

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya

Penelitian-penelitian sebelumnya yang telah memanfaatkan limbah padat pabrik kertas maupun campuran lain sebagai bahan campuran untuk stabilisasi tanah dijadikan sebagai acuan dalam rancangan penelitian. Pada penelitian yang dilakukan oleh Biradar dkk (2016) menggunakan abu limbah dari pabrik kertas sebagai bahan campuran stabilisasi tanah. Variasi campuran tersebut adalah campuran abu limbah dari pabrik kertas sebesar 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat kering tanah dan juga campuran bubuk batu marmer 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat kering tanah.

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian kuat tekan bebas dengan variasi masa perawatan 3 hari, 7 hari dan 11 hari. Pada pengujian kuat tekan bebas menunjukkan bahwa hasil yang maksimum pada perawatan 3 hari di persentase 6% abu limbah pabrik kertas dan 6% semen sebesar 678,32 kN/m². Untuk perawatan 7 hari, nilai kuat tekan maksimum terletak di persentase 6% abu limbah pabrik kertas dan 6% semen dengan nilai 947,44 kN/m², sedangkan pada perawatan 11 hari nilai maksimum sebesar 1022,3 kN/m² dengan persentase 6% abu limbah pabrik kertas dan 6% semen.

Penelitian yang lainnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Onyelowe (2017). Pada penelitian tersebut menggunakan abu limbah pabrik kertas dengan persentase sebesar 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. Pengujian mekanis yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian CBR dan pengujian kuat tekan bebas. Nilai CBR maksimum yang didapat dari penelitian ini terdapat pada persentase abu limbah kertas 12% dengan nilai CBR 23%. Pada pengujian kuat tekan bebas dilakukan perawatan 7 hari, 14 hari dan 28 hari. Nilai kuat tekan maksimum pada perawatan 7 hari sebesar 243,47 kN/m² pada persentase 12%, untuk perawatan 14 hari sebesar 246,85 kN/m² di persentase 12%, sedangkan perawatan 28 hari mempunyai nilai maksimum 246,99 kN/m² pada persentase 12%.

Penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh Dharan (2016) menyatakan bahwa hasil dari penambahan campuran tersebut menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan dan sifat karakteristik tanah lempung. Penelitian ini menggunakan variasi campuran sebesar 0%, 4%, 6%, 8%, 10%, dan 12% dari berat kering tanah dengan pengujian mekanis yang dilakukan adalah pengujian CBR dan pengujian kuat tekan bebas. Pada pengujian kuat tekan bebas juga dilakukan perawatan selama 0 hari, 3 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.

Hasil maksimum dari pengujian kuat tekan bebas ditunjukkan pada persentase 8% dengan nilai sebesar $417,6 \text{ kN/m}^2$ pada perawatan 28 hari untuk jenis tanah pertama, sedangkan untuk jenis tanah kedua mempunyai nilai maksimum $349,5 \text{ kN/m}^2$. Selain itu, pada pengujian CBR juga dilakukan perawatan 3 hari, 7 hari dan 14 hari. Nilai maksimum untuk pengujian CBR terdapat pada persentase 8% dengan nilai sebesar 25,98% untuk jenis tanah pertama, sedangkan untuk jenis tanah kedua sebesar 18,6% di persentase 8%. Penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan adanya potensi dari penggunaan abu limbah pabrik kertas sebagai bahan campuran stabilisasi tanah. Tanah yang dapat digunakan juga mempunyai jenis yang berbeda dan variasi campuran yang beragam.

2.2. Pengertian Tanah

Tanah merupakan salah satu bagian terpenting dalam teknik sipil. Suatu konstruksi dapat berdiri dengan kokoh jika kondisi tanahnya baik. Secara teknik sipil, pengertian tanah adalah sekumpulan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas, yang terletak di atas batuan dasar (Hardiyatmo, 2002). Secara umum, tanah mempunyai tiga unsur, yaitu butiran tanah atau partikel padat, air dan udara. Ikatan di antara butiran yang tidak kuat bisa disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel-partikel. Ruang di antara partikel-partikel tersebut terdiri dari air, udara maupun air dan udara.

Dalam penjelasan lain (Bowles, 1991), tanah merupakan campuran antara partikel-partikel yang mempunyai salah satu jenis atau dari semua jenis berikut ini:

- a. Berangkal (boulders) adalah bagian dari batu besar, yang umumnya memiliki ukuran 250 mm-300 mm dan untuk ukuran 150 mm-250 mm.
- b. Kerikil (gravel) adalah partikel batuan yang mempunyai ukuran 5 mm- 250 mm.
- c. Pasir (sand) adalah partikel batuan yang mempunyai ukuran 0,074 mm-5 mm, yang berkisar dari kasar dengan ukuran 3 mm-5 mm sampai yang halus mempunyai ukuran < 1 mm.
- d. Lanau (silt) adalah partikel batuan yang berukuran dari 0,002 mm-0,0074 mm.
- e. Lempung (clay) adalah partikel mineral yang mempunyai ukuran lebih kecil dari 0,002 mm dan merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah yang bersifat kohesif.
- f. Koloid adalah partikel mineral yang diam dan mempunyai ukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

2.3. Klasifikasi Tanah

Klasifikasi tanah adalah pemilihan tanah-tanah dalam suatu kelompok yang menunjukkan sifat-sifat atau karakteristik yang sama. Sistem klasifikasi tanah adalah suatu sistem yang mengatur tanah yang berbeda, namun mempunyai sifat yang sama sehingga dapat di gabungkan dalam kelompok-kelompok sesuai dengan kegunaannya. Sistem klasifikasi yang umumnya telah berkembang berdasarkan dari sifat-sifat sederhana dari tanah tersebut, seperti distribusi ukuran butiran dan plastisitas.

Klasifikasi tanah dimanfaatkan dalam berbagai hal di perencanaan dan pelaksanaan, meliputi:

1. Perkiraan dari hasil penyelidikan tanah yang meliputi persiapan bor log dan peta tanah
2. Perkiraan standar kemiringan dari suatu lereng dalam penggalian tanah.
3. Perkiraan pemilihan material, seperti pemilihan tanah yang harus disingkirkan, pemilihan tanah dasar, dan material tanah yang akan ditimbun.
4. Pemilihan dari jenis konstruksi dan alat konstruksi yang akan digunakan, sebagai contoh pemilihan cara galian dan perencanaan cara galian.

5. Perkiraan kemampuan peralatan yang akan digunakan pada tanah tersebut.
6. Rancangan perencanaan lereng dan dinding penahan tanah, meliputi pemilihan jenis konstruksi dan analisa tekanan tanah.

Dalam sistem klasifikasi yang umumnya digunakan, yaitu *Unified Soil Classification System* dan AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*). Dari dua sistem klasifikasi ini menggunakan sifat-sifat indeks yang sederhana, yaitu distribusi ukuran butiran, batas cair, dan plastisitas.

2.3.1. Sistem Klasifikasi Tanah Unified Soil Classification System (USCS)

Pada sistem Unified dalam analisa awal, tanah terbagi menjadi tanah berbutir halus (lanau/lempung) jika tanah yang lolos saringan 200 persentasenya lebih dari 50% dan tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika persentase kurang dari 50% untuk tanah yang lolos saringan 200. Setelah itu, tanah dikelompokkan pada kelompok dan subkelompok tertentu.

