

Pengaruh Penambahan Abu Limbah Pabrik Kertas Terhadap Nilai CBR Soaked pada Tanah Lempung Ekspansif

by Winda Nafisah

Submission date: 30-Jul-2019 12:04PM (UTC+0700)

Submission ID: 1156155158

File name: Winda_Nafisah_03011281520108.pdf (2.97M)

Word count: 16406

Character count: 95861

¹ BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangunan konstruksi yang baik harus didukung oleh berbagai komponen pendukung, baik struktur bawah maupun struktur atas bangunan. Kondisi tanah merupakan komponen awal yang harus diperhatikan dalam sebuah perencanaan konstruksi. Tanah yang baik untuk sebuah konstruksi di atasnya harus memiliki daya dukung tanah yang tinggi. Jika tanah memiliki daya dukung yang rendah, akan berpengaruh terhadap berbagai tahapan pada pembangunan konstruksi, yaitu mulai dari tahap perencanaan, pelaksanaan, sampai tahap operasional dan pemeliharaan.

Tanah lempung ekspansif merupakan salah satu jenis tanah yang bermasalah untuk dapat dibangun sebuah konstruksi di atasnya. Tanah lempung ekspansif adalah jenis tanah yang mempunyai nilai kembang susut yang tinggi, sehingga perilaku tanah lempung ekspansif sangat dipengaruhi oleh kandungan air. Volume tanah dapat mengembang pada kondisi basah dan akan menyusut jika kondisi mengering. Kondisi tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada sebuah konstruksi, khususnya di bagian pondasi yang berhubungan dengan tanah. Oleh karena itu, perlu dilakukan perbaikan tanah atau stabilisasi untuk tanah lempung ekspansif yang bermasalah tersebut.

Upaya untuk mengubah sifat-sifat asli tanah agar dapat menyesuaikan dengan kebutuhan sebuah konstruksi dapat dikategorikan sebagai usaha stabilisasi tanah. Stabilisasi tanah merupakan suatu metode rekayasa tanah yang mempunyai tujuan untuk meningkatkan dan mempertahankan sifat-sifat tertentu pada tanah, sehingga dapat memenuhi syarat teknis yang dibutuhkan. Syarat teknis yang umumnya harus dipenuhi untuk kondisi tanah yang baik bagi konstruksi meliputi daya dukung tanah yang tinggi, kuat geser tanah, kondisi penurunan tanah, dan lain sebagainya. Metode stabilisasi tanah memiliki berbagai macam jenis, yang salah satu nya adalah metode stabilisasi kimiawi. Metode stabilisasi kimiawi adalah suatu metode stabilisasi tanah dengan menambahkan bahan campuran

tertentu ke tanah yang bermasalah tersebut, sehingga akan terjadi suatu reaksi tertentu dari tanah dan bahan pencampur sehingga akan menghasilkan suatu sifat teknis yang lebih baik. Bahan campuran stabilisasi yang digunakan juga sangat beragam mulai dari semen, kapur, abu, larutan kimia sampai bahan limbah atau sampah yang umumnya tidak digunakan lagi.

Limbah pabrik kertas merupakan salah satu limbah yang memiliki kandungan silika sebesar $\pm 23\%$ berdasarkan dari penelitian yang telah dilakukan oleh Biradar (2016). Selain itu, limbah pabrik kertas juga menghasilkan limbah dengan jumlah yang tidak sedikit dan kurang dimanfaatkan sebesar 64,058 ton/tahun (Panja Limbah dan Lingkungan, 2019). Jumlah limbah tersebut khususnya *sludge* mempunyai nilai sebesar kurang lebih sepertiga dari seluruh limbah (Sinuhaji, 2017). Kandungan silika pada limbah pabrik kertas menyebabkan bahan tersebut dapat digunakan sebagai bahan campuran untuk stabilisasi tanah. Sebelum dilakukan pencampuran pada tanah, limbah pabrik kertas dijadikan abu dengan cara dikeringkan dan dibakar.

Penelitian ini akan melakukan stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan menganalisa perubahan nilai *california bearing ratio* (CBR) *soaked* tanah yang telah dicampur dengan abu limbah pabrik kertas. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan stabilisasi tanah dengan campuran abu limbah pabrik kertas dengan meninjau terhadap kuat tekan bebas sehingga pada penelitian ini dilakukan analisa berbeda dari nilai *california bearing ratio* (CBR) *soaked* tanah.

1.2. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan dari latar belakang, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan abu limbah pabrik kertas terhadap nilai CBR *soaked* dan pengembangan pada tanah lempung ekspansif dengan variasi nilai campuran 2%, 4%, 6%, 8% dan 10%?
2. Bagaimana perubahan nilai CBR *soaked* dan pengembangan pada tanah lempung ekspansif terhadap penambahan abu limbah pabrik kertas dengan variasi nilai campuran 2%, 4%, 6%, 8% dan 10% setelah dilakukan perawatan selama 3 hari dan 7 hari?

1.3. Tujuan Penelitian :

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Meninjau pengaruh penambahan abu limbah pabrik kertas terhadap nilai CBR *soaked* dan pengembangan pada tanah lempung ekspansif dengan variasi nilai campuran 2%, 4%, 6%, 8% dan 10%.
2. Meninjau perubahan nilai CBR *soaked* dan pengembangan pada tanah lempung ekspansif terhadap penambahan abu limbah pabrik kertas dengan variasi nilai campuran 2%, 4%, 6%, 8% dan 10% setelah dilakukan perawatan selama 3 hari dan 7 hari.

1.4. Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Tanah yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah lempung ekspansif yang didapatkan dari daerah Desa Gasing, Tanjung Api-Api, Kecamatan Talang Kelapa Kabupaten Banyuasin, Sumatera Selatan.
2. Bahan campuran yang digunakan pada penelitian adalah limbah pabrik kertas yang dihasilkan dari pabrik kertas PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper.
3. Variasi nilai campuran abu limbah pabrik kertas untuk tanah lempung ekspansif sebesar 2%, 4%, 6%, 8% dan 10% dari berat kering tanah.
4. Campuran tanah lempung ekspansif dilakukan perawatan selama 0 hari, 3 hari dan 7 hari.
5. Pengujian yang akan dilakukan, yaitu pengujian *california bearing ratio* (CBR) *soaked* yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

1.5. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada proposal laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan permasalahan, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian dan sistematika penulisan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan mengenai berbagai kajian literatur mengenai teori, temuan dan penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi acuan untuk melaksanakan penelitian ini.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menguraikan tentang perencanaan penelitian dan prosedur penelitian yang akan dilakukan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan mengenai hasil-hasil pengujian yang telah dilakukan dan pembahasan dari hasil pengujian tersebut.

5. PENUTUP

Bab ini terdiri dari kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan.

6. DAFTAR PUSTAKA

Pada bab ini terdiri dari referensi sumber-sumber yang digunakan selama penelitian berlangsung.

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 kN/m² pada perawatan 28 hari untuk jenis tanah pertama, sedangkan untuk jenis tanah kedua mempunyai nilai maksimum 349,5 kN/m². 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).

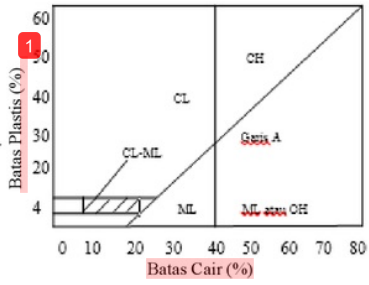
- d. Untuk persentase butiran tanah yang lolos saringan nomor 200 di antara 5 sampai 12%, tanah akan mempunyai simbol sebanyak dua dan mempunyai sifat keplastisan (GW-GM, SW-SM, dan sebagainya).
 - e. Sedangkan untuk persentase butiran tanah yang lolos saringan nomor 200 lebih besar dari 12%, maka diperlukan 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.

6
Tabel 2.1. Klasifikasi tanah sistem USCS

Tanah berbutir kasar kasar $\geq 50\%$ butiran terhalus 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 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 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
		SP	Pasir bergradasi buruk, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	
		SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	
	Pasir dengan Butiran halus	SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI > 7$
			ML	
		CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (<i>lean clays</i>)	
Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	Lanau dan lempung batas cair $\leq 50\%$	OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	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.
		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		
Lanau dan lempung batas cair $\geq 50\%$	MH	ML	Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis	Garis A : $PI = 0,73 (LL - 20)$
		CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (<i>fat clays</i>)	
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	OH	PT	Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488
		PT	Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	

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

6
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.



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 $PL < 30$.

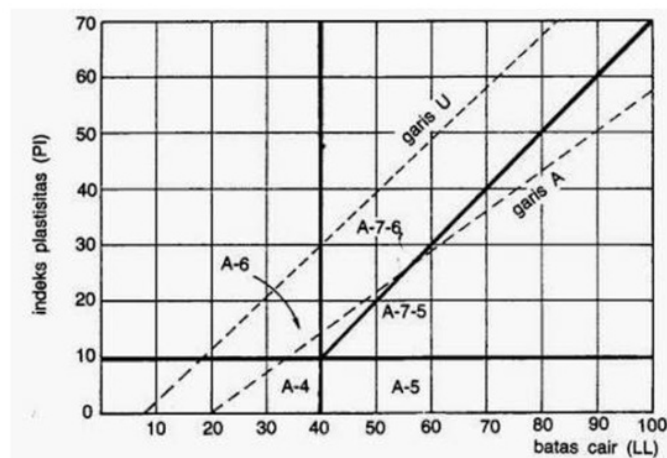
Tabel 2.2. ¹ **Klasifikasi tanah sistem AASHTO** (*American Association of State Highway and Transportation Official*)

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)	¹ 6 max	6 max	N.P.	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min
Index plastis (PI)			⁵ 0	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
Indeks Kelompok (G)	0		0	0		4 maks		8 maks	12 maks	16 maks	20 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



¹ 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 (gr.det/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 (Å). 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 permukaan 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 penjalaran 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 ² 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. Mikroorganismenya 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 *recaustisizing plant*.
 - d. Ash atau abu sisa pembakaran.
 - e. Pasir bekas dari power boiler.

