

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Klasifikasi Tanah Lunak

Tanah lunak adalah semua jenis tanah berbutir halus yang mempunyai parameter :

- Kadar air tinggi
- Derajat kejenuhan tinggi
- Angka pori dan porositas tinggi
- Tekanan air pori awal tinggi

Tanah lunak mempunyai sifat :

- Kekuatan geser rendah
- Daya mampat (potensi penurunan) besar bila terjadi peningkatan tegangan efektif.

Salah satu jenis tanah lunak adalah gambut. Tanah gambut merupakan tanah yang secara fisik dan teknik kurang memenuhi persyaratan dan ketentuan dalam pekerjaan konstruksi, karena tanah gambut memiliki kandungan air dan kompresibilitas yang sangat tinggi, serta mempunyai kapasitas dukung tanah yang rendah.

Tanah gambut (*peat*) termasuk tanah organik, secara visual terlihat sebagai massa berserat mengandung kekayuan, biasanya berwarna gelap dan berbau tumbuhan yang membusuk.. Tanah ini mengandung bahan organik yang tinggi mempunyai kuat geser yang rendah, mudah mampat dan bersifat asam yang dapat merusak material bangunan.

Meskipun demikian, dengan berbagai alasan dan pertimbangan pekerjaan konstruksi diatas endapan gambut sering terpaksa dilakukan, terutama untuk pembangunan daerah pemukiman dan jalur jalan raya seperti yang ada di daerah Sumatera, Kalimantan dan Papua (Teguh Nugroho dan Budi Mulyanto, 2003).

Klasifikasi tanah gambut di Indonesia dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut :

Tabel 2. 1 Propertis Tanah Gambut diberbagai Lokasi di Indonesia

Keadaan gambut	Sumatera			Kalimantan		
	Duri	Tampayan	Palembang	Pontianak	Banjarmasin	Palangkaraya
Kadar air, %	621.26	372.7	235.36	631.74	449.83	536.22
Batas cair, %	440.53	309	274	259.66	182	227.8
Batas plastis, %	377.35	235.9	194.21	196.37	147.6	134.4
Batas SuSut	-	59.46	-	-	28.02	44.62
<i>Specific gravity</i>	1.6	1.55	1.82	1.42	1.47	1.39
Berat volume, kN/m ³	-	-	11.23	-	9.64	10
Kadar abu	21.96	8.1	1.2	1.2	4.6	0.72 – 7
Kadar serat	74.08	23	79.45	79.45	61.33	92.1
Kadar organik	-	87.3	98.8	98.8	95.38	98.91
Angka pori	-	8.12	-	-	6.89	8.17

Sumber: Napitupulu, 1999

2.2. Fly Ash Batubara

Produksi batubara pada tahun 2010 diperkirakan sekitar 153 juta ton, 108 juta ton dipakai di dalam negeri sedangkan 45 juta ton merupakan jumlah yang diekspor. Pembakaran batubara menghasilkan limbah padat berupa abu (fly ash dan bottom ash) sekitar 5%. Dari total abu yang dihasilkan 10 – 20 % adalah bottom ash dan 80 – 90 % adalah fly ash. (Wardani, 2008).

Karakteristik fisis dari abu terbang umumnya tergantung pada efisiensi proses penggilingan pada tempat pengolahan dan jenis asal sumber dari batu bara, baik yang berasal dari jenis batu bara keras gelap (*anthracite*), *sub-bituminous*, aspal (*bituminous*) dan batu bara muda (*lignite*) (Muhardi et al, 2007). Abu terbang mempunyai bentuk yang sangat unik, dikarenakan bentuknya sebagian besar berbentuk bulat, butirannya sifatnya berpori (porous) dan berwarna hitam (HS dan Sutopo, 1994).

Abu terbang terdiri dari partikel berbutir halus yang sebagian besar berbentuk bola padat maupun cekung, dan kebanyakan seperti kaca tak berbentuk. Material yang mengandung karbon di dalam abu terbang pada umumnya terdiri dari partikel bersudut. Ukuran partikel abu terbang dari batu bara bituminus biasanya serupa dengan slib (kurang dari 0.075 mm atau lolos ayakan no. 200) (Faroq, 2005).