Dalam penjelasan lebih rinci, maka langkah-langkah penentuan klasifikasi tanah dalam sistem USCS adalah sebagai berikut:

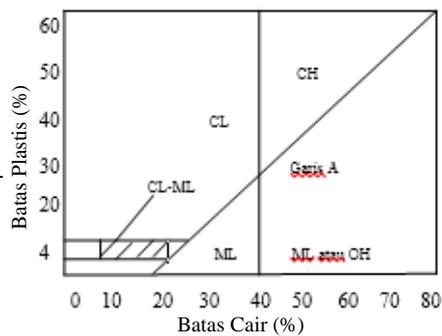
1. Penentuan jenis tanah berbutir halus atau kasar berdasarkan lolos saringan 200.
2. Jika tanah termasuk dalam tanah berbutir kasar, maka:
 - a. Saring tanah yang akan di klasifikasikan lalu gambar grafik distribusi butiran.
 - b. Penentuan persentase tanah yang lolos saringan nomor 4. Jika tanah yang lolos saringan nomor 4 sebanyak lebih dari 50% maka tergolong tanah pasir, sedangkan jika tanah yang lolos saringan nomor 4 kurang dari 50% maka tanah termasuk kerikil.
 - c. Tentukan persentase butiran yang lolos saringan nomor 200. Jika butiran yang lolos saringan nomor 200 kurang dari 5%, maka pertimbangkan bentuk grafik distribusi butiran dengan menghitung C_u dan C_c . Setelah itu, jika termasuk bergradasi baik, maka termasuk sebagai GW (bila kerikil) atau SW (bila pasir). Sedangkan jika termasuk bergradasi buruk, termasuk sebagai GP (bila kerikil) atau SP (bila pasir).

- d. Untuk persentase butiran tanah yang lolos saringan nomor 200 di antara 5 sampai 12%, tanah akan mempunyai simbol sebanyak dua dan mempunyai sifat keplastisan (GW-GM, SW-SM, dan sebagainya).
 - e. Sedangkan untuk persentase butiran tanah yang lolos saringan nomor 200 lebih besar dari 12%, maka diperlukan uji batas-batas atterberg dengan menyingkirkan butiran tanah yang tinggal dalam saringan nomor 40, selanjutnya dengan menggunakan diagram plastisitas, ditentukan klasifikasinya (GM, GC, SM, SC, GM-GC atau SM-SC).
3. Apabila tanah berbutir halus, maka:
 - a. Melakukan uji batas-batas atterberg dengan menghilangkan butiran tanah yang tinggal dalam saringan nomor 40. Jika batas cair lebih dari 50, maka digolongkan sebagai H (plastisitas tinggi), sedangkan apabila kurang dari 50, akan dikategorikan sebagai L (plastisitas rendah).
 - b. Untuk kategori H (plastisitas tinggi), jika plot batas-batas atterberg pada grafik plastisitas di bawah garis A, tentukan termasuk tanah organik (OH) atau tanah anorganik (MH) dan jika plotnya berada di atas garis A, dapat digolongkan CH.
 - c. Sedangkan untuk kategori L (plastisitas rendah), apabila plot batas-batas atterberg pada grafik plastisitas di bawah garis A dan area yang di arsir. Tentukan klasifikasi tanah tersebut sebagai organik (OL) atau anorganik (ML) berdasarkan warna, bau, atau perubahan batas cair dan batas plastisnya dengan melakukan pengeringan di dalam oven.
 - d. Jika plot batas-batas atterberg pada grafik plastisitas terletak di daerah yang di arsir, dekat dengan garis A atau nilai LL sekitar 50, maka digolongkan simbol ganda.

Tabel 2.1. Klasifikasi tanah sistem USCS

Tanah berbutir kasar kasar $\geq 50\%$ butiran tertahan saringan Nomor 200	Kerikil bersih (hanya kerikil)	GW	Kerikil bergradasi baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3	
		GP	Kerikil bergradasi buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		
	kerikil dengan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau	Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI > 7$	
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung		
	Pasir $\geq 50\%$ fraksi kasar tertahan saringan nomor 4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3
			SP	Pasir bergradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	
		Pasir dengan Butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI > 7$
	SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung			
	Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung	Diagram Plastisitas: Untuk mengklasifikasikan kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang diarsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol.
			CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (<i>lean clays</i>)	
OL			Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah		
Lanau dan lempung batas cair $\geq 50\%$		MH	Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis		
		CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (<i>fat clays</i>)		
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi		
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	PT	Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488		

Klasifikasi berdasarkan presentase butiran halus; Kurang dari 5% lolos saringan No. 200 : GM, GP, SW, SP, Lebih dari 12% lolos saringan No. 200 : GM, GC, SM, SC, 5% - 12% lolos saringan No. 200 : Batasan klasifikasi yang mempunyai symbol double



Garis A : $PI = 0,73 (LL - 20)$

Sumber : Hardiyatmo, 2002

Simbol-simbol yang terdapat pada tabel klasifikasi tanah sistem USCS dijelaskan sebagai berikut:

G	= kerikil (<i>gravel</i>)
S	= pasir (<i>sand</i>)
C	= lempung (<i>clay</i>)
M	= lanau (<i>silt</i>)
O	= lanau atau lempung organik (<i>organic silt or clay</i>)
Pt	= tanah gambut dan tanah organik tinggi (<i>peat and highly organic soil</i>)
W	= gradasi baik (<i>well graded</i>)
P	= gradasi buruk (<i>poorly-graded</i>)
H	= plastisitas tinggi (<i>high-plasticity</i>)
L	= plastisitas rendah (<i>low-plasticity</i>)

2.3.2. Sistem Klasifikasi Tanah *American Association of State Highway and Transportation Official* (AASHTO)

Sistem klasifikasi *AASHTO* (*American Association of State Highway and Transportation Official*) mempunyai tujuan untuk penentuan kualitas tanah sebagai perencanaan timbunan jalan, baik *subbase* maupun *subgrade*. Sistem klasifikasi *AASHTO* mempunyai delapan kelompok, yaitu A-1 sampai A-8. Tanah granuler dikelompokkan ke dalam klasifikasi A-1 sampai A-3, sedangkan jenis tanah berbutir halus dikelompokkan mulai dari A-4 sampai A-7 yang merupakan tanah lempung-lanau. Tanah-tanah yang terdapat dalam tiap kelompok tersebut dapat dilakukan evaluasi dengan rumus-rumus empiris.

$$GI = (F-35)[0,2+0,005 (LL-40)] + 0,01 (F-15)(PI-10).....(2.1)$$

dimana:

GI	= index kelompok
F	= persen butiran lolos saringan no.200 (0,075mm)
LL	= batas cair
PI	= index plastisitas

Kelompok A-1 sampai A-8 dijelaskan secara lebih rinci sebagai berikut:

- a. A-1 merupakan jenis golongan tanah yang terdiri dari kerikil, pasir kasar, pasir halus yang mempunyai gradasi baik serta mempunyai plastisitas yang sangat kecil atau tidak sama sekali. Pada kelompok A-1 mempunyai sub kelompok A-1-a dan A-1-b. Sub kelompok A-1-a mengandung kerikil yang jumlahnya cukup besar serta bergradasi lebih besar dari A-1-b. Sub kelompok A-1-b terdiri dari pasir kasar. Kelompok A-1 umumnya memiliki plastisitas yang kecil $I_p < 6$.
- b. A-2 merupakan kategori tanah yang terdiri dari kerikil dan atau pasir dengan tanah berbutir halus di bawah 35%. Kelompok ini adalah batas antara tanah berbutir halus dan berbutir kasar. Sub kelompok dari A-2 terdiri dari A-2-4 sampai A-2-7. Sub kelompok A-2-4 dan A-2-5 adalah bahan yang tidak lebih dari 35% lebih halus dari saringan nomor 200 serta mempunyai nilai plastisitas dari kelompok A-6 dan A-7.
- c. A-3 merupakan kelompok tanah yang terdiri dari pasir halus yang umumnya seragam dan dapat juga pasir halus yang memiliki gradasi buruk dengan sebagian kecil pasir kasar dan kerikil merupakan bahan yang tidak plastis.
- d. A-4 merupakan kategori tanah lanau dengan plastisitas rendah.
- e. A-5 merupakan jenis tanah lanau yang mempunyai kandungan tanah plastis, maka tanahnya dapat lebih plastis dari A-4.
- f. A-6 merupakan kelompok tanah lempung yang mempunyai kandungan pasir dan kerikil, yang memiliki sifat perubahan volumenya besar.
- g. A-7 merupakan jenis kategori tanah lempung yang sifatnya plastis dan memiliki sifat berubahnya volume yang cukup besar. Kelompok A-7 terdiri dari sub kelompok A-7-5 dan A-7-6. Sub kelompok A-7-5 mempunyai nilai $PL > 30$, sedangkan untuk sub kelompok A-7-6 mempunyai nilai $PL < 30$.