¹ 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

² 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 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. ¹ Kandungan yang terdapat pada limbah pabrik kertas menunjukkan adanya potensi pemanfaatan tersebut, seperti kandungan silikat, aluminium, 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 ¹	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 cair 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.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Umum

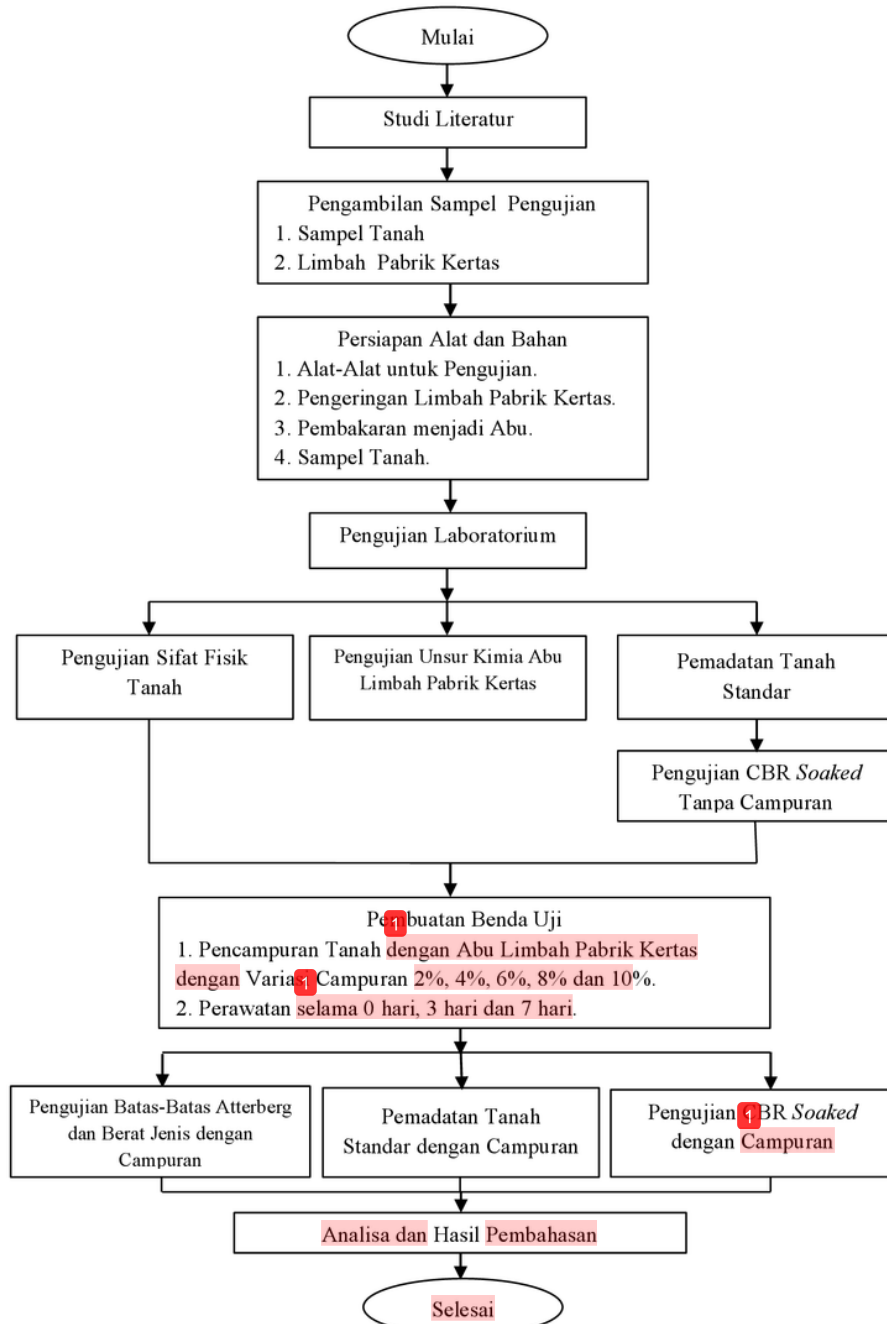
Penelitian ini akan dilakukan dengan metode laboratorium. Tahap awal dalam penelitian ini adalah mencari literatur yang berhubungan dengan stabilisasi tanah lempung ekspansif menggunakan campuran abu limbah pabrik kertas dari berbagai sumber sehingga literatur tersebut dapat digunakan sebagai referensi. Setelah itu, tahap yang dilakukan berupa pengambilan sampel tanah dan limbah pabrik kertas. Pengambilan sampel tanah berlokasi di daerah Tanjung Api-Api, Desa Gasing, Kabupaten Banyuasin Sumatera Selatan, sedangkan limbah pabrik kertas berada di PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper yang beralamat di Desa Niru, Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. Dari pengambilan sampel tersebut, dilakukan pengujian sifat fisik tanah. Pada tahap selanjutnya merupakan persiapan untuk bahan campuran stabilisasi tanah. Limbah pabrik kertas dibentuk menjadi abu dengan cara dikeringkan terlebih dahulu dan setelah itu dibakar sampai menjadi abu.

Tahap selanjutnya untuk penelitian ini merupakan pencampuran sampel tanah lempung ekspansif dengan bahan campuran limbah pabrik kertas. Variasi pencampuran untuk abu limbah pabrik kertas sebanyak lima variasi dengan nilai sebesar 2%, 4%, 6%, 8% dan 10% dari berat tanah. Jika pencampuran telah selesai, maka dilakukan pengujian CBR tanah soaked. Pengujian CBR soaked ini mempunyai masa perawatan yang dimulai dari 0 hari, 3 hari, dan 7 hari. Tahap-tahap metodologi penelitian yang disajikan dalam bentuk diagram alir digambarkan pada gambar 3.1.

3.2. Studi Literatur

Studi literatur adalah tahap awal terhadap penentuan tema dari suatu penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur dapat juga digunakan untuk sumber referensi dan acuan selama pelaksanaan penelitian sehingga telah mendapatkan gambaran mengenai analisa penelitian. Pada penelitian ini, studi literatur yang digunakan berasal dari buku-buku mekanika tanah, jurnal-jurnal yang

berhubungan dengan stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan pengujian CBR *soaked*, dan buku petunjuk praktikum laboratorium.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.3. Pengambilan Sampel Pengujian

Pengambilan sampel untuk pengujian terdiri dari pengambilan sampel tanah dan bahan campuran stabilisasi tanah. Pengambilan sampel tanah terletak di daerah Desa Gasing, Tanjung Api-Api, Kecamatan Talang Kelapa Kabupaten Banyuasin, Sumatera Selatan. Tanah yang digunakan merupakan tanah terganggu dengan kedalaman tertentu. Sedangkan untuk pengambilan bahan campuran stabilisasi tanah berupa limbah pabrik kertas yang didapatkan dari PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper.



(a)



(b)

Gambar 3.2. Pengambilan sampel tanah dan bahan campuran (a). Sampel tanah (b). Limbah pabrik kertas

3.4. Persiapan Alat dan Bahan Pengujian

Pada tahap ini melakukan persiapan alat-alat pengujian, bahan campuran, dan sampel tanah. Bahan campuran yang digunakan berupa limbah pabrik kertas dengan jenis *solid waste*. *Solid waste* yang berupa sludge dari pengolahan limbah primer dan sekunder dan limbah padat potongan kayu. Sebelum dilakukan pencampuran, limbah tersebut dikeringkan sampai keadaan kering permukaan. Selanjutnya, limbah tersebut dilakukan pembakaran hingga berbentuk abu. Pembakaran dilakukan dengan suhu 550°C selama ± 2 jam berdasarkan dengan

prinsip analisa kadar abu (ASTM D 2974-87). ¹ Pembakaran limbah pabrik kertas dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Sriwijaya Palembang. Setelah berbentuk abu, abu limbah pabrik kertas tersebut dilakukan penyaringan agar abu yang dihasilkan lebih halus.



(a)



(b)



(c)

¹ Gambar 3.3. Persiapan bahan campuran abu limbah pabrik kertas (a).
Pengeringan limbah pabrik kertas (b). Proses pembakaran limbah pabrik kertas (c) Proses penyaringan abu limbah pabrik kertas

Bahan yang perlu disiapkan selanjutnya adalah sampel tanah untuk pengujian, baik pengujian sifat fisik tanah maupun pengujian pemadatan tanah standar. Sampel tanah untuk pengujian pemadatan tanah standar merupakan tanah yang lolos saringan No. 4. Sebelum dilakukan penyaringan, tanah tersebut dikeringkan dengan cara dijemur, setelah itu dihancurkan gumpalan tanahnya dengan menggunakan palu karet.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.4. Persiapan sampel tanah (a). Pengeringan sampel tanah (b)
Penghancuran gumpalan tanah (c) Penyaringan tanah dengan saringan No. 04

3.5. Pengujian Laboratorium

Berikut merupakan tahap-tahap pengujian yang akan dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya dari mulai persiapan sampai pengujian siap dilakukan.

3.5.1. Pengujian Sifat Fisik Tanah

Pengujian sifat fisik tanah dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Sriwijaya. Pengujian tersebut terdiri dari pengujian berat jenis, pengujian analisa butiran tanah, dan pengujian batas-batas *atterberg*. Pengujian sifat fisik tanah bertujuan untuk mengetahui data-data sifat fisik tanah dan klasifikasi tanah tersebut.

Tabel 3.1. Standar ASTM pengujian sifat fisik tanah.

No	Pengujian	Standar
1	Berat Jenis Tanah	ASTM D 854-23
2	Analisa Butiran Tanah	ASTM D 422-72
3	Kadar Air Tanah	ASTM D 2216-80

a) Berat jenis tanah

Pengujian berat jenis ini mempunyai tujuan untuk mengetahui berat jenis dari tanah asli dan sebagai garis zero air void (ZAV) terhadap pengujian pemadatan tanah standar. Berat jenis adalah perbandingan berat butir tanah dengan berat air suling dengan isi yang sama pada suhu tertentu.



(a)



(b)

Gambar 3.5. Pengujian berat jenis tanah (a). Alat dan bahan pengujian berat jenis tanah (b). Proses pengujian berat jenis tanah

b) Analisa butiran tanah

Pengujian analisa butiran tanah ini terdiri dari ¹ analisa butiran tanah mekanikal dan analisa butiran tanah hydrometer. Analisa butiran tanah secara mekanikal adalah pengujian yang menggunakan suatu alat ayakan dengan tujuan untuk mengetahui pembagian butiran agregat halus dan agregat kasar. Pada penelitian ini, analisa butiran tanah secara mekanikal dilakukan dengan cara basah. Sedangkan, analisa butiran tanah secara hydrometer merupakan pengujian yang mempunyai tujuan dalam penentuan ukuran butiran terhadap sampel tanah yang lolos saringan No. 200.



Gambar 3.6. Pengujian analisa butiran tanah

c) ⁷ Pengujian batas-batas *atterberg*

1) ¹ Batas plastis

Pengujian ¹ batas plastis adalah pengujian dengan cara menggiling tanah dengan menggunakan tangan sampai tanah tersebut berdiameter 3 mm dan tanah tersebut retak. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan batas kadar air dari tanah yang mempunyai sifat plastis.