Klasifikasi partikel abu terbang berdasarkan sifat fisisnya menurut Hewlet (1998) dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Klasifikasi partikel abu batubara berdasarkan sifat-sifat fisiknya

Bentuk	Warna	Sifat Kristal dan tekstur	Ukuran (μm)
Bulat bola	Tak berwarna	a. Seperti kaca, bersih dan padat.	0-20
		b. Seperti kaca dan terdiri dari gelembung-gelembung kecil. c. Seperti kaca dengan permukaan kecil. d. Dominan Kristal dan padat.	10-50
Bulat bola	Coklat muda kehitam-hitaman	Seperti kaca dan padat	5-30
Bulat	Putih dan memantulkan cahaya	Seperti kaca dan ada yang menyerupai spons	10-200
Tak beraturan	Coklat muda	Sebagian berupa Kristal padat	1-100
Tak beraturan	Berwarna-warni dan memantulkan cahaya	Sebagian berupa Kristal padat	50-500
Tak beraturan	Hitam	Padat dan berpori	20-200
Bersiku-siku	Tak berwarna	Berupa Kristal padat	10-100
Bersiku-siku	Merah	Berupa Kristal padat	5-50

(Sumber: Hewlet, 1998)

Menurut ACI Committee 226, dijelaskan bahwa abu terbang (fly ash) mempunyai butiran yang cukup halus, yaitu lolos ayakan No. 325 (45 mili mikron) 5 – 27 % dengan *specific gravity* antara 2,15 – 2,6 dan berwarna abu-abu kehitaman. Abu batubara mengandung silika dan alumina sekitar 80 % dengan sebagian silika berbentuk amorf. Sifat-sifat fisik abu batubara antara lain densitasnya $2,23 \text{ gr/cm}^3$, kadar air sekitar 4 % dan komposisi mineral yang dominan adalah α -kuarsa dan mullite.



Selain itu abu batubara mengandung $\text{SiO}_2 = 58,75 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 25,82 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5,30 \%$, $\text{CaO} = 4,66 \%$, alkali = 1,36 %, $\text{MgO} = 3,30 \%$ dan bahan lainnya = 0,81 %.

Rifai *et al* (2009) juga melakukan penelitian terhadap abu dasar yang berasal dari Industri Kimia di Jakarta untuk diaplikasikan sebagai stabilisasi tanah pada aplikasi jalan. Komposisi kandungan kimia abu batubara pada penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Komposisi kimia abu dasar dan abu terbang Pembangkit Listrik Tanjung Bin di Malaysia

Komposisi Kimia	<i>Fly Ash (%)</i>	<i>Bottom Ash (%)</i>
SiO_2	51.80	42.70
Al_2O_3	26.50	23.00
Fe_2O_3	8.50	17.00
CaO	4.81	9.80
K_2O	3.27	0.96
TiO_2	1.38	1.64
MgO	1.10	1.54
P_2O_5	0.90	1.04
Na_2O	0.67	0.29
SO_3	0.60	1.22
BaO	0.12	0.19

Sumber : Muhardi dkk, 2010

Abu terbang mempunyai mutu yang sangat berbeda satu dengan lainnya, tergantung dari sumber batubara mana yang dipergunakan, efisiensi dari pulverisasi, suhu pembakaran yang tergantung dari macam tungku yang dipakai untuk pembakaran batubara, serta cara pengendapan abu dari gas pembakaran. Berbagai penelitian mengenai pemanfaatan abu terbang batu bara sedang dilakukan untuk

meningkatkan nilai ekonomisnya serta mengurangi dampak buruknya terhadap lingkungan (Munir, 2008).

Menurut ASTM C618, fly ash dibagi menjadi 2 kelas yaitu fly ash kelas F ($\text{CaO} < 10\%$) dan fly ash kelas C ($\text{CaO} > 10\%$). Perbedaan utama dari kedua fly ash tersebut adalah banyaknya unsur kalsium, silika, aluminium, dan kadar besi dalam fly ash. Hampir semua abu terbang yang digunakan untuk *embankment* adalah abu terbang kelas F (Wardani, 2008).

Abu Terbang dari PT. IKPP Perawang secara visual berbutir halus, ringan dan warnanya lebih terang serta memiliki butiran yang lebih bundar dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Abu terbang PT. IKPP Perawang Kabupaten Siak

Berdasarkan pengujian abu terbang PT. RAPP Pangkalan Kerinci yang dilakukan oleh Farooq (2005) didapatkan;

- Nilai berat kering maksimum ($\gamma_{d \text{ maks}}$) abu terbang sebesar 0,894 gram/cm³ – 0,947 gram/cm³ (8,770 kN/m³-9,290 kN/m³)
- Kadar air optimum berkisar antara 38%-40%.