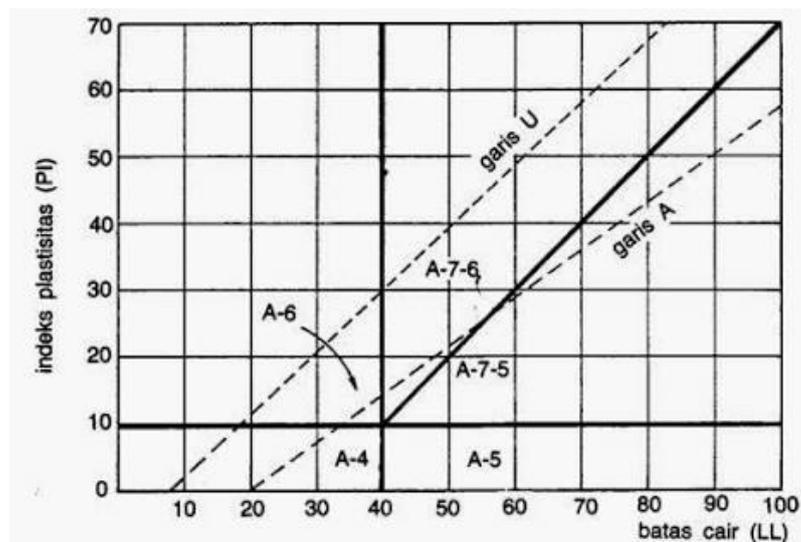
Tabel 2.2. Klasifikasi tanah sistem AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Official*)

Klasifikasi Umum	Material granuler (<35% lolos saringan no.200)							Tanah-tanah lanau-lempung (>35% lolos saringan no.200)			
	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-5 A-7-6
Analisis saringan (% lolos)	50										
2.00 mm (no.10)	max	50	51								
0.42 mm (no. 40)	30	max	min	35max	35ma	35	35	36	36	36	36 min
0.075 mm (no. 200)	max	25	10		x	max	max	min	min	min	
	15	max	max								
	max										
Sifat fraksi lolos saringan no. 40											
Batas cair (LL)				40 max	41	40	41	40	41	40	41 min
	6 max	6 max	N.P.	10 max	min	max	min	max	min	max	11 min
Index plastis (PI)					10	11	11	10	10	11	
					max	min	min	max	max	min	
Indeks Kelompok (G)	0		0	0			4 maks	8	12	16	20
								maks	maks	maks	maks
Tipe material yang pokok pada umumnya	Pecahan batu, kerikil, dan pasir		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau	Tanah berlempung		
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik						Sedang sampai buruk				

Sumber : Hardiyatmo, 2002

Keterangan:

NP = Nonplastis



Gambar 2.1. Batas-batas atterberg untuk sub kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7 (Hardiyatmo, 2002)

Pada gambar di atas menjelaskan bahwa garis A dari Cassagrande digambarkan bersama dengan garis U. Garis U merupakan garis batas atas dari hubungan LL dan PI untuk tanah-tanah di alam (Holtz dan Kovacs, 1981). Tanah organik tinggi seperti tanah gambut (*peat*) dikelompokkan pada kelompok A-8.

2.4. Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik tanah adalah sifat yang mempunyai hubungan dengan elemen penyusunan massa tanah yang ada. Sifat fisik pada tanah terdiri dari kadar air, berat jenis, distribusi ukuran partikel, dan batas-batas konsistensi tanah.

2.4.1. Kadar air

Tanah terdiri dari tiga unsur, yaitu butiran tanah atau partikel padat, air dan udara. Kandungan pada tanah yang merupakan air dan udara menempati rongga yang terdapat di antara butiran, disebut pori tanah. Bila volume pori yang terdapat di dalam tanah di isi penuh oleh air, maka tanah dapat disebut dalam keadaan jenuh. Sedangkan, jika di dalam pori tanah tidak terdapat air sama sekali, maka tanah dalam keadaan kering. Besarnya kandungan air yang ada di dalam tanah merupakan kadar air, dinyatakan dalam persentase terhadap berat tanah dalam keadaan kering. Kadar air dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Kadar air} = \frac{\text{berat air (gr)}}{\text{berat tanah kering (gr)}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.2)$$

Metode yang dapat digunakan untuk mengetahui kadar air dalam tanah, yaitu:

1. Metode pengeringan dengan oven.
2. Pengeringan dengan pembakaran menggunakan alkohol.
3. Pengujian menggunakan speedy.

Metode pengeringan dengan oven dan pengeringan dengan pembakaran menggunakan alkohol memiliki kesamaan, yaitu melakukan penguapan terhadap semua air yang ada pada tanah dan menimbang berat tanah pada kondisi kering, tetapi kedua metode tersebut juga memiliki perbedaan. Pada metode pengeringan dengan oven, pengeringan tanah dilakukan dengan memanaskan menggunakan

oven dengan suhu 105°C selama 24 jam, sedangkan untuk metode pengeringan dengan pembakaran menggunakan alkohol, pengeringan tanah dilakukan dengan membakar tanah (setelah dituangi dengan alkohol atau spiritus) sehingga semua air menguap dan berat kering tanah dapat diketahui.

Pengujian dengan menggunakan speedy dilakukan dengan mencampurkan tanah dalam keadaan *wet condition* dengan bubuk karbid pada suatu tabung *speedy*. Kadar air dapat diketahui berdasarkan konversi tekanan gas yang terjadi di dalam tabung sebagai akibat proses bereaksinya air yang terkandung di dalam tanah dengan karbid.

2.4.2. Berat Jenis

Berat jenis adalah rasio antara massa kering butiran tanah dan massa air suling pada volume yang sama dengan volume butiran tanah tersebut. Nilai berat jenis ini dapat digunakan untuk mengetahui berat relatif tanah terhadap berat air yang mempunyai berat volume sebesar satu.

Masalah utama terhadap pengujian berat jenis adalah cara untuk mengetahui volume butiran tanah. Secara prinsip, jika suatu tanah kondisi kering dengan berat tertentu (berat piknometer dan tanah dikurangi berat piknometer kosong) dimasukkan ke dalam piknometer yang berisi air, maka tinggi air pada piknometer meningkat. Besarnya volume tanah sama dengan meningkatnya volume air. Oleh karena besarnya berat-volume air sama dengan satu, maka volume contoh tanah sama dengan berat peningkatan air (Budi, 2011). Berat jenis tanah dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Berat jenis} = \frac{\text{berat butir tanah (gr)}}{\text{volume butir tanah (gr)}} \dots\dots\dots(2.3)$$

2.4.3. Ukuran Butiran

Sifat-sifat pada tanah sangat berhubungan dengan ukuran dari butirannya. Besarnya butiran pada tanah dijadikan dasar sebagai pemberian nama dan klasifikasi tanah. Oleh sebab itu, analisis butiran sering dilakukan dalam pengujian tanah. Analisis ukuran butiran tanah adalah penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan, dengan ukuran diameter lubang tertentu.

a. Tanah berbutir kasar

Tanah berbutir kasar adalah butiran tanah yang mempunyai ukuran lebih besar dari 0,075 mm. Pada tanah yang memiliki ukuran berbutir kasar dilakukan analisa saringan untuk mengetahui distribusi ukuran butir tanah. Pada analisa saringan terdapat dua cara, yaitu cara kering dan cara basah. Pengujian cara kering digunakan jika butir tanah yang akan diuji cukup bersih dan hanya mengandung sedikit butiran halus yang berukuran kurang dari 0,075 mm. Pengujian cara basah digunakan jika butir tanah yang akan diuji banyak mengandung butir halus (lempung dan lanau) yang berukuran lebih kecil dari 0,075 mm.