2) ¹ Batas cair

Pengujian ¹ batas cair adalah pengujian yang bertujuan untuk menentukan kadar air dimana tanah tersebut mulai menunjukkan sebagai benda alir.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.7. Pengujian batas-batas *atterberg* (a). Alat dan bahan ¹ pengujian *batas-batas atterberg* (b). Proses ¹ pengujian batas plastis (c). Proses pengujian batas cair

3.5.2. Pengujian Unsur Kimia Abu Limbah Pabrik Kertas

Bahan campuran dari stabilisasi tanah yang berupa abu limbah pabrik kertas akan dilakukan pengujian unsur-unsur kimia. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui kandungan silika, kalsium, natrium dan lainnya yang terdapat pada abu limbah pabrik kertas. Pengujian unsur kimia ini dilakukan setelah limbah pabrik kertas diubah menjadi abu. Limbah pabrik kertas dilakukan pengeringan di bawah sinar matahari. Setelah itu, dilakukan pembakaran sampai berubah menjadi abu. Jika telah berbentuk abu, maka abu limbah pabrik kertas tersebut dapat dibawa secukupnya ke tempat pengujian untuk dilakukan pengujian oleh pihak analis. Pengujian ini akan dilakukan di Baristand Industri Palembang (Balai Riset dan Standarisasi Industri Palembang). Hasil dari pengujian unsur kimia ini dapat diambil setelah kurang lebih 15 hari kerja, karena mengingat banyaknya sampel yang terdapat pada Balai Riset dan Standarisasi Industri Palembang tersebut.

3.5.3. Pengujian Pemadatan Tanah Standar

Pengujian pemadatan tanah adalah salah satu pengujian mekanis tanah yang dilakukan di laboratorium dengan standar ASTM D 698. Pengujian ini dilakukan dengan cara memadatkan tanah di dalam cetakan silinder dengan alat penumbuk dan tinggi jatuh tertentu serta energi tumbukan. Setelah pengujian selesai dilakukan, hasil tersebut akan disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara berat volume tanah kering dan kadar air. Grafik tersebut akan menghasilkan nilai berat volume kering maksimum dan nilai kadar air optimum. Nilai kadar air optimum tersebut akan digunakan pada pengujian *california bearing ratio* (CBR) *soaked*. Dalam grafik pemadatan tanah standar juga akan terdapat garis *zero air void* (ZAV). *Zero air void* (ZAV) adalah suatu keadaan tanah yang dalam kondisi sangat padat sehingga kadar udara di dalam pori tanah (*void*) adalah nol (*zero*).



(a)

Gambar 3.9. Alat dan bahan pengujian pemadatan tanah standar

3.5.4. Pengujian California Bearing Ratio (CBR) Soaked Tanpa Campuran

Pengujian *california bearing ratio (CBR)* adalah salah satu pengujian pemadatan yang dapat dilakukan di laboratorium dengan standar ASTM D 1883. Pengujian CBR laboratorium terdiri dari dua jenis, yaitu tak terendam (*Unsoaked*) dan terendam (*Soaked*). Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian CBR *soaked*. Pengujian CBR *soaked* pada tahap ini dilakukan tanpa bahan campuran. Hasil dari pengujian CBR *soaked* berupa nilai CBR pada penetrasi 0,1" dan nilai CBR pada penetrasi 0,2" dalam persen, dan faktor pengembangan dalam persen. Nilai CBR didapat dari perbandingan antara beban penetrasi suatu bahan dengan beban standar dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Sedangkan, faktor pengembangan dihasilkan dari perbandingan perubahan tinggi selama perendaman terhadap tinggi benda uji semula yang dinyatakan dalam persen.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3.10. Pengujian CBR soaked tanpa campuran (a). Alat dan bahan pengujian california bearing ratio (CBR) *soaked* (b). Proses pemadatan tanah standar dengan cetakan CBR (c). Proses perendaman pengujian CBR *soaked* (d). Proses pengujian CBR *soaked* tanpa campuran

3.6. Pengujian Batas-Batas Atterberg dan Berat Jenis dengan Campuran

Pengujian batas-batas atterberg dan berat jenis dengan campuran ini merupakan pengujian yang tahapannya sama dengan yang telah dilakukan pada pengujian tanah asli. Akan tetapi, sampel pengujian merupakan campuran antara tanah dengan variasi **campuran abu limbah pabrik kertas**. Pada **pengujian** batas-batas atterberg bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan abu limbah pabrik kertas terhadap nilai kembang susut pada tanah. Sedangkan, untuk pengujian berat jenis digunakan untuk garis zero air void (ZAV) pada pemadatan tanah standar. Pada tahap ini, abu limbah pabrik kertas juga dilakukan pengujian terhadap berat jenisnya.

3.7. Pengujian Pemadatan Tanah Standar dengan Campuran

Pengujian pemadatan tanah standar dengan campuran adalah pengujian dengan memadatkan campuran tanah dengan variasi **campuran abu limbah pabrik kertas**. Hasil dari **pengujian** ini sama dengan **pengujian pemadatan tanah standar tanah asli**, yaitu nilai kadar air optimum dan berat volume kering maksimum. Nilai kadar air optimum pada pengujian ini akan digunakan untuk persentase kadar air saat pengujian CBR *soaked* dengan campuran.

3.8. Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dilakukan untuk pengujian CBR *soaked* dengan campuran. Pembuatan benda uji dilakukan dengan pencampuran antara tanah dengan **abu limbah pabrik kertas**. Campuran sebesar 2%, 4%, 6%, 8% dan 10% dari berat tanah dan masa perawatan **selama 0 hari, 3 hari, dan 7 hari**. Berikut tahap-tahap dari pembuatan benda uji:

1. Persiapan tanah yang akan digunakan. Tanah yang digunakan adalah tanah yang lolos saringan No. 4 sehingga perlu dilakukan penghancuran sampel tanah menggunakan palu karet.



Gambar 3.11. Penghancuran sampel tanah

2. Tanah yang lolos saringan No. 4 ¹ dicampur dengan abu limbah pabrik kertas dengan persentase campuran 2%, 4%, 6%, 8% dan 10% dari berat tanah.



Gambar 3.12. Pencampuran dengan abu limbah pabrik kertas

3. Campur bahan yang ¹ telah dibuat sebelumnya dengan air. Air yang dicampurkan sebesar kadar air optimum yang didapat dari pengujian pepadatan tanah standar.



Gambar 3.13. Pencampuran dengan air

4. Campuran tanah tersebut dimasukkan ke dalam suatu kantung plastik. Kantung plastik tersebut di ikat dan diberi penomoran. Pemberian nomor dilakukan agar sampel tanah tidak tertukar.



Gambar 3.14. Pemberian nomor sampel tanah

5. Campuran tanah juga diperam selama kurang lebih 24 jam sehingga air benar merata.



Gambar 3.15. Proses pemeraman selama 24 jam

6. Jika telah selesai, maka sampel tanah dilakukan pemadatan di dalam cetakan sesuai dengan prosedur pengujian pemadatan tanah standar.



Gambar 3.16. Pemadatan tanah standar dalam cetakan CBR

7. Benda uji tersebut dilakukan perawatan dengan masa 0 hari, 3 hari, dan 7 hari.



Gambar 3.17. Perawatan benda uji

8. Untuk CBR *soaked*, cetakan dan beban dilakukan perendaman selama 4 hari.



Gambar 3.18. Perendaman selama 4 hari

Berikut merupakan penjabaran persentase sampel tanah dan variasi campuran limbah padat pabrik kertas yang akan digunakan pada penelitian ini, yaitu:

Berat sampel tanah sebesar 5000 gram

LPK adalah abu limbah pabrik kertas

- a) Campuran 2% abu limbah pabrik kertas (LPK)
- $$\begin{aligned} \text{Berat LPK} &= 2\% \times \text{berat kering tanah} \\ &= 2\% \times 5000 \text{ gram} \\ &= 100 \text{ gram} \\ \text{Berat Tanah} &= \text{berat kering tanah} - \text{berat LPK} \\ &= 5000 \text{ gram} - 100 \text{ gram} \\ &= 4900 \text{ gram} \end{aligned}$$
- 1
- Campuran 4% abu limbah pabrik kertas
- $$\begin{aligned} \text{Berat LPK} &= 4\% \times \text{berat kering tanah} \\ &= 4\% \times 5000 \text{ gram} \\ &= 200 \text{ gram} \\ \text{Berat Tanah} &= \text{berat kering tanah} - \text{berat LPK} \\ &= 5000 \text{ gram} - 200 \text{ gram} \\ &= 4800 \text{ gram} \end{aligned}$$
- 1
- b) Campuran 6% abu limbah pabrik kertas
- $$\begin{aligned} \text{Berat LPK} &= 6\% \times \text{berat kering tanah} \\ &= 6\% \times 5000 \text{ gram} \\ &= 300 \text{ gram} \\ \text{Berat Tanah} &= \text{berat kering tanah} - \text{berat LPK} \\ &= 5000 \text{ gram} - 300 \text{ gram} \\ &= 4700 \text{ gram} \end{aligned}$$
- 1
- c) Campuran 8% abu limbah pabrik kertas
- $$\begin{aligned} \text{Berat LPK} &= 8\% \times \text{berat kering tanah} \\ &= 8\% \times 5000 \text{ gram} \\ &= 400 \text{ gram} \\ \text{Berat Tanah} &= \text{berat kering tanah} - \text{berat LPK} \\ &= 5000 \text{ gram} - 400 \text{ gram} \\ &= 4600 \text{ gram} \end{aligned}$$
- d) Campuran 10% abu limbah pabrik kertas
- $$\begin{aligned} \text{Berat LPK} &= 10\% \times \text{berat kering tanah} \\ &= 10\% \times 5000 \text{ gram} \\ &= 500 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Tanah} &= \text{berat kering tanah} - \text{berat LPK} \\
 &= 5000 \text{ gram} - 500 \text{ gram} \\
 &= 4500 \text{ gram}
 \end{aligned}$$

Tabel 3.2. Jumlah Sampel Benda Uji

No	Variasi Campuran	Kode	Masa Perawatan			Jumlah Benda Uji
			0 hari	3hari	7 hari	
1	0 % LPK + 100% Tanah	LPK0	2	-	-	2
2	2% LPK + 98% Tanah	LPK2	2	2	2	6
3	4% LPK + 96% Tanah	LPK4	2	2	2	6
4	6% LPK + 94% Tanah	LPK6	2	2	2	6
5	8% LPK + 92% Tanah	LPK8	2	2	2	6
6	10% LPK + 90% Tanah	LPK10	2	2	2	6
Jumlah						32

3.9. Pengujian CBR *Soaked* dengan Campuran

Pada tahap ini, pengujian CBR *soaked* dilakukan dengan menambahkan ¹abu limbah pabrik kertas dengan variasi campuran sebesar 2%, 4%, 6%, 8% dan 10% dari berat tanah. Setelah dilakukan pencampuran, juga dilakukan perawatan selama 0 hari, 3 hari, dan 7 hari. Hasil dari pengujian CBR soaked dengan bahan campuran ini sama seperti tanpa campuran, yaitu nilai CBR pada penetrasi 0,1", nilai CBR pada penetrasi 0,2" dalam persen dan, faktor pengembangan dalam persen.