- Nilai koefisien permeabilitas adalah $8,08 \times 10^{-5}$ cm/det.
- Nilai koefisien kompresi atau indeks kompresi (Cc) dengan pengujian konsolidasi didapatkan sebesar 1,328.
- Sudut geser dalam (ϕ) berkisar antara 48° – 50° .
- Kohesi (c) berkisar antara 11,768 kPa – 12,749 kPa.
- Nilai CBR non rendaman untuk umur pemeraman 0 hari berkisar antara 20%-30%.

2.3. **Bottom Ash Batubara**

Abu bawah biasanya disebut juga abu dasar (*bottom ash*) terbentuk pada zona pembakaran dengan kecepatan alir gas rendah dan/atau zona unggun tetap batubara, misalnya pada bagian dasar tungku *pulverized-coal* atau pada tungku tipe pembakaran unggun tetap. *Bottom ash* memiliki warna yang lebih gelap karena masih mengandung karbon yang tidak terbakar., ukuran partikelnya relatif kasar, lebih berat, geometri partikel yang tidak beraturan, dan dengan permukaan yang kasar. Komposisi kimia dari abu dasar sebagian besar tersusun dari unsur-unsur Si, Al, Fe, Ca, serta Mg, S, Na dan unsur kimia lainnya.

Pemanfaatan abu bawah yang telah banyak diterapkan adalah sebagai komponen agregat perkerasan jalan dan maupun sebagai bahan konstruksi sipil lainnya. Izquierdo et.al. (2001) mendeskripsikan kesesuaian penggunaan abu bawah dari insinerator sampah kota sebagai bahan pembuatan lapisan dasar konstruksi perkerasan jalan.

Tabel 2.4. Sifat Fisis Abu Dasar

Sifat Fisik Abu Dasar	Abu Dasar Basah (Wet Bottom Ash)	Abu Dasar Kering (Dry Bottom Ash)
Bentuk	Angular / bersiku	Berbutir kecil / granular
Warna	Hitam	Abu-abu gelap
Tampilan	Keras, mengkilap	Seperti pasir halus, sangat berpori
Ukuran (% lolos ayakan)	No.4 (90-100%)	1.5 s/d ³ / ₄ in (100%)
	No.10 (40-60%)	No.4 (50-90%)
	No.40 (10%)	No.10 (10-60%)
	No.200 (5%)	No.40 (0-10%)
Berat Jenis	2,3 – 2,9	2,1 – 2,7
γ_{dry}	960 – 1440 kg/m ³	720 – 1600 kg/m ³
Penyerapan	0,3 – 1,1%	0,8 – 2,0%

Sumber: Waller, 1993

Abu dasar PT.IKPP Perawang secara visual tampak berbutir kasar, warna gelap dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 2.2 Abu dasar PT. IKPP Perawang Kabupaten Siak
(Sumber: Maharani, 2012)

Berdasarkan penelitian Muhardi *dkk* (2010) untuk abu dasar yang berasal dari Pembangkit Tenaga Listrik Tanjung Bin di Malaysia, diperoleh;

- kadar air optimum (w_{opt}) 21,5 %
- berat volume kering maksimum (γ_{dmax}) 1,31 Mg/m³ (12,85 kN/m³)

- koefisien permeabilitas dengan nilai $1,72 \times 10^{-4}$ m/d
- Indeks pemampatan (c_c) bernilai 1,54
- Sudut geser ϕ (*degrees*) pada kondisi Padat dan Jenuh (*Drained*) adalah 46 dengan nilai Kohesi, c (kPa) adalah 0.
- Sudut geser ϕ (*degrees*) pada kondisi Padat dan Jenuh (*Undrained*) adalah 44 dengan nilai Kohesi, c (kPa) adalah 0

2.4. Campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash*

Abu terbang dan abu dasar atau campuran keduanya dapat efektif digunakan untuk bahan timbunan (*embankment*) atau bahan perkuatan. Abu terbang mempunyai koefisien keseragaman yang besar, terdiri dari partikel ukuran lanau. Sifat-sifat teknik yang akan mempengaruhi penggunaan abu terbang pada *embankment* adalah termasuk distribusi butiran, karakteristik pemadatan, *shear strength*, *compressibility* dan *permeability*.

Adanya kandungan silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3) dan besi oksida (Fe_2O_3) pada fly ash dan bottom ash, maka jika dicampurkan dengan tanah dan tambahan air akan bereaksi secara pozzolanic dan menghasilkan reaksi hidrasi. Reaksi ini lah yang mengakibatkan adanya pengikatan antara fly ash dan bottom ash dengan tanah. Akibat dari pengikatan ini stabilisasi fly ash dan bottom ash dengan tanah akan meningkatkan kekuatan pada tanah.