Cara yang umumnya dilakukan untuk pengujian analisa saringan, yaitu tanah dilakukan penyaringan melalui satu unit saringan standar. Berat tanah yang tertinggal pada masing-masing saringan ditimbang, lalu persentase terhadap berat kumulatif tanah dihitung. Adapun persentase tanah yang tertahan pada masing masing saringan dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Persentase tanah yang tertahan} = \frac{\text{berat tanah yang tertahan}}{\text{berat tanah total}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.4)$$

Distribusi butiran dapat digambarkan dengan grafik antara persentase lolos dengan diameter masing-masing saringan. Setelah itu, dilakukan perhitungan koefisien keseragaman (Cu) dan koefisien kelengkungan (Cc). Cu dan Cc dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana:

D60 = 60% tanah mempunyai ukuran partikel < D60

D10 = 10% tanah mempunyai ukuran partikel < D10

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana:

D10 = ukuran butiran efektif

D30 = 30% tanah mempunyai ukuran partikel < D30

b. Tanah berbutir halus

Tanah berbutir halus adalah tanah yang mempunyai ukuran kurang dari 0,075 mm. Distribusi ukuran butir tanah yang berbutir halus dapat dilakukan dengan cara sedimentasi. Metode ini berdasarkan pada hukum stokes, yang berhubungan dengan kecepatan mengendap butiran pada larutan suspensi. Menurut Stokes, kecepatan mengendap butiran dapat ditentukan dengan persamaan:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18\mu} D^2 \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana:

- v = kecepatan, sama dengan jarak/waktu (L/t)
- γ_w = berat volume air (gr/cm^3)
- γ_s = berat volume butiran padat (gr/cm^3)
- μ = kekentalan air absolut ($\text{gr}\cdot\text{det}/\text{cm}^2$)
- D = diameter butiran tanah (mm)

2.4.4. Batas-Batas Konsistensi

Konsistensi tanah adalah suatu kondisi fisis dari tanah berbutir halus dengan kandungan kadar air tertentu.

Berdasarkan kandungan kadar air yang terdapat di dalam tanah tersebut, batas konsistensi dibedakan menjadi tiga keadaan yang meliputi:

a. Batas cair (*Liquid Limit*)

Batas cair adalah kadar air yang terdapat di dalam tanah pada perbatasan antara fase cair dan fase plastis. Alat yang digunakan untuk menentukan batas cair adalah alat casagrande

b. Batas plastis (*Plastic Limit*)

Batas plastis adalah keadaan transisi dari semi padat ke plastis, yaitu besar kadar air dimana tanah jika digulung sampai diameter 3 mm tanah akan mengalami retak-retak.

c. Batas susut (*Shrinkage limit*)

Batas susut adalah keadaan transisi dari padat ke semi padat, yaitu besar kadar air dimana tanah tersebut mempunyai volume terkecil saat airnya mengering.

Kadar air pada keadaan masing-masing batas konsistensi disebut batas-batas atterberg. Panjang daerah interval kadar air tanah pada kondisi plastis disebut index plastisitas (IP). Index plastisitas dapat juga dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Indeks Plastisitas (IP)} = LL - PL \dots \dots \dots (2.8)$$

Setiap tanah mempunyai batas-batas konsistensi yang berbeda satu sama lain. Batas-batas konsistensi tanah mempunyai hubungan dengan sifat tanah, yaitu batas cair, batas plastis, batas susut dan index plastis dapat digunakan untuk sifat dan mengetahui jenis tanah yang berbutir halus. Jenis dan sifat tanah yang dilihat dari batas cair dan index plastis dengan menggunakan diagram plastisitas. Tanah yang mempunyai batas susut yang semakin kecil menunjukkan bahwa tanah mempunyai kembang susut yang semakin besar.

2.5. Tanah Lempung

Lempung terbentuk dari hasil pelapukan akibat reaksi kimia yang membentuk susunan kelompok partikel berukuran koloid dengan diameter butiran yang lebih kecil dari 0,002 mm. Sifat-sifat yang terdapat pada tanah lempung, yaitu ukuran butiran halus lebih kecil dari 0,002 mm, permeabilitas rendah, bersifat kohesif, mempunyai nilai kembang susut yang tinggi, serta proses konsolidasi berlangsung lama.

Menurut Kerr (1959), di bumi memiliki kurang lebih 15 macam mineral yang terkandung di dalam tanah lempung, seperti *montmorillonite*, *kaolinite*, *illite*, *smectite*, *saponite*, *tales*, *pyrophyllite*, *nontronite*, *halloysite*, *serpentine*, *chrysotile*, *lizardite*, *antigorite*, *hydromica*, dan *sericite*. Di alam, mineral yang umumnya dominan terkandung pada tanah lempung adalah *montmorillonite*, *kaolinite*, dan *illite*. Dalam pengertiannya, mineral lempung adalah senyawa aluminium silikat yang kompleks yang terdiri dari satu atau dua unit dasar seperti silika tetrahedra dan aluminium oktahedra.

Lempung *montmorillonite* merupakan salah satu mineral tanah lempung yang sensitive terhadap perubahan kadar air, sehingga jika terjadi perubahan kadar air maka volume tanah juga akan berubah. Akibat dari mengembangnya tanah tersebut dapat merusak konstruksi. Lempung *kaolinite* adalah mineral yang terkandung pada tanah lempung yang memiliki susunan satu lembar silika tetrahedral dan satu lembar aluminium oktahedra serta satu susunan setebal 7,2 Angstrom (A°). Lempung *illite* adalah mineral lempung yang mempunyai susunan satu lembaran aluminium oktahedral serta dua lembaran silika tetrahedral. Struktur lempung *illite* hampir mirip dengan lempung *montmorillonite* tetapi memiliki sifat ikatan yang berbeda.

2.6. Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif adalah tanah yang mempunyai potensi kembang susut yang tinggi. Tanah ekspansif mempunyai sifat yang sangat peka terhadap perubahan kadar air. Jika terjadi peningkatan kadar air, tanah akan mengalami pengembangan sedangkan apabila kadar air berkurang akan terjadi penyusutan pada tanah. Kandungan mineral yang umumnya terdapat pada tanah lempung ekspansif adalah *montmorillonite*, *kaolinite*, dan *illite*. Mineral lempung yang menyebabkan perubahan volume biasanya *montmorillonite*, sedangkan *illite* dan *kaolinite* dapat bersifat ekspansif jika ukuran partikelnya berukuran sangat halus.

Ciri yang mudah dilihat dari tanah lempung ekspansif adalah permukaan tanah yang tampak kaku atau tegang. Potensi dari kembang susut tanah ekspansif dipengaruhi dari *soil properties* tanah tersebut. Beberapa ahli telah mengidentifikasi pengaruh *soil properties* terhadap kembang susut tanah yaitu pada index plastisitas dan batas cair. Index plastisitas dan batas cair mempunyai kegunaan dalam menentukan karakteristik pemuaian tanah lempung.

Tabel 2.3. Potensi perubahan volume terkait dengan indeks plastisitas dan batas cair

Potensi perubahan volume	Indeks plastisitas (%)	Batas susut (%)	Batas cair (%)
Rendah	<18	>15	20-35
Sedang	15-28	10-15	35-50
Tinggi	25-41	7-12	50-70
Sangat tinggi	>35	<11	>70

(Sumber: Holts dan Kovacs 1981, dalam Yunianti, 2010)

Metode yang dapat dilakukan untuk mengidentifikasi tanah ekspansif adalah metode indeks tunggal, metode klasifikasi dan metode pengukuran langsung. Metode indeks tunggal adalah metode yang berdasarkan pada indeks dasar tanah terhadap pengukuran potensi mengembang tanah lempung, sedangkan metode pengukuran langsung adalah metode dengan menggunakan alat konsolidometer konvensional satu dimensi. Pada metode ini, sampel tanah diberi beban sesuai beban yang diinginkan. Setelah itu, dilakukan pembacaan pengembangan sampel tanah dengan cara tinggi mengembang tanah dibagi tebal awal contoh (Arbianto dkk, 2016).