Gambar 3.19. Pengujian CBR *soaked* dengan campuran

3.10. Analisa dan Hasil Pembahasan

Analisa dan hasil pembahasan dilakukan setelah semua tahapan pengujian laboratorium selesai dilakukan. Hasil yang akan dilakukan analisa berasal dari setiap pengujian, yaitu nilai sifat fisik tanah asli, unsur kimia abu limbah pabrik kertas, nilai batas-batas atterberg dengan campuran, nilai berat jenis dengan campuran, hasil pengujian pemadatan tanah standar dengan campuran, nilai CBR *soaked* pada tanah lempung ekspansif sebelum dan setelah dilakukan pencampuran abu limbah pabrik kertas juga masa perawatan, dan faktor pengembangan yang dihasilkan dari pengujian CBR *soaked*.

BAB 4

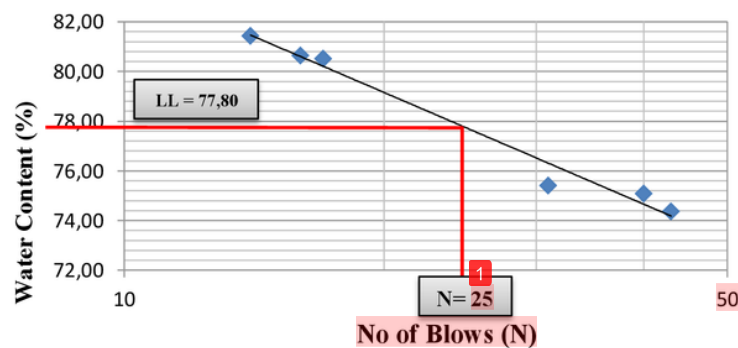
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian sifat fisik tanah

Pengujian sifat fisik tanah merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat fisik tanah dan mengklasifikasikan jenis tanah tersebut. Pengujian ini terdiri dari pengujian batas-batas atterberg, pengujian analisa saringan, dan pengujian berat jenis. Sampel tanah yang akan dilakukan pengujian berasal dari daerah Desa Gasing, Tanjung Api-Api, Kecamatan Talang Kelapa, Kabupaten Banyuwasin, Sumatera Selatan. Berikut merupakan hasil dari setiap pengujian sifat fisik tanah asli, yaitu:

a) Pengujian batas-batas atterberg

Pengujian batas-batas atterberg terdiri dari pengujian batas cair dan pengujian batas plastis. Hasil pengujian dari kedua pengujian tersebut akan digunakan untuk menghitung nilai indeks plastisitas (PI). Hasil pengujian batas cair didapatkan nilai sebesar 77,80%, sedangkan pengujian batas plastis menghasilkan nilai 37,17%. Dari hasil pengujian batas cair dan batas plastis didapatkan nilai indeks plastisitas (PI) sebesar 40,63%. Nilai indeks plastisitas dari tanah asli tersebut dapat dikategorikan mempunyai potensi perubahan volume yang sangat tinggi. Hasil pengujian dari batas cair terdapat pada gambar 4.1. dan secara lebih lengkap hasil pengujian batas-batas atterberg dilampirkan pada lampiran 2.

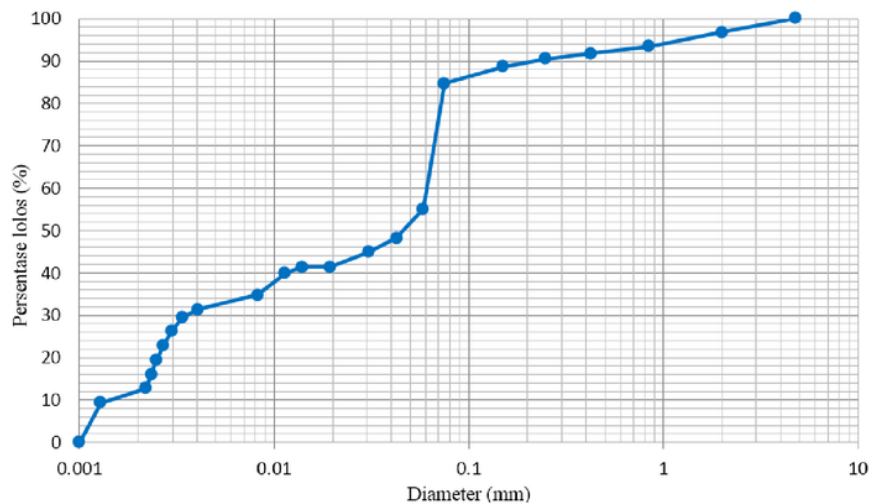


Gambar 4.1. Grafik pengujian batas cair

Pada gambar 4.1. diatas menunjukkan bahwa pada pukulan ke 25 menghasilkan nilai batas cair (LL) sebesar 77,80%. Nilai tersebut dapat dikategorikan sebagai tanah dengan kembang susut yang sangat tinggi.

b) Pengujian analisa butiran tanah

Pengujian analisa butiran tanah terbagi menjadi analisa butiran tanah mekanikal dan analisa butiran tanah hydrometer. Hasil pengujian analisa butiran tanah mekanikal didapatkan tanah yang lolos saringan No. 40 sebesar 91,74%. Sedangkan, untuk tanah yang lolos saringan No. 200 sebesar 84,7%. Grafik hasil analisa butiran tanah baik secara mekanikal maupun hydrometer ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Grafik analisa butiran tanah

c) Pengujian berat jenis

Pengujian berat jenis tanah dimaksudkan untuk mengetahui berat jenis dari butiran tanah. Pada pengujian ini didapatkan nilai berat jenis tanah asli sebesar 2,666. Nilai berat jenis dari tanah tersebut menunjukkan bahwa tanah asli merupakan jenis tanah lempung. Hasil dari pengujian berat jenis tanah asli terdapat pada lampiran 2.

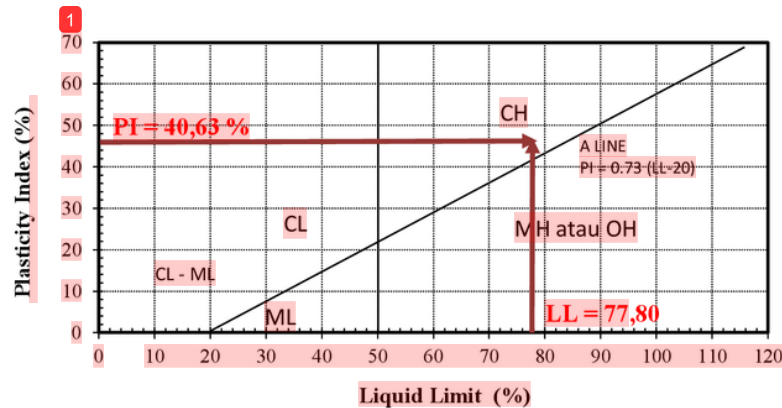
4.2. Sistem klasifikasi tanah

Sistem klasifikasi tanah merupakan sistem yang digunakan untuk mengelompokkan tanah-tanah berdasarkan dengan perilaku umum dari tanah tersebut pada suatu kondisi fisis tertentu. Sistem klasifikasi tanah yang umumnya digunakan terdiri dari klasifikasi sistem USCS dan klasifikasi sistem AASHTO.

4.2.1. Klasifikasi sistem USCS

Klasifikasi sistem USCS merupakan sistem yang mengelompokkan jenis tanah berdasarkan oleh ukuran butir dan gradasi butirannya. Faktor-faktor yang harus diperhatikan dalam klasifikasi tanah pada sistem ini, yaitu persentase butiran yang lolos saringan No. 200, persentase fraksi kasar yang lolos saringan No. 40, koefisien keseragaman dan gradasi (C_u dan C_c) untuk tanah 0-12% lolos saringan No. 200, dan batas cair serta indeks plastisitas untuk tanah lolos saringan No. 40.

Hasil pengujian yang lolos saringan No. 200 dari pengujian sebelumnya didapatkan bahwa $>50\%$ sebesar 84,7%. Dari hasil tersebut dinyatakan tanah merupakan lanau atau lempung. Tahap berikutnya merupakan hasil dari pengujian batas cair. Nilai dari pengujian batas cair sebesar $>50\%$ yaitu 77,80%. Setelah itu, klasifikasi tanah dapat dilanjutkan berdasarkan dari gambar 4.1. Parameter yang digunakan pada gambar 4.1. merupakan indeks plastisitas dan batas cair. Nilai indeks plastisitas dan batas cair dari pengujian batas-batas atterberg sebesar 40,63% dan 77,80%. Kedua nilai dari parameter tersebut dimasukkan ke dalam grafik dan didapatkan hasil bahwa tanah asli merupakan jenis tanah CH. Jenis tanah CH adalah tanah lempung organik dengan plastisitas yang tinggi atau lempung gemuk. Berikut merupakan grafik klasifikasi tanah dengan sistem USCS sebagai berikut:



Gambar 4.3. Grafik klasifikasi tanah sistem USCS

6

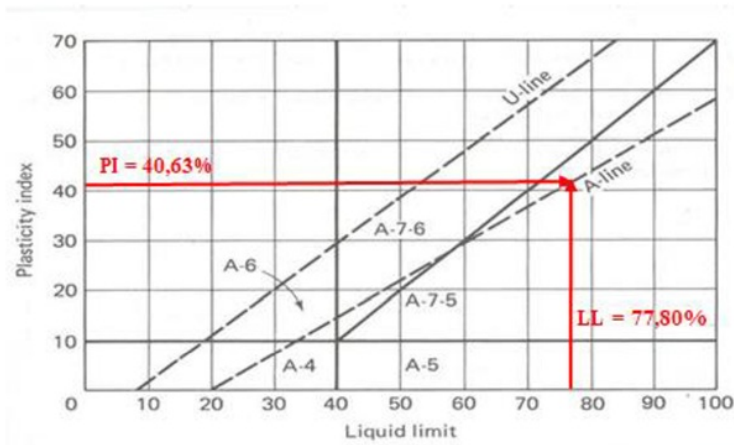
4.2.2. Klasifikasi sistem AASHTO

Klasifikasi sistem AASHTO adalah sistem yang mengklasifikasikan tanah menjadi delapan kelompok. Delapan kelompok tersebut, yaitu A-1 sampai A-8. Tahapan penggolongan klasifikasi sistem AASHTO adalah dengan menggunakan data-data hasil pengujian sebelumnya yang dicocokkan dengan parameter yang terdapat pada tabel 4.1 yang dimulai dari bagian kiri ke bagian kanan. Parameter yang ditinjau adalah tanah yang lolos saringan No. 10, No. 40, No.200, nilai batas cair dan nilai indeks plastisitas (PI). Parameter yang cocok berdasarkan hasil klasifikasi tanah sistem AASHTO adalah tanah yang lolos saringan No. 200 sebesar 84,70% dengan syarat minimal 36%. Selain itu, nilai batas cair yang sebesar 77,80% yang mempunyai syarat minimal 41% dan nilai indeks plastisitas yaitu sebesar 40,63% dengan minimal 11%. Hasil klasifikasi tanah sistem AASHTO didapatkan bahwa parameter yang cocok terdapat pada kelompok A-7. Kelompok A-7 merupakan tanah dengan jenis lanau-lempung. Berikut merupakan hasil pengklasifikasian sistem AASHTO berdasarkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil klasifikasi tanah sistem AASHTO

