April 2021.