Metode yang lainnya adalah metode klasifikasi. Metode ini berdasarkan pada penilaian sejumlah nilai indeks tanah. Pengujian indeks dasar tanah terdiri dari batas-batas atterberg, linear shrinkage test (uji susut linear), uji mengembang bebas dan uji kandungan koloid. Metode klasifikasi dapat juga disebut metode USBR (*United State Beureu Reclamation*).

Tabel 2.4. Kriteria identifikasi tanah lempung ekspansif USBR

Kandungan koloid <0,001mm (%)	Indeks plastisitas (%)	Batas susut (%)	Kemungkinan ekspansif (%) perubahan volume	Derajat ekspansif
>28	>35	<11	>20	Sangat tinggi
20-13	25-41	7-12	20-30	Tinggi
13-23	15-28	10-16	10-20	Sedang
>15	<18	>15	<10	Rendah

(Sumber: Chen 1975, dalam Yuliet, 2010)

2.7. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah adalah suatu metode rekayasa tanah yang mempunyai tujuan untuk meningkatkan dan/atau mempertahankan sifat-sifat tertentu pada tanah, agar selalu memenuhi syarat teknis yang dibutuhkan (Darwis, 2017).

Jenis stabilisasi tanah berdasarkan mekanisme global yang terjadi akibat perbaikan tanah, yaitu:

1. Perbaikan tanah adalah jenis stabilisasi tanah yang akan memperbaiki sifat tanah dan/atau mempertahankan kemampuan dari tanah tersebut berdasarkan syarat teknis yang diperlukan, dengan cara penggunaan bahan kimiawi, pencampuran tanah, pengeringan tanah, atau melalui penyaluran energi statis atau dinamis ke dalam suatu lapisan tanah secara fisik.
2. Perkuatan tanah adalah jenis stabilisasi tanah yang memperbaiki dan/atau mempertahankan kemampuan dari tanah tersebut berdasarkan syarat teknis yang diperlukan, dengan cara menambahkan suatu material tertentu ke dalam suatu lapisan tanah yang bermasalah.

2.7.1. Stabilisasi Secara Kimiawi

Stabilisasi kimiawi adalah metode stabilisasi yang bisa menggunakan suatu bahan kimia yang dapat berbentuk larutan dan/atau bubuk kimia dengan mencampurkan bahan kimia tersebut ke dalam tanah yang bermasalah tersebut. Cara pencampuran dari stabilisasi kimia ini menyesuaikan dengan bahan pencampurnya maupun tanah yang akan diperbaiki.

Keadaan tanah yang akan dilakukan stabilisasi harus diketahui terlebih dahulu, sehingga dapat dilakukan pemilihan jenis bahan campuran yang cocok. Keadaan tanah tersebut meliputi sifat fisik dan kimia dari tanah. Umumnya tanah yang dilakukan stabilisasi dengan metode kimiawi adalah tanah berbutir halus. Hal-hal yang lain yang penting diperhatikan dalam metode stabilisasi kimiawi merupakan sifat reaksi kimia antara mineral yang terkandung di dalam tanah dengan zat kimia pada bahan campuran yang akan digunakan. Selain hal-hal yang perlu diperhatikan, terdapat hal penting juga yang harus dihindarkan jika menggunakan bahan kimia sebagai campuran stabilisasi tanah, yaitu penjarangan ke tanah yang bukan tanah tujuan dalam stabilisasi. Keadaan seperti itu dapat

merugikan lingkungan, bahkan bisa berakibat lebih buruk jika tanah yang terkontaminasi telah terdapat suatu bangunan.

2.7.2. Stabilisasi Secara Mekanis

Stabilisasi secara mekanis merupakan metode stabilisasi tanah yang mempunyai sasaran untuk meningkatkan kinerja tanah, yang meliputi daya dukung, penurunan, permeabilitas, dan lain-lain. Stabilisasi secara mekanis memiliki perbedaan dengan stabilisasi kimiawi berdasarkan dari mekanisme yang terjadi antara tanah yang dilakukan stabilisasi dengan bahan dan/atau upaya yang akan dilakukan. Jenis stabilisasi secara mekanis yang biasanya dilakukan adalah dengan pemadatan tanah.

Jenis metode stabilisasi mekanis yang umumnya digunakan, meliputi:

1. Metode pemadatan.

Cara kerja stabilisasi dengan metode pemadatan, yaitu dengan memberikan beban dinamis ke dalam lapisan tanah, sehingga menyebabkan butir-butir tanah akan merapat satu sama lain dan berkurangnya rongga udara yang terdapat di dalam tanah. Hal-hal yang mempengaruhi hasil dari pemadatan, meliputi kandungan kadar air saat terjadinya pemadatan, jenis tanah yang dipadatkan, dan energi pemadatan per volume satuan tanah.

2. Metode konsolidasi.

Stabilisasi tanah dengan metode konsolidasi merupakan pemadatan dengan memberikan pembebanan statis secara sementara, sehingga membutuhkan waktu yang cukup lama. Oleh karena itu, metode ini dapat dikombinasikan dengan metode yang lain seperti sistem drainase air vertikal. Proses konsolidasi ini mempunyai tujuan untuk memberi tekanan pada tanah yang dapat menyebabkan peningkatan kekakuan dan kekuatan gesernya. Jika tanah yang akan dilakukan proses konsolidasi berupa tanah jenuh air, maka penggunaan sistem drainase air vertikal dilakukan sebelum pembebanan dilakukan sehingga dapat mempercepat aliran air tanah ke permukaan dan mengurangi waktu konsolidasi. Jenis tanah yang cocok untuk metode konsolidasi ini adalah tanah lunak dan tanah yang mempunyai butiran halus, karena pada tanah lunak biasanya mudah ditembus oleh PVD sedangkan jika untuk tanah yang kaku dibutuhkan pengeboran awal.

3. Metode pengeringan.

Stabilisasi dengan metode pengeringan umumnya dilakukan dengan memompa atau menguapkan air tanah atau air permukaan dari lokasi yang akan dilakukan stabilisasi dan metode ini dilakukan sebelum penggalian lebih dalam lagi. Stabilisasi tanah dari proses *dewatering* mempunyai jangka waktu yang pendek, yaitu hanya saat pekerjaan konstruksi dilakukan dimana bertujuan agar pekerjaan dapat berlangsung dengan nyaman dan aman. Tetapi jika kondisi air tanah tidak mengalami peningkatan setelah dilakukan stabilisasi tersebut, maka dapat berlangsung dalam jangka waktu yang lama.

4. Metode penggantian.

Stabilisasi tanah dengan metode penggantian tanah adalah metode tertua serta sangat sederhana untuk melakukan perbaikan kondisi dan daya dukung tanah. Daya dukung pondasi dapat dilakukan perbaikan dengan penggantian terhadap tanah yang bermasalah (tanah organik atau tanah lempung lunak) dengan material pengganti yang lebih baik (pasir, kerikil atau batu pecah). Penggunaan metode penggantian secara konvensional dapat dilakukan pada lapisan tanah permukaan yang dangkal, sedangkan untuk lapisan tanah yang cukup dalam dapat dilakukan dengan menggabungkan dengan metode yang lain.

5. Berbagai jenis perkembangan lainnya.

Stabilisasi tanah dengan memanfaatkan campuran limbah merupakan salah satu metode stabilisasi yang sedang berkembang. Bahan pencampur limbah yang dapat dijadikan bahan stabilisasi tanah berupa limbah dari berbagai jenis tambang logam, limbah plastik, limbah kaleng, dan sebagainya.