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)	1 6 max	6 max	N.P.	40 max 10 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min 11 min
Index plastis (PI)					10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	
Indeks Kelompok (G)	0	0	0	0			4 maks	8 maks	12 maks	16 maks	20 maks
Type 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				

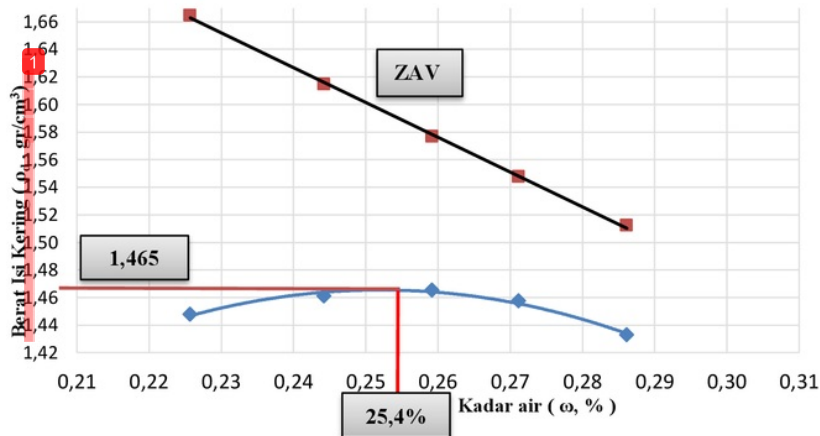
Berdasarkan hasil klasifikasi sistem AASHTO untuk tanah yang termasuk pada kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7. Kelompok tersebut diklasifikasikan kembali menggunakan grafik pada gambar 4.4. Hasil klasifikasi sebelumnya menunjukkan bahwa tanah termasuk pada kelompok A-7 sehingga tahapan klasifikasi tanah dilanjutkan gambar 4.4. Parameter yang digunakan pada grafik tersebut merupakan nilai batas cair dengan nilai 77,80% dan indeks plastisitas sebesar 40,63%. Kedua nilai tersebut di plot pada grafik dan menunjukkan hasil bahwa tanah asli berdasarkan klasifikasi sistem AASHTO termasuk pada kelompok A-7-5. Hasil klasifikasi sistem AASHTO lanjutan berdasarkan grafik ditunjukkan pada gambar 4.4. sebagai berikut:



Gambar 4.4. Grafik klasifikasi tanah sistem AASHTO

4.3. Pengujian pemadatan tanah standar

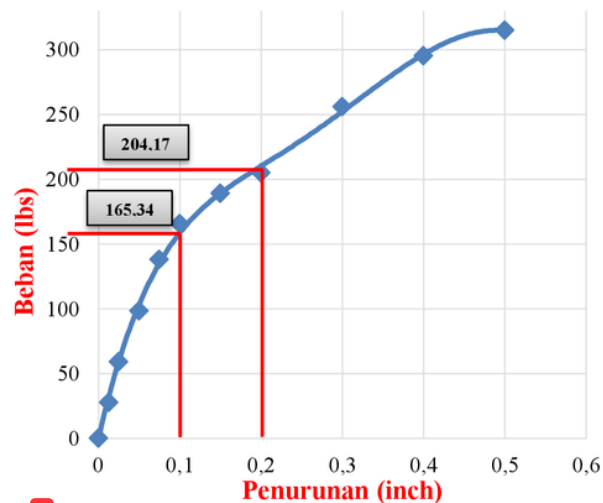
Pengujian pemadatan tanah standar adalah pengujian yang mempunyai tujuan untuk mendapatkan nilai kadar air optimum dan berat volume kering maksimum pada tanah. Hasil dari pengujian pemadatan tanah standar pada tanah asli menghasilkan nilai kadar air optimum tanah asli sebesar 25,4% dan nilai berat volume kering sebesar 1,465 gr/cm^3 . Grafik dari pengujian pemadatan tanah standar pada tanah asli terdapat pada gambar 4.5. dan hasil lengkap dari pengujian pemadatan tanah standar pada tanah asli dilampirkan pada lampiran 4.



Gambar 4.5. Grafik pengujian pemadatan tanah standar

4.4. Pengujian CBR *soaked* tanpa campuran

Pengujian CBR *soaked* merupakan pengujian untuk menentukan nilai CBR dan pengembangan volume pada tanah tersebut. Nilai CBR adalah nilai perbandingan antara beban penetrasi suatu bahan terhadap bahan standard dengan kedalaman dan kecepatan penetrasi yang sama. Sedangkan, nilai pengembangan volume didapatkan dari hasil perbandingan antara perubahan tinggi selama perendaman terhadap tinggi benda uji semula. Hasil pengujian CBR *soaked* tanpa campuran didapatkan sebesar 5,51% dan nilai pengembangan volume sebesar 1,99%. Grafik dari hasil pengujian ditunjukkan pada gambar 4.5. serta hasil pengujian CBR *soaked* tanpa campuran dilampirkan pada lampiran 5.



1
Gambar 4.6. Grafik pengujian CBR *soaked* tanah asli

Hasil dari pengujian CBR *soaked* tanpa campuran di atas menunjukkan bahwa tanah asli termasuk dalam kategori tandus (*poor to fair*), yaitu sebesar 5,51%. Nilai CBR dapat dikategorikan sebagai jenis tandus jika nilai CBR 3% - 7%, sedangkan untuk kategori sangat tandus (*very poor*) mempunyai nilai CBR 0% - 3%. Oleh karena itu, dari hasil nilai CBR *soaked* tanah asli tersebut sampel tanah perlu dilakukan perbaikan.

1 Tabel 4.2. Rekapitulasi hasil pengujian tanah asli

1 No.	Identifikasi tanah	Hasil pengujian
1	Berat jenis tanah (G_s)	2,666
2	Batas cair (LL)	77,80%
3	Batas plastis (PL)	37,17%
4	Indeks plastisitas (IP)	40,63%
5	Tanah lolos saringan No.40 (<0,425 mm)	91,74%
6	Tanah lolos saringan No.200 (<0,075 mm)	84,70%
7	Klasifikasi tanah menurut AASHTO	A-7-5
8	Klasifikasi tanah menurut USCS	CH
9	Kadar air optimum (w_{opt})	25,4%
10	Berat volume kering maksimum (ρ_d maks)	1,465 gr/cm ³
11	California bearing ratio (CBR) soaked	5,51%
12	Nilai pengembangan	1,99%

1 4.5. Pengujian unsur kimia abu limbah pabrik kertas

Pengujian unsur kimia ini dimaksudkan untuk mengetahui kandungan unsur kimia seperti silika, kalsium, dan lainnya yang terdapat pada abu limbah pabrik kertas. Pengujian ini dilakukan di Baristand Industri Palembang (Balai Riset dan Standarisasi Industri Palembang). Metode uji yang dilakukan untuk mengetahui unsur kimia berupa silika (SiO_2) adalah gravimetri. Sedangkan unsur kimia Ca, MgO, dan Fe berupa metode AAS. Hasil pengujian unsur kimia abu limbah pabrik kertas (tabel 4.3.)

Tabel 4.3. Hasil pengujian unsur kimia ¹ abu limbah pabrik kertas

Unsur Kimia	Persentase
MgO	0,93%
Silica (SiO ₂)	0,86%
Fe	0,30%
Ca	0,12%

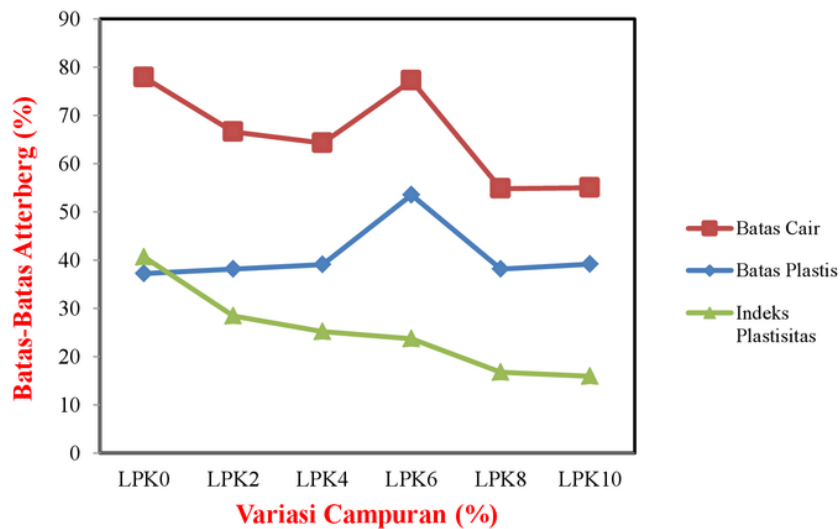
Hasil pengujian di atas menunjukkan bahwa persentase ¹ kandungan yang terbesar pada abu limbah pabrik kertas tersebut adalah MgO. Kandungan MgO ¹ pada abu limbah pabrik kertas yang sebesar 0,930%. Sedangkan persentase terbesar selanjutnya yaitu kandungan silika (SiO₂) yang sebesar 0,860%. Unsur silika (SiO₂) berperan sebagai unsur yang mengisi rongga-rongga dalam tanah.

4.6. Pengujian batas-batas atterberg dengan campuran

¹ Pada pengujian batas-batas atterberg ini dilakukan dengan mencampurkan abu limbah pabrik kertas dengan variasi campuran 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10%. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh abu limbah pabrik kertas terhadap sifat kembang susut dari sampel tanah yang diuji. Nilai kembang susut dari tanah didapatkan dari nilai indeks plastisitas (IP) yang bergantung pada hasil pengujian batas cair dan pengujian batas plastis. Berikut merupakan hasil pengujian batas-batas atterberg terdapat pada tabel 4.4. dan grafik 4.7.