Fly ash/bottom ash yang dihasilkan oleh *fluidized bed system* berukuran 100-200 mesh (1 mesh = 1 lubang/inch²). Ukuran ini relative

kecil dan ringan, sedangkan bottom ash berukuran 20-50 mesh. Secara umum ukuran fly ash/bottom ash dapat langsung dimanfaatkan di pabrik semen sebagai substitusi batuan *trass* dengan memasukkannya pada *cement mill* menggunakan udara tekan (*pneumatic system*). Disamping dimanfaatkan di industri semen, fly/bottom ash dapat juga dimanfaatkan menjadi campuran asphalt (*ready mix*), campuran beton (*concrete*) dan dicetak menjadi paving block/batako. Dari suatu penelitian empiric untuk campuran batako.

Penelitian sebelumnya yang menggunakan campuran fly ash dan bottom ash diantaranya telah dilakukan oleh Lola Cassiopea dengan judul Pemanfaatan bahan limbah coal ash untuk lapisan subbase dengan agregat keausan tinggi pada penulisan tesis S2 nya di UGM pada tahun 2010. Pada penelitian tersebut penulis menggunakan campuran fly ash 10% dan bottom ash 25% pada campuran Sub Base.

Nurul Aini Yakin (Puslitbang Perim PU) juga pernah menulis jurnal tahun 2013 tentang penggunaan fly ash (20%) dan bottom ash (60%) pada pembuatan beton bata berlubang.

2.5. Stone Column

Stone Column dipasang untuk meningkatkan daya dukung tanah lunak, sehingga dapat menerima beban yang lebih besar dan mengurangi penurunannya.

Beberapa hal yang harus dipertimbangkan pada perencanaan *stone column* (Indra dan Maliki, 2009);

1. Diameter stone column; Diameter *stone column* menentukan besarnya area replacement ratio dan besarnya distribusi tegangan pada tanah dan *stone column*. Perencanaan diameter *stone column* disesuaikan dengan tipe tanah, beban yang harus didukung tanah, dan pola pemasangannya. Pola pemasangan segitiga dan pola bujur sangkar. Kedua bentuk penampang tersebut bisa didekati dengan bentuk lingkaran yang mempunyai diameter D_w (diameter equivalen). Untuk pola segitiga, $D_w = 1.05s$ dan untuk pola bujur sangkar $D_w = 1.13s$, dimana s adalah jarak antar *stone column*.

2. *Area replacement ratio* atau rasio pergantian luas adalah perbandingan antara luas penampang *stone column* dengan luas tanah lunak di sekelilingnya. Volume tanah *stone column* yang akan menggantikan tanah asli, memiliki pengaruh yang penting terhadap hasil dari perkuatan tanah, dan mempengaruhi besarnya volume tanah yang akan tergantikan. Untuk menghitung jumlah pergantian tanah yang dibutuhkan Stone Column, ditetapkan rasio pergantian luas (a_s), dengan rumusan sebagai berikut

$$a_s = \frac{A_s}{A} \text{ atau } a_s = C_1 \left(\frac{D}{s}\right)^2$$

$$a_c = \frac{A_c}{A} = 1 - a_s$$



Dimana :

a_s = *Area replacement ratio stone column*

a_c = *Area replacement ratio tanah lunak*

A_s = Luas penampang stone column

A_c = Luas penampang tanah lunak dalam 1 unit cell

A = Luas penampang total 1 unit cell

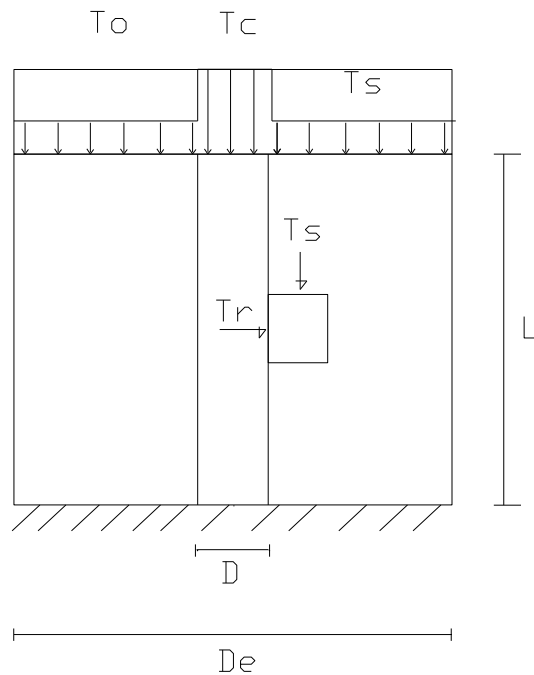
D = Diameter *stone column*

S = spacing antar *stone column*

C_1 = konstanta yang tergantung pada pola penyusunan *stone column*, Pola segitiga $C_1 = 0.907$, dan pola bujur sangkar $C_1 = \pi/4$