2.8. Limbah Pabrik Kertas

Industri pulp dan kertas merupakan salah satu industri yang perkembangan produksinya terus berlanjut. Kegiatan produksi tersebut akan menghasilkan limbah dengan berbagai macam bentuk. Limbah yang dihasilkan oleh industri pulp dan kertas memiliki jumlah yang cukup besar.

PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper adalah salah satu pabrik kertas yang terdapat di Sumatera Selatan. Bahan baku yang digunakan oleh pabrik kertas tersebut berupa *Acacia Mangium* dan *Eucalyptus Pellita*. Pabrik kertas ini

mempunyai kapasitas produksi 1.430 ton/hari atau 450.000 ton/tahun (Jonathan, 2018). Produk yang dihasilkan oleh pabrik ini berupa olahan dari kayu hingga menjadi bubur kertas (*Pulp*). *Pulp* adalah komponen utama dalam pembuatan kertas. Adapun tahapan dalam pembuatan produksi *Pulp* di PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper sebagai berikut:

a. Penyiapan bahan baku

Tujuan dari proses penyiapan bahan baku adalah untuk menyiapkan bahan baku yang baik dan memenuhi kriteria sebagai bahan baku untuk proses pemasakan di unit Digester. Pada proses ini limbah yang dihasilkan berupa limbah padat. Limbah padat tersebut berupa 10% bark dan 3% fines. Limbah padat tersebut akan digunakan kembali sebagai bahan bakar pada unit *power boiler* dan menghasilkan listrik.

b. Pemasakan

Pada proses pemasakan ini mempunyai beberapa tahapan, yaitu *air lock feeder*, *chip bin*, *chip meter*, *low pressure feeder*, *steaming vessel*, *chip chute*, *high pressure feeder*, *top separator*, dan pemasakan di dalam *continous digester*. Proses pemasakan dapat dilakukan setelah mendapatkan chip yang sesuai. Tahap awal dari proses pemasakan adalah *air lock feeder*. *Air lock feeder* mempunyai fungsi untuk mengoptimalkan pendistribusian *chip* ke dalam *chip bin* sehingga semua sisi menjadi rata. Tahap selanjutnya adalah *chip bin*. *Chip bin* ini terdiri dari dua fungsi, yaitu menyediakan waktu tinggal serta kesinambungan pengoperasian digester selama ada masalah mengenai aliran *chip* yang masuk ke digester dan untuk pemanasan awal sehingga dapat menyediakan waktu tinggal yang cukup selama proses pemanasan awal.

Tahap *chip meter* berfungsi untuk mengukur besarnya jumlah chip untuk setiap putarannya dan menentukan laju produksi pada digester. Setelah itu tahap *low pressure feeder* (LPF), LPF adalah alat yang berbentuk bintang dengan fungsi sebagai pembatas antara tekanan dan atmosfer dan tekanan di dalam *steaming vessel* ± 124 kPa. *Steaming vessel* mempunyai fungsi utama, yaitu memisahkan udara dan gas yang terdapat dalam chip, menaikkan temperature chip, dan untuk menyeragamkan kadar air dari chip. Setelah dari *steaming vessel*, proses selanjutnya adalah *chip chute*. *Chip chute* adalah alat yang berbentuk tabung tegak

yang mempunyai tekanan dan menghubungkan antara *steaming vessel* dengan *high pressure feeder*. *High pressure feeder* (HPF) mempunyai rotor dengan empat kantong pengisi yang mengalir dari satu sisi rotor ke sisi lainnya. Tekanan dari HPF adalah 1375 kPa yang dapat mengirim chip menuju bagian atas dari mesin digester atau *top separator*. Pada *top separator* mempunyai zona dengan fungsi yang berbeda. Setelah dari *top separator*, proses selanjutnya adalah proses pemasakan di dalam *continous digester*. Chip yang terdapat di dalam digester akan memasuki beberapa zona, yaitu dari *zona impregnasi*, *upper cooking*, *main extraction*, *washing zone*, sampai *blowing*.

c. Penyaringan dan pencucian

Pada proses ini juga mempunyai beberapa tahapan sehingga menjadi pulp yang lebih baik. Tahapan tersebut antara lain *deknoting*, *screening*, *brown stock washing*, *delignifikasi oksigen*, *twin roll press evolution*, dan *first post oxygen hashing*. *Deknoting* adalah tahap awal dalam proses ini. Pada tahap *deknoting* terjadi pemisahan knot atau mata kayu yang tidak masak. *Screening* adalah tahapan pemisah antara pulp dan *shieve*. *Screening* mempunyai tiga tahapan, yaitu *primary screening*, *secondary screening*, dan *tertiary screening*.

d. Delignifikasi

Delignifikasi oksigen adalah suatu proses untuk mengurangi kandungan lignin dari pulp yang mempunyai warna coklat atau belum mengalami proses pemutihan. Pada proses ini mempunyai fungsi untuk menghemat bahan-bahan kimia yang mahal pada tahap pemulihan dan dalam waktu bersamaan dapat menurunkan dampak terhadap lingkungan.

e. Pemutihan

Pada proses ini dilakukan dua tahap pencucian, yaitu *first post oxygen washing* dan *second post oxygen washing*. Tujuan dari proses tersebut adalah menaikkan *brightness*, menurunkan kandungan resin, dan membuat jenis pulp khusus.

f. Pengeringan dan pembuatan lembaran *pulp*

Ketika lembaran melewati dryer, secara kontinyu udara panas dihembuskan pada permukaan atas dan bawah dari lembaran pulp. Udara panas tersebut akan menguapkan air yang terkandung di dalam lembaran pulp. Sedangkan, saat

lembaran bergerak di antara blow bar udara dihembuskan ke dalam blow bar pada bagian atas dan bawah. *Blow box* mempunyai fungsi untuk menjaga agar lembaran tetap mengambang dari permukaan *blow bar* dan membantu *pulp* untuk siap ke tahap pemotongan.

Proses produksi yang dilakukan PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper menghasilkan limbah dengan berbagai jenis, yaitu:

1. Effluent limbah cair, berupa:
 - a. Padatan tersuspensi yang terdiri dari partikel kayu, serat, pigmen, debu dan sejenisnya.
 - b. Senyawa organik koloid terlarut seperti serat hemisellulosa, glukosa, lignin, alkohol, zat pengurai serat, dan zat sintesis yang menghasilkan BOD tinggi.
 - c. Limbah cair berwarna pekat yang berasal dari lignin.
 - d. Bahan anorganik terlarut seperti NaOH, Na₂SO₄, clorate, dan lain-lain.
 - e. Limbah panas.
 - f. Mikroorganisme seperti golongan bakteri coliform.
2. Partikulat, berupa:
 - a. Abu dari pembakaran kayu bakar dan sumber energi lain.
 - b. Partikulat zat kimia terutama yang mengandung Na dan Ca.
3. Gas, berupa:
 - a. Gas sulfur berbau busuk seperti merkaptan dan H₂S yang dilepaskan dari berbagai tahap dalam proses *kraft pulping* dan proses pemulihan bahan kimia.
 - b. Oksida sulfur dari pembakaran bahan bakar fosil, *kraft recovery furnace* dan *lime klin*.
 - c. Uap yang akan membahayakan karena mengganggu jarak pandangan.
4. Solid waste, berupa:
 - a. Sludge dari pengolahan limbah primer dan sekunder.
 - b. Limbah padat seperti potongan kayu dan limbah pabrik lainnya.
 - c. Dreg dari *recautisizing plant*.
 - d. Ash atau abu sisa pembakaran.
 - e. Pasir bekas dari power boiler.

PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper mempunyai sistem pengolahan limbah yang cukup baik. Sistem pengolahan limbah tersebut mempunyai dua jenis pengolahan lingkungan, yaitu:

- a. Pengolahan limbah yang dibuang
- b. 3R concept (*Reduce, Reuse, Recycling*)

2.8.1. Pengolahan limbah cair

PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper mempunyai instalasi pengolahan air limbah (IPAL) yang disebut dengan *effluent treatment* yang berasal dari Jerman. Proses pengolahan limbah cair bertujuan untuk mengolah limbah cair yang dihasilkan oleh pabrik sehingga menjadi limbah yang terolah dengan standar yang telah ditetapkan pemerintah untuk pabrik pulp dan kertas. Saluran limbah cair terbagi menjadi dua saluran, yaitu saluran limbah alkali dan saluran limbah asam. Pemisahan dari saluran bertujuan untuk mengurangi bahan kimia penetral dan adanya limbah asam dapat digunakan sebagai penetral pada *neutralization basin*. *Effluent treatment* beroperasi selama 24 jam, tetapi jika terjadi masalah maka limbah cair akan ditampung di emergency basin sampai kondisi *effluent treatment* normal. Pengolahan limbah cair pada PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper juga memiliki IPAL untuk limbah domestik yang berasal dari perumahan atau *townsite*. Pengolahan limbah domestik mempunyai beberapa tahap, yaitu tahap pemisahan kotoran, tahap sedimentasi, tahap aerasi secara biologi untuk menguraikan senyawa-senyawa yang bersifat organik, dan tahap desinfektan untuk menghilangkan bakteri-bakteri berbahaya seperti bakteri E.Coli.

2.8.2. Pengolahan limbah padat

Limbah padat yang dihasilkan dari pabrik pulp dan kertas mempunyai beberapa jenis. Limbah padat tersebut berupa dregs dan grits dari *recausticizing plant*, abu atau asap dari *power boiler*, dan NaCl (garam) dari *chemical plant* yang akan dilakukan penimbunan dengan sistem *landfill*. Jenis limbah padat lainnya seperti kulit kayu dari wood handling, *screen reject*, dan lumpur dari *effluent treatment* disalurkan ke *power boiler* sebagai bahan bakar untuk menghasilkan steam sebagai penggerak turbin dan dapat menghasilkan listrik.

Pada sistem landfill akan terdapat sumur pantau dan kolam pengumpul lindi yang berfungsi untuk pemantauan kualitas lindi dan kontaminasi dari limbah padat terhadap tanah. Kandungan lindi yang terdapat pada kolam penampungan akan dikirimkan ke *effluent treatment* sehingga dapat diolah secara fisik-kimia-biologi. Selain dari limbah padat akibat proses produksi, limbah padat juga dihasilkan dari limbah domestik. Limbah domestik yang berasal dari rumah tangga dan perkantoran akan dilakukan penampungan di tempat pembuangan sampah dan dikontrol oleh petugas khusus.

2.8.3. Pengolahan limbah udara

Pengolahan limbah udara yang dilakukan oleh PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper dengan membangun peralatan pengendalian secara langsung pada sumbernya. Pencemaran udara yang dapat terjadi berasal dari proses pembakaran pada *power boiler* dan proses kimia pada *chemical plant*. Pada *power boiler* dibuat sebuah *electrostatic precipitator* dan *lime klin* yang berfungsi untuk menangkap debu-debu yang dihasilkan dari cerobong utama sebelum dibuang bebas ke udara. Selain itu, untuk proses kimia *chemical plant* dibangun *scrubber* untuk menyerap kembali gas-gas pembuangan dengan bantuan cairan kimia penyerap. PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper juga memiliki pengendalian terhadap bau yang dihasilkan dari oleh pabrik tersebut dengan melakukan beberapa hal yaitu, merancang ketel dengan karakteristik low odor, memasang dua unit pengumpul NCG (*Non Condensable Gas*), pengumpulan dan pembakaran NCG *treatment*, dan memasang *vent scrubber* pada *smelt dissolving tank*.

2.9. Stabilisasi Tanah dengan Abu Limbah Pabrik Kertas

Stabilisasi tanah dengan abu limbah pabrik kertas merupakan salah satu metode stabilisasi secara kimiawi. Kandungan silika pada limbah pabrik kertas dapat dijadikan sebagai bahan pengikat pada tanah. Silika pada tanah akan menimbulkan reaksi *pozzolanic*. Reaksi *pozzolanic* merupakan reaksi yang terjadi antara silika dan kalsium hidroksida beban dengan tanah.

Limbah padat industri pulp dan paper yang akan dimanfaatkan sebagai bahan campuran stabilisasi tanah merupakan limbah padat yang diubah menjadi

bentuk abu dengan cara pembakaran. Kandungan yang terdapat pada limbah pabrik kertas menunjukkan adanya potensi pemanfaatan tersebut, seperti kandungan silikat, alumunium, besi, kalsium, dan magnesium (BBS, 2002 dalam Purwati, 2006).



Gambar 2.2. Limbah pabrik kertas

Tabel 2.3. Kandungan logam pada limbah pabrik kertas

Logam	Unit	Rata-rata Sludge cake
Na	ppm	2665,57
K	ppm	999,95
Al	ppm	19286,69
Fe	ppm	6958,14
Mg	ppm	1771,74
Mn	ppm	697,27
Ni	ppm	15,38
Pb	ppm	8,51
Zn	ppm	147,79
Cu	ppm	20,43
Cd	ppm	1,83
Cr	ppm	203,51

(Sumber : Data PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper, 2015)

Berikut merupakan kandungan kimia yang terdapat pada abu limbah pabrik kertas:

Tabel 2.4. Komposisi kimia pada abu limbah pabrik kertas

Komposisi Kimia	Persentase (%)
CaO	62,39
SiO ₂	23,25
Al ₂ O ₃	5,26
MgO	2,46
Fe ₂ O ₃	0,77
SO ₃	0,58
Na ₂ O	0,42
K ₂ O	0,35
L.O.I	4,50

(Sumber : Biradar, 2016)

Cara pengolahan yang digunakan untuk menjadikan limbah pabrik kertas sebagai bahan campuran untuk stabilisasi tanah adalah dengan membentuk menjadi abu. Pembentukan abu dengan cara mengeringkan limbah padat pabrik kertas sampai limbah tersebut kering udara. Setelah itu, dilakukan pembakaran sampai berbentuk seperti abu. Penggunaan abu limbah pabrik kertas mempunyai persentase yang berbeda-beda. Pada penelitian ini, variasi campuran abu limbah pabrik kertas dengan tanah lempung ekspansif berdasarkan pada penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian yang dilakukan oleh Dharan (2016) menggunakan abu limbah pabrik kertas sebagai bahan campuran stabilisasi tanah dengan dua jenis tanah dan persentase maksimum sebesar 8%. Hasil yang diperoleh dari penelitian, untuk jenis tanah pertama menunjukkan nilai CBR maksimum 25,98% dari nilai CBR tanah asli sebesar 5,19% dan jenis tanah kedua mengalami kenaikan dari nilai CBR tanah asli sebesar 3,6% menjadi 18,6%.

Pada penelitian serupa yang dilakukan oleh Onyelowo KC (2017) menghasilkan nilai persentase maksimum CBR sebesar 12%. Nilai CBR maksimum yang didapat adalah 23% dari nilai CBR tanah asli 14%. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Vishwajeet Biradar (2016) yang menggunakan abu limbah pabrik kertas dengan tambahan serbuk marmer dan pengujian kuat tekan bebas. Penelitian tersebut menghasilkan nilai maksimum pada persentase 6%.

Hasil pengujian kuat tekan bebas tanah asli menunjukkan nilai 78,36 kN/m² dan menghasilkan nilai maksimum sebesar 1022.3 kN/m². Oleh sebab itu, berdasarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Pada penelitian ini digunakan persentase campuran sebesar 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% dengan harapan bahwa hasil nilai CBR yang akan didapat nantinya terletak di antara variasi campuran tersebut.