Tabel 4.4. Hasil pengujian batas-batas atterberg dengan campuran

No	Variasi Campuran	Batas Cair (LL) (%)	Batas Plastis (PL) (%)	Indeks Plastisitas (IP) (%)
1	LPK0	77,80	37,17	40,63
2	LPK2	66,50	38,08	28,42
3	LPK4	64,20	39,05	25,15
4	LPK6	77,20	53,49	23,71
5	LPK8	54,80	38,12	16,68
6	LPK10	55,00	39,09	15,91



Gambar 4.7. Grafik pengujian batas-batas atterberg dengan campuran

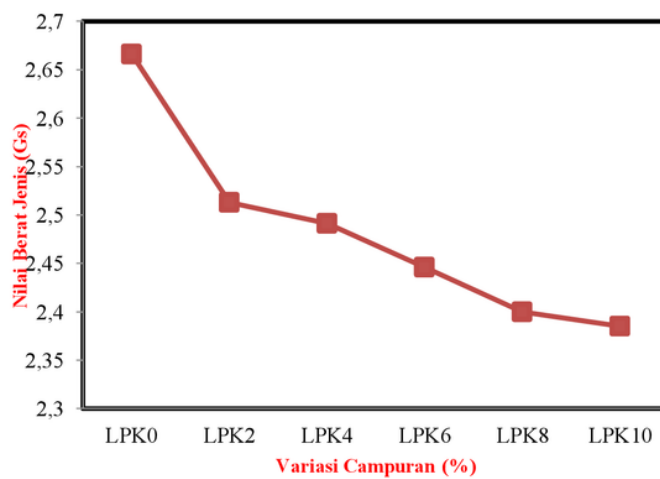
Hasil pengujian batas-batas atterberg di atas menunjukkan bahwa nilai indeks plastisitas (IP) dengan campuran abu limbah pabrik kertas mengalami penurunan dari nilai indeks plastisitas (IP) tanah asli yang sebesar 40,63%. Nilai penurunan tersebut menghasilkan bahwa semakin besar persentase campuran yang diberikan pada tanah, maka nilai indeks plastisitas semakin menurun. Nilai indeks plastisitas yang paling maksimum dari lima persentase campuran tersebut adalah sebesar 15,91% pada variasi LPK10. Nilai indeks plastisitas sebesar 15,91% tersebut dapat digolongkan pada nilai kembang susut yang rendah. Dari hasil pengujian batas-batas atterberg di atas, maka potensi perubahan volume berubah dari kategori yang sangat tinggi menjadi rendah.

4.7. Pengujian berat jenis dengan campuran

Pengujian berat jenis ini dilakukan dengan sampel yang berupa tanah dan variasi campuran abu limbah pabrik kertas. Pengujian ini dilakukan untuk menggambarkan garis *zero air void* (ZAV) terhadap pengujian pemadatan tanah standar. Hasil pengujian berat jenis dengan campuran ditunjukkan pada tabel 4.5. dan gambar 4.8.

Tabel 4.5. Hasil pengujian berat jenis dengan variasi ¹campuran

No	Variasi Campuran	Berat Jenis (%)
1	LPK2	2,513
2	LPK4	2,491
3	LPK6	2,446
4	LPK8	2,400
5	LPK10	2,385
6	Abu Limbah Pabrik Kertas	2,346



Gambar 4.8. Grafik pengujian berat jenis dengan campuran

Hasil pengujian berat jenis yang ditunjukkan pada grafik diatas menjelaskan bahwa berat jenis campuran antara tanah dan ¹abu limbah pabrik kertas mengalami penurunan. ¹Semakin banyak abu limbah pabrik kertas yang ditambahkan, maka nilai berat jenisnya semakin menurun. Ini dapat terjadi karena berat jenis ¹dari abu limbah pabrik kertas yang lebih kecil dari ¹berat jenis tanah asli. Nilai berat jenis untuk ¹abu limbah pabrik kertas sebesar 2,346 (Lampiran 2).

4.8. Pengujian pemadatan tanah standar dengan campuran

Pengujian pemadatan tanah standar dengan campuran mempunyai hasil yang sama dengan hasil pengujian pemadatan tanah standar tanah asli. Pengujian ini menghasilkan nilai kadar air optimum dan berat volume kering maksimum.

Hasil kadar air optimum digunakan sebagai kadar air untuk pengujian CBR *soaked* dengan campuran abu limbah pabrik kertas. Berikut merupakan hasil dari pengujian pemadatan tanah standar dengan campuran (tabel 4.6.)

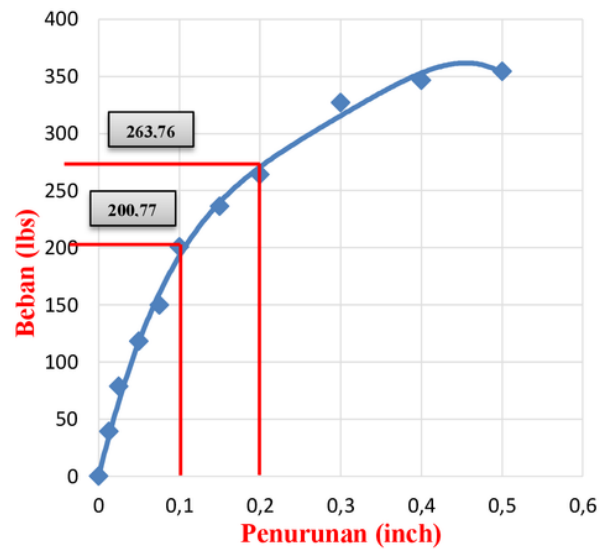
Tabel 4.6. Hasil pengujian pemadatan tanah standar dengan campuran

No	Variasi Campuran	Kadar Air Optimum (w_{opt}) (%)	Berat Volume Kering Maksimum (ρ_d maks) (gr/cm^3)
1	LPK0	25,4	1,465
2	LPK2	26,0	1,425
3	LPK4	27,2	1,378
4	LPK6	27,6	1,330
5	LPK8	28,5	1,221
6	LPK10	29,3	1,184

Hasil pengujian pemadatan tanah standar dengan campuran menunjukkan bahwa nilai kadar air optimum mengalami kenaikan dari nilai kadar air optimum tanah asli yang sebesar 25,4%. Hasil tersebut memperlihatkan semakin besar variasi campuran abu limbah pabrik kertas yang diberikan, maka semakin bertambah nilai kadar air optimum. Sedangkan untuk hasil berat volume kering berbanding terbalik dengan persentase campuran. Semakin besar variasi campuran yang diberikan, maka semakin kecil nilai berat volume kering yang dihasilkan.

4.9. Pengujian CBR soaked dengan campuran

Pengujian CBR *soaked* dengan campuran merupakan pengujian dengan menggunakan bahan campuran abu limbah pabrik kertas. Bahan campuran tersebut mempunyai lima variasi, yaitu 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% dari berat tanah. Setiap variasi campuran tersebut mempunyai masa perawatan 0 hari, 3 hari, dan 7 hari. Secara lebih lengkap, hasil dari setiap pengujian CBR *soaked* disajikan pada lampiran 10. Berikut merupakan salah satu grafik hasil pengujian CBR *soaked* dengan persentase LPK2 dan masa perawatan 3 hari terdapat di gambar 4.9.



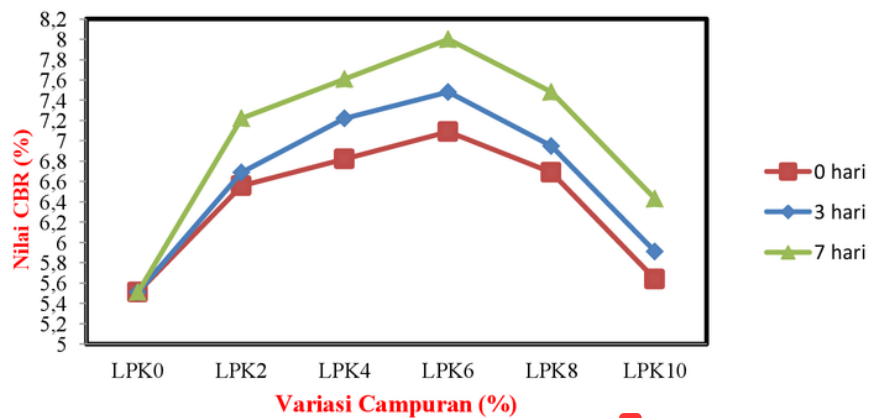
Gambar 4.9. Grafik pengujian CBR *soaked* dengan variasi campuran 2% dan masa perawatan 3 hari

Hasil pengujian CBR *soaked* pada grafik di atas, yaitu dengan persentase campuran LPK2 dan masa perawatan 3 hari didapatkan nilai sebesar 6,69%. Berdasarkan dari nilai CBR *soaked* dengan campuran tersebut, didapatkan bahwa nilai CBR tersebut mengalami kenaikan dari nilai CBR *soaked* tanah asli yang mempunyai nilai sebesar 5,51%. Secara lebih lengkap, seluruh hasil pengujian CBR *soaked* dan nilai pengembangan dengan campuran serta masa perawatan (tabel 4.7.)

Tabel 4.7. Rekapitulasi hasil nilai CBR *soaked* dan nilai pengembangan dengan variasi campuran dan masa perawatan

Variasi Campuran	Masa Perawatan (hari)	Nilai CBR <i>Soaked</i> (%)		Nilai CBR <i>Soaked</i> (%)	Nilai Pengembangan (%)
		0,1''	0,2''		
LPK0	-	5,51	4,55	5,51	1,99
LPK2	0	6,56	5,69	6,56	1,29
	3	6,69	5,86	6,69	1,00
	7	7,22	6,39	7,22	0,83
LPK4	0	6,82	5,95	6,82	1,18
	3	7,22	6,04	7,22	0,84
	7	7,61	6,21	7,61	0,46
LPK6	0	7,09	6,21	7,09	1,05
	3	7,48	6,56	7,48	0,84
	7	8,00	6,74	8,00	0,43
LPK8	0	6,69	5,95	6,69	0,88
	3	6,95	6,21	6,95	0,82
	7	7,48	6,39	7,48	0,64
LPK10	0	5,64	5,16	5,64	0,71
	3	5,91	4,81	5,91	0,50
	7	6,43	5,51	6,43	0,44

Berikut merupakan grafik hubungan antara variasi campuran dan nilai CBR *soaked* serta masa perawatan yang dilakukan pada gambar 4.10.

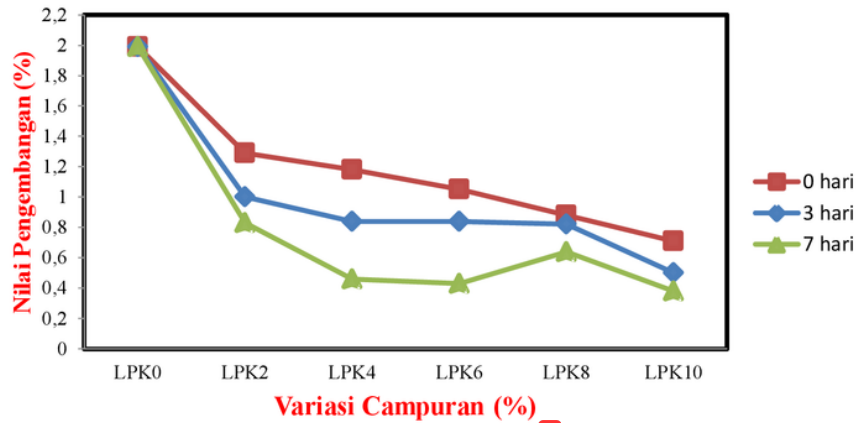


Gambar 4.10. Grafik nilai CBR *soaked* campuran dengan masa perawatan 0 hari, 3 hari, dan 7 hari

Hasil pengujian CBR *soaked* dengan campuran diatas menunjukkan bahwa abu limbah pabrik kertas dapat mempengaruhi nilai CBR *soaked*. Nilai CBR *soaked* pada setiap variasi campuran mengalami kenaikan yang relatif besar dari nilai CBR *soaked* tanah asli yaitu sebesar 5,51% setelah dicampurkan dengan abu limbah pabrik kertas. Semakin besar persentase campuran yang diberikan, maka semakin besar nilai CBR *soaked* yang dihasilkan. Dari seluruh hasil pengujian CBR *soaked* didapatkan bahwa nilai maksimum yang didapatkan sebesar 8,00% pada variasi LPK6 dan masa perawatan 7 hari. Nilai CBR *soaked* yang sebesar 8,00% dapat termasuk dalam kategori cukup baik, karena mempunyai nilai CBR di antara 7% - 20%.