3. Konsentrasi tegangan; Pada saat beban *embankment* bekerja pada tanah yang diperbaiki dengan *stone column*, konsentrasi tegangan yang lebih besar terjadi pada *stone column* dan pengurangan tegangan terjadi pada tanah disekitarnya. Faktor konsentrasi tegangan, n , adalah perbandingan tegangan antara tegangan pada *stone column* dan tegangan pada tanah sekitarnya. Menurut metode FHWA ((Federal Highway Administration Office of Engineering and Highway Operations Research and Development Washington, D.C.), nilai faktor penumpukan tegangan berkisar antara 2-5.
4. Konsep Unit Cell; Unit Cell pada Stone Column merupakan satu silinder dengan diameter ekuivalen yang meliputi satu Stone Column dengan daerah pengaruhnya.





Gambar 2.3. *Ilustrasi Unit Cell*

Dimana, T_o adalah beban timbunan atau struktur yang diterima oleh tanah. T_c adalah tegangan yang akan diterima oleh stone column akibat beban struktur atau timbunan. T_s adalah tegangan yang akan diterima tanah lempung di sekitar stone column. D adalah diameter dari stone column, sedangkan D_e adalah Diameter ekuivalen (pengaruh) dari satu stone column terhadap daerah sekitarnya. L adalah kedalaman dari stone column. Dan T_r adalah tegangan radial stress yang akan diberikan oleh tanah di sekitar stone column sebagai tahanan horisontal terhadap stone column akibat kontribusi dari tegangan vertikal yang diterima tanah di sekitar stone column.

2.6. Pembebanan Dinamik (Dynamic Load)

Dinamis dapat diartikan “Bervariasi” terhadap waktu dalam konteks gaya yang bekerja (eksitasi) pada struktur. Variasi beban dinamis dapat berupa besarnya (magnitude), arahnya (direction) dan atau titik pangkatnya (point of application). Respon struktur tersebut, bekerja pada defleksi & tegangan yang bervariasi pula terhadap waktu (sama dengan respon dinamis), baik respon dinamis maupun respon statis (akibat respon statis) (Agus Tri, 2013)

Beban Dinamik dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Beban yang besarnya (intensitasnya) berubah-ubah menurut waktu, sehingga dapat dikatakan besarnya beban merupakan fungsi waktu.
- Bekerja hanya untuk rentang waktu tertentu saja, akan tetapi walaupun hanya bekerja sesaat akibat yang ditimbulkan dapat merusakkan struktur bangunan, oleh karena itu beban ini harus diperhitungkan didalam merencanakan struktur bangunan.
- Beban dinamik dapat menyebabkan timbulnya gaya inersia pada pusat massa yang arahnya berlawanan dengan arah gerakan. Contoh gaya inersia yang paling sederhana adalah tumpukan kotak pada bak belakang truk akan terguling kedepan bila truk direm mendadak, dan akan terguling kebelakang bila truk dengan mendadak dijalankan.

- Beban dinamis lebih kompleks dari pada beban statis, baik jika ditinjau dari bentuk fungsi bebannya maupun akibat yang ditimbulkan.
- Karena beban dinamik adalah fungsi dari waktu, maka pengaruhnya terhadap struktur juga akan berubah-ubah menurut waktu. Oleh karena itu penyelesaian persoalan dinamik harus dilakukan secara berulang-ulang mengikuti sejarah pembebanan yang ada. Jika penyelesaian problem statik bersifat tunggal (single solution), maka dalam penyelesaian problem dinamik bersifat penyelesaian berulang-ulang (multiple solution).
- Karena beban dinamik menimbulkan repons yang berubah-ubah menurut waktu, maka struktur yang bersangkutan akan ikut bergetar.
- Pada saat bergetar bahan dari struktur akan melakukan resistensi/perlawanan terhadap getaran/gerakan, dan pada umumnya dikatakan bahan yang bersangkutan mempunyai kemampuan untuk meredam getaran. Dengan demikian pada pembebanan dinamik akan terdapat peristiwa redaman yang hal ini tidak terdapat pada pembebanan statik.