2.10. Pemadatan Tanah

Secara prinsipnya, proses pemadatan tanah adalah usaha untuk memperkecil jarak antara butiran tanah dengan cara mengurangi volume udara yang terdapat di dalam pori tanah tersebut (Budi, 2011). Tanah dapat dikatakan semakin padat, jika jarak antara butiran tanah semakin kecil sehingga menyebabkan semakin banyak butiran tanah dalam satu satuan volume tanah. Kepadatan tanah dapat dijelaskan sebagai berat kering maksimum butiran per satuan volume tanah. Tanah dapat dilakukan pemadatan jika terdapat kadar air tertentu. Proses pemadatan tanah kelempungan pada kondisi kering atau pada kondisi jenuh tidak akan menghasilkan kepadatan yang maksimum. Kadar air yang dibutuhkan untuk mendapatkan kepadatan maksimum disebut kadar air optimum.

Pemadatan dilakukan dengan tujuan antara lain:

1. Meningkatkan kuat geser tanah.
2. Mengurangi sifat mudah mampat (kompresibilitas).
3. Mengurangi permeabilitas.
4. Mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air.

Peristiwa pemadatan tanah dan konsolidasi tanah mempunyai perbedaan yang mendasar. Pada proses pemadatan tanah dengan beban dinamis, proses bertambahnya berat volume kering tanah sebagai akibat pemadatan partikel yang diikuti oleh pengurangan volume udara dengan volume air tetap tidak berubah. Saat air ditambahkan pada pemadatan, air ini akan melunakkan partikel-partikel tanah. Partikel-partikel tanah tersebut menggelincir satu sama lain dan bergerak pada posisi yang lebih rapat. Sedangkan, konsolidasi merupakan pengurangan secara perlahan volume pori yang menyebabkan bertambahnya berat volume kering akibat beban statis yang bekerja pada periode waktu tertentu. Seperti

contoh, pengurangan volume pori tanah jenuh air akibat berat tanah timbunan atau dari beban struktur di atasnya. Pada tanah kohesif yang jenuh, proses konsolidasi akan diikuti oleh pengurangan volume pori dan kandungan air di dalam tanahnya yang berakibat pengurangan volume tanahnya (Hardiyatmo, 2002).

2.11. Pengujian Kepadatan Tanah

Jenis-jenis pengujian yang berkaitan dengan kepadatan tanah, yaitu:

2.11.1. Proctor test

Pengujian proctor merupakan salah satu cara untuk mengetahui kepadatan maksimum suatu contoh tanah yang dapat dicapai pada energi standar dengan cara memberikan kadar air yang optimum. Hasil dari pengujian pemadatan ini disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara berat volume tanah dalam keadaan kering dan kadar air. Pada grafik tersebut terdapat garis ZAV (*Zero Aid Void*). *Zero Aid Void* adalah kondisi tanah yang sangat padat sehingga kadar udara yang terdapat di dalam pori tanah sebesar nol. Dengan kata lain, tanah pada kondisi kadar air tertentu dipadatkan sehingga volume udara di dalam pori tanah menjadi nol dan tanah menjadi jenuh. Adapun rumus-rumus dalam pengujian pemadatan tanah standar sebagai berikut:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \omega} \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana:

ω = kadar air (%)

$$\gamma = \frac{W_2 - W_1}{V} \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana:

V = volume cetakan

W1 = berat cetakan + benda uji

W2 = berat cetakan

$$\gamma_d = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1 + G_s \cdot \omega} \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana:

G_s = berat jenis butiran tanah

γ_w = berat volume air

Pengujian proctor ini mempunyai dua jenis, meliputi *standard proctor* dan *modified proctor*. Secara umum, pengujian pemadatan dengan *modified proctor* sama dengan pengujian secara *standard proctor*. Perbedaan dua jenis pengujian pemadatan ini terdapat pada berat penumbuk, tinggi jatuh, energi yang digunakan, jumlah lapisan dan jumlah pukulan per lapis. Pada pengujian proctor, tanah dipadatkan dalam sebuah cetakan silinder. Selama percobaan di laboratorium, cetakan tersebut diletakkan pada sebuah pelat dasar dan pada bagian atasnya diberikan perpanjangan yang bentuknya juga seperti silinder. Tanah dicampur dengan air dengan variasi kadar air yang berbeda-beda setelah itu dilakukan pemadatan.

2.11.2. Sand Cone

Sand cone adalah salah satu metode untuk menentukan kepadatan tanah di lapangan dengan bantuan pasir standar. Selain dari *sand cone*, metode yang biasanya digunakan untuk menentukan kepadatan di lapangan adalah *rubber balloon* dan *nuclear density test*.

Sand cone terdiri dari botol plastik atau kaca dan kerucut logam yang berada di atasnya. Botol dan kerucut ini akan diisi dengan pasir Ottawa kering bergradasi buruk. Di lapangan, sebuah lubang kecil digali pada permukaan tanah yang telah dipadatkan. Jika lubang tersebut telah digali (tanah asli ditimbang seluruhnya), kerucut dengan botol berisi pasir diletakkan di atas lubang itu. Pasirnya dibiarkan mengalir keluar dari botol mengisi seluruh lubang dan kerucut. Setelah itu, berat dari tabung, kerucut dan sisa pasir yang terdapat di dalam botol ditimbang (Das, 1995).

2.11.3. California bearing ratio (CBR)

Pengujian *california bearing ratio* (CBR) adalah salah satu pengujian untuk menentukan kekuatan dari suatu lapisan tanah. Pengujian *california bearing ratio* (CBR) mempunyai prinsip dasar, yaitu membandingkan besarnya beban yang dibutuhkan untuk menekan torak dengan luas penampang 3 inch² ke dalam

lapisan perkerasan sedalam 0,1 inch (2,54 mm) atau 0,2 inch (5,08 mm) dengan beban standar. Oleh sebab itu, kekuatan lapisan perkerasan dinyatakan dalam persentase. Besarnya beban standar untuk penetrasi 0,1 inch adalah 3000 lbs atau sekitar 1350 kg, sedangkan besarnya beban standar untuk penetrasi 0,2 inch adalah 4500 lbs atau sekitar 2025 kg (Budi, 2011). Nilai CBR dirumuskan sebagai berikut:

$$\% \text{ CBR pada penetrasi 0,1''} = \frac{\text{Beban}}{3000} \times 100\% \dots\dots\dots(2.7)$$

$$\% \text{ CBR pada penetrasi 0,2''} = \frac{\text{Beban}}{4500} \times 100\% \dots\dots\dots(2.8)$$

Pengujian CBR dapat dilakukan di laboratorium dan di lapangan. Pengujian CBR di laboratorium terdiri dari dua jenis kondisi, yaitu pengujian kering (*Unsoaked*) dan pengujian basah (*Soaked*). Secara umum, pengujian CBR di lapangan dan di laboratorium mempunyai prinsip yang sama. Pada pengujian CBR di lapangan yang harus diperhatikan adalah kebutuhan dari beban kontra. Beban kontra adalah beban yang berfungsi untuk menahan torak agar torak dapat masuk ke dalam lapisan tanah. Beban kontra umumnya digunakan sebuah truk yang berisi muatan penuh sehingga pada saat pemberian beban pada torak tidak terangkat. Besarnya penetrasi diukur dengan menggunakan sebuah dial penurunan yang dipasang pada gelagar horizontal. Gelagar tersebut harus cukup panjang dan kaku dengan perletakan sedikit jauh dari titik pengujian, sehingga tidak terjadi lendutan dan tidak terpengaruh tekanan tanah akibat penetrasi torak. Pembacaan beban dan penetrasi dilakukan setiap interval 0,025 inch, sedangkan nilai CBR ditentukan berdasarkan besarnya beban untuk memasukkan torak sedalam 0,1 inch atau 0,2 inch.