Hasil pengujian CBR *soaked* berdasarkan dari masa perawatan 0 hari, 3 hari, dan 7 hari didapatkan bahwa semakin lama masa perawatan yang dilakukan juga akan mempengaruhi kenaikan nilai CBR *soaked*. Pada masa perawatan 0 hari, nilai maksimum yang dihasilkan sebesar 7,09% pada variasi LPK6. Untuk masa perawatan 3 hari, nilai CBR *soaked* maksimum pada persentase LPK6 dengan nilai sebesar 7,48%. Sedangkan perawatan 7 hari menghasilkan nilai CBR *soaked* sebesar 8,00% pada persentase campuran LPK6. Dari seluruh hasil pengujian CBR *soaked* berdasarkan masa perawatan didapatkan bahwa nilai maksimum pada variasi LPK6. Sedangkan pada persentase LPK8 dan LPK10 mengalami penurunan yang relatif kecil, yaitu kurang lebih 0,5% dari nilai CBR *soaked* 6%.

Berikut merupakan grafik hasil pengembangan dari lima variasi campuran serta masa perawatan yang dilakukan ditunjukkan pada gambar 4.11.



Gambar 4.11. Grafik hasil pengembangan volume dengan masa perawatan 0 hari, 3 hari, dan 7 hari

Hasil pengembangan volume dengan campuran didapatkan dari pengujian CBR *soaked*, yaitu selisih perubahan tinggi selama dilakukan perendaman dengan tinggi awal benda uji yang dinyatakan dalam persen. Berdasarkan dari hasil pengujian CBR *soaked* menunjukkan bahwa hasil pengembangan volume semakin mengalami penurunan setelah dicampurkan dengan abu limbah pabrik kertas. Selain dari persentase campuran, faktor yang mempengaruhi hasil pengembangan volume adalah masa perawatan. Masa perawatan yang semakin lama juga menghasilkan nilai pengembangan volume yang semakin menurun. Hasil pengembangan volume maksimum berdasarkan pada variasi campuran dan masa perawatan didapatkan nilai sebesar 0,43% yaitu pada variasi LPK6 dengan masa perawatan 7 hari.

4.10. Persentase perubahan nilai CBR *soaked*

Persentase perubahan nilai CBR *soaked* merupakan nilai perubahan yang didapat antara nilai CBR *soaked* dengan campuran abu limbah pabrik kertas dengan nilai CBR *soaked* tanpa campuran yang dinyatakan dalam persen. Persentase perubahan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

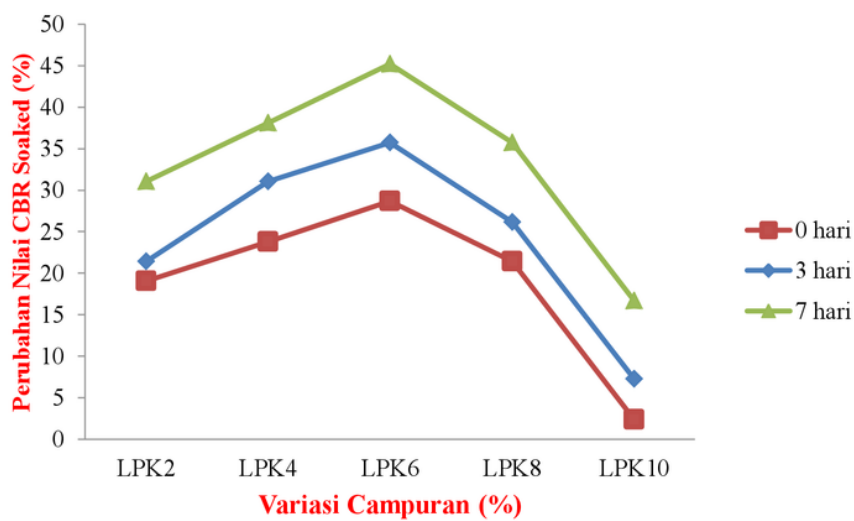
$$\text{Perubahan (\%)} = \frac{\text{Nilai CBR tanah campuran} - \text{Nilai CBR tanah asli}}{\text{Nilai CBR tanah asli}} \times 100\%$$

Berikut merupakan salah satu contoh penjabaran hasil persentase perubahan nilai CBR soaked dengan variasi campuran 2% dan masa perawatan 3 hari, yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Perubahan (\%)} &= \frac{6,82 - 5,51}{5,51} \times 100\% \\ &= 21,416\% \end{aligned}$$

Tabel 4.8. Rekapitulasi perubahan nilai CBR soaked

No	Variasi Campuran	Perubahan Nilai CBR Soaked (%)		
		Masa Perawatan		
		0 hari	3 hari	7 hari
1	LPK2	19,056	21,416	31,034
2	LPK4	23,775	31,034	38,113
3	LPK6	28,675	35,753	45,191
4	LPK8	21,416	26,134	35,753
5	LPK10	2,359	7,260	16,697



Gambar 4.12. Grafik perubahan nilai CBR soaked campuran dengan masa perawatan 0 hari, 3 hari, dan 7 hari

Dari hasil perhitungan nilai perubahan CBR soaked terhadap nilai CBR tanah asli didapatkan bahwa persentase perubahan terbesar terdapat pada variasi campuran LPK6 dan masa perawatan 7 hari. Persentase perubahan nilai CBR

soaked tersebut sebesar 45,191% dari nilai CBR *soaked* tanah asli. Sedangkan untuk nilai perubahan terkecil dihasilkan pada variasi LPK10 dengan masa perawatan 0 hari, yaitu sebesar 2,359%.

4.11. Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah dasar (DDT) adalah salah satu faktor yang digunakan pada nomogram penetapan indeks tebal perkerasan (ITP). Faktor-faktor yang mempengaruhi daya dukung tanah yaitu jenis tanah, tingkat kepadatan, kadar air, kondisi drainase, dan lain-lain. Secara analitis nilai dari daya dukung tanah dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

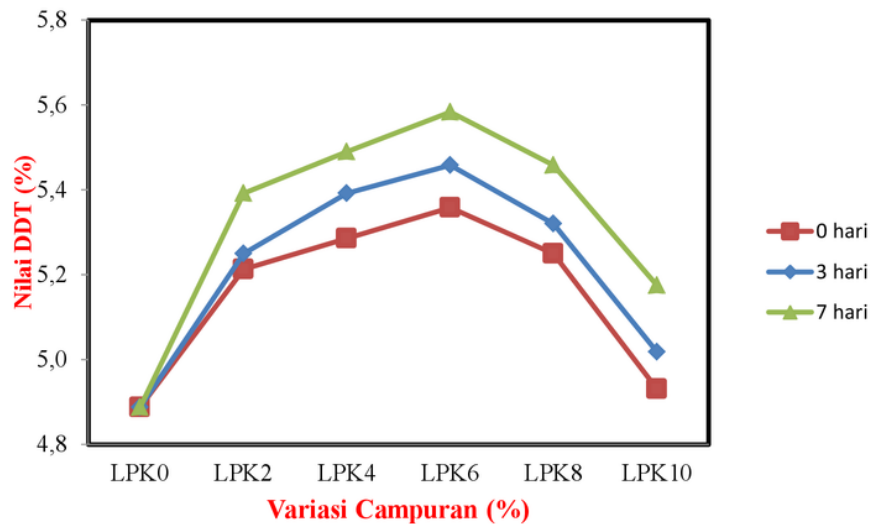
$$DDT = (4,3 \log (\text{nilai CBR})) + 1,7$$

Salah satu contoh penjabaran nilai daya dukung tanah, yaitu pada variasi campuran 2% dan masa perawatan 3 hari sebagai berikut:

$$\begin{aligned} DDT &= (4,3 \log (\text{nilai } 6,69)) + 1,7 \\ &= 5,249 \end{aligned}$$

Tabel 4.9. Rekapitulasi nilai daya dukung tanah

No	Variasi Campuran	Nilai Daya Dukung Tanah (DDT)		
		Masa Perawatan		
		0 hari	3 hari	7 hari
1	LPK0	4,887	4,887	4887
2	LPK2	5,213	5,249	5,392
3	LPK4	5,285	5,392	5,490
4	LPK6	5,358	5,458	5,583
5	LPK8	5,249	5,321	5,458
6	LPK10	4,931	5,018	5,175



Gambar 4.13. Grafik nilai daya dukung tanah dengan masa perawatan 0 hari, 3 hari, dan 7 hari

Dari tabel rekapitulasi nilai daya dukung tanah (DDT), didapatkan nilai daya dukung tanah (DDT) maksimum pada variasi LPK6 dengan masa perawatan 7 hari yaitu sebesar 5,583. Nilai daya dukung tanah (DDT) tersebut dapat dikatakan sebagai daya dukung tanah dasar yang baik, karena mempunyai nilai CBR >5%. Berdasarkan hasil tersebut, abu limbah pabrik kertas mempunyai pengaruh yang baik terhadap nilai daya dukung tanah.

4.12. Pembahasan

Penelitian ini menggunakan sampel tanah yang berasal dari daerah Desa Gasing, Tanjung Api-Api, Kecamatan Talang Kelapa, Kabupaten Banyuasin, Sumatera Selatan. Hasil pengujian sifat fisik tanah didapatkan bahwa sampel tanah merupakan jenis tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif merupakan jenis tanah yang mempunyai potensi kembang susut yang tinggi. Nilai kembang susut yang tinggi tersebut didapatkan berdasarkan dari hasil pengujian batas-batas atterberg, yaitu nilai batas cair dan nilai indeks plastisitas (IP). Hasil pengujian batas cair didapatkan sebesar 77,80% yang menunjukkan bahwa mempunyai potensi perubahan volume yang sangat tinggi, yaitu nilai batas cair (LL) > 70%. Sedangkan untuk nilai indeks plastisitas dihasilkan sebesar 40,63%

yang berdasarkan kategori juga memiliki potensi perubahan volume yang sangat tinggi dengan nilai indeks plastisitas (IP) >35%.

Bahan campuran yang berupa abu limbah pabrik kertas dilakukan pengujian batas-batas atterberg. Hasil pengujian batas-batas atterberg menunjukkan bahwa abu limbah pabrik kertas mempunyai potensi untuk menurunkan nilai kembang susut pada sampel tanah. Hal itu dapat dilihat berdasarkan hasil pengujian batas-batas atterberg dengan campuran yang mengalami penurunan dari sampel tanah asli sebesar 40,63% ke 15,91% dengan variasi campuran LPK10 abu limbah pabrik kertas. Nilai indeks plastisitas yang mengalami penurunan tersebut sama dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Onyelow (2017) dengan nilai tanah asli sebesar 21,85% menjadi 12,76% pada variasi campuran 10%. Penurunan nilai indeks plastisitas (IP) dapat terjadi karena abu limbah pabrik kertas mempunyai butiran-butiran yang sangat halus sehingga bahan campuran tersebut mengisi rongga-rongga dari sampel tanah. Oleh karena itu, potensi kembang susut pada tanah menjadi berkurang.

Pengujian pemadatan tanah standar dengan campuran menghasilkan nilai kadar air optimum dan nilai berat volume kering maksimum. Nilai kadar air optimum mengalami peningkatan dari nilai kadar air optimum tanpa campuran yang sebesar 25,4%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar persentase variasi yang diberikan, maka semakin meningkat pula nilai kadar air optimum. Sedangkan untuk nilai berat volume kering maksimum berbanding terbalik dengan nilai kadar air optimum. Nilai berat volume kering maksimum dengan campuran menunjukkan penurunan terhadap nilai berat volume kering maksimum tanpa campuran, yaitu dengan nilai 1,465 gr/cm³. Semakin besar variasi campuran, maka nilai berat volume kering semakin mengalami penurunan. Hasil penurunan pada berat volume kering maksimum sebanding dengan penurunan nilai berat jenis dengan campuran. Hasil pengujian berat jenis juga menunjukkan bahwa semakin besar persentase campuran, maka nilai berat jenis semakin mengalami penurunan. Hasil pengujian kadar air optimum yang mengalami kenaikan dan nilai penurunan pada berat volume kering maksimum tersebut sebanding dengan hasil pengujian yang dilakukan oleh Dharan R Barani (2016).

Hasil pengujian CBR *soaked* dengan campuran menunjukkan bahwa abu limbah pabrik kertas dapat menaikkan nilai CBR *soaked* dengan cukup baik. Persentase variasi campuran dan masa perawatan dari sampel uji juga berpengaruh terhadap nilai CBR *soaked*. Nilai CBR *soaked* maksimum didapatkan pada variasi campuran LPK6 dengan masa perawatan 7 hari, yaitu dengan nilai sebesar 8,00%. Persentase maksimum pada variasi campuran 6% ini sama dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Dharan (2016) yang menghasilkan nilai CBR 18,6%. Perbedaan nilai CBR yang dihasilkan pada penelitian terdahulu disebabkan oleh karakteristik abu limbah pabrik kertas yang berbeda. Pada penelitian Dharan (2016) abu limbah pabrik kertas didapatkan dari SPB *Paper Mill* di Erode dan mempunyai nilai berat jenis sebesar 1,65. Selain itu, persentase unsur kimia pada abu limbah pabrik kertas tersebut sebesar 62,39% untuk kalsium, 23,25% silika, 2,46% MgO, dan 0,77% Fe. Sedangkan pada penelitian ini abu limbah pabrik kertas diambil dari PT. Tanjung Enim Lestari Pulp & Paper dengan nilai berat jenis sebesar 2,346. Abu limbah pabrik kertas ini mempunyai kandungan unsur kimia dengan persentase untuk MgO sebesar 0,93%, 0,86% untuk silika, 0,30% Fe dan 0,12% kalsium.

Nilai CBR *soaked* yang mengalami peningkatan tersebut dapat terjadi karena bahan campuran yang berupa abu limbah pabrik kertas mempunyai fungsi sebagai pengisi rongga-rongga dari sampel tanah. Pencampuran abu limbah pabrik kertas menyebabkan kepadatan dari tanah tersebut meningkat. Seiring dengan meningkatnya daya ikat antar butiran tanah, sehingga nilai CBR juga meningkat. Selain itu, reaksi antar butiran tanah dengan unsur kalsium dan silika yang terdapat pada abu limbah pabrik kertas juga mempengaruhi peningkatan nilai CBR *soaked*. Nilai CBR *soaked* mengalami kenaikan dari variasi LPK2 sampai dengan LPK6 campuran abu limbah pabrik kertas. Sedangkan pada persentase LPK8 dan LPK10 mengalami penurunan hasil CBR *soaked*. Nilai CBR *soaked* yang mengalami penurunan disebabkan oleh berkurangnya volume tanah akibat banyaknya abu limbah pabrik kertas yang mengisi pori-pori tanah. Selain itu, kadar air yang semakin meningkat dapat menyebabkan kepadatan menurun karena pori-pori tanah terisi penuh dengan air sehingga tanah tidak dapat dipadatkan dengan maksimal. Oleh sebab itu, hasil penetrasi pengujian CBR *soaked*

mengalami penurunan. Faktor lain yang mempengaruhi nilai CBR *soaked* adalah lama masa perawatan. Hasil pengujian CBR *soaked* menunjukkan bahwa semakin lama waktu perawatan yang diberikan, maka nilai CBR semakin mengalami peningkatan. Kondisi tersebut disebabkan oleh kandungan unsur kimia yang terdapat pada abu limbah pabrik kertas membutuhkan waktu untuk bereaksi dengan sampel tanah.

Bahan campuran abu limbah pabrik kertas juga berpengaruh pada hasil pengembangan pada uji CBR *soaked*. Nilai pengembangan terkecil terdapat pada variasi LPK6 dengan masa perawatan 7 hari yaitu sebesar 0,43%. Hasil pengembangan menunjukkan bahwa penambahan abu limbah pabrik kertas menyebabkan nilai pengembangan semakin menurun. Hasil penurunan tersebut disebabkan oleh abu limbah pabrik kertas yang mengikat pori-pori pada butiran tanah sehingga menghalangi proses masuknya air ke dalam tanah dan nilai pengembangan menjadi menurun. Nilai pengembangan yang semakin menurun berbanding terbalik dengan nilai CBR yang mengalami kenaikan. Semakin menurun nilai pengembangan, maka nilai CBR *soaked* mengalami kenaikan.

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Nilai CBR *soaked* dengan campuran mengalami peningkatan dari nilai CBR *soaked* tanah asli yang sebesar 5,51%. Hasil CBR *soaked* maksimum didapatkan pada variasi LPK6 dengan nilai sebesar 7,09%. Persentase peningkatan terhadap nilai CBR *soaked* tanah asli adalah sebesar 28,675%. Selain itu, untuk hasil pengembangan menunjukkan penurunan dari nilai pengembangan tanah asli. Nilai pengembangan terkecil didapatkan sebesar 0,71%. Perubahan hasil pengembangan dari tanah asli yaitu dari persentase 1,99% menjadi 0,71%.
2. Nilai CBR *soaked* dengan masa perawatan selama 3 hari dan 7 hari mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Pengujian CBR *soaked* dengan masa perawatan menghasilkan nilai maksimum sebesar 8,00% pada masa perawatan 7 hari dengan variasi LPK6. Untuk peningkatan nilai CBR *soaked* mengalami kenaikan sebesar 45,191% dari tanah asli. Sedangkan hasil pengembangan menunjukkan bahwa semakin lama masa perawatan, maka nilai pengembangan semakin menurun. Nilai pengembangan terkecil dihasilkan pada persentase LPK6 dengan masa perawatan 7 hari, yaitu sebesar 0,43%.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan terhadap penelitian ini sebagai berikut:

1. Penelitian dengan bahan campuran abu limbah pabrik kertas perlu dilakukan perbedaan rentang persentase variasi campuran yang lebih kecil sehingga dapat menghasilkan nilai CBR *soaked* yang lebih akurat.
2. Bahan campuran abu limbah pabrik kertas perlu dilakukan pengujian unsur kimia yang lebih beragam dan detail terhadap komposisi kandungan yang terdapat pada abu limbah pabrik kertas sehingga dapat diketahui faktor yang mempengaruhi nilai CBR *soaked*.

3. Penggunaan abu limbah pabrik kertas perlu dilakukan pencampuran dengan bahan campuran lain sehingga kinerja abu limbah pabrik kertas dapat lebih baik dalam peningkatan nilai CBR *soaked*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, Joseph., 1991. Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah). PT. Erlangga. Jakarta.
- Budi, Grogot Setio., 2011. Pengujian Tanah di Laboratorium. Graha Ilmu, Yogyakarta.
- Darwis., 2017. Dasar-Dasar Perbaikan Tanah. Pustaka AQ, Yogyakarta.
- Das, Braja. M., 1995. Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis). Erlangga, Jakarta.
- Dharan, R Barani., 2016. *Effect of Waste Paper Sludge Ash on Engineering Behaviors of Black Cotton Soils*. International Journal of Earth Sciences and Engineering 09(03) : 188-191.
- ¹ Hardiyatmo, Hary Christady., 2002. Mekanika Tanah I. Gadjah Mada University Press, Jakarta.
- Ibrahim., 2013. Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Penambahan Limbah Sawit Terhadap Nilai *California Bearing Ratio*. Teknik Sipil 09(02) : 159-168.
- ² Jonathan, Agustiono., 2018. Laporan Kerja Praktek di PT. TanjungEnim Lestari Pulp and Paper. Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta.
- KC, Onyelowee., 2017. *Nanostructured Waste Paper Ash Stabilization of Lateritic Soils for Pavement Base Construction Purposes*. Department of Civil Engineering 22(09) : 3633-3647.
- Purwati, Sri., 2006. Potensi dan Alternatif Pemanfaatan Limbah Padat Industri Pulp dan Kertas. Staf Peneliti Bidang Lingkungan, Balai Besar Pulp dan Kertas 41(02) : 68-79.
- Yuliet, Rina., 2010. Identifikasi Tanah Lempung Kota Padang Berdasarkan Uji Klasifikasi Teknik dan Uji Batas-Batas Konsistensi Atterberg. Universitas Andalas 06(02) : 19-30.
- Sasrodarsono, Suyono., 2000. Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi. PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
- Titi, Yunianti., 2010. Perubahan Kandungan Air Terhadap Nilai Pengembangan pada Tanah Dasar Jalan Penawangan-Purwodadi. Universitas Negeri Semarang. Perpustakaan Unnes, Semarang.

Vishwajeet, Biradar ¹dkk., 2016. *Experimental Investigation of Expansive Soils on Stabilization with Waste Paper Ash and Marble Dust Powder at Optimum Valuen of Opc 43 Grade*. International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering 2(3) : 31-37.

Pengaruh Penambahan Abu Limbah Pabrik Kertas Terhadap Nilai CBR Soaked pada Tanah Lempung Ekspansif

ORIGINALITY REPORT

25%

SIMILARITY INDEX

15%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

25%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	Submitted to Sriwijaya University Student Paper	13%
2	docplayer.info Internet Source	4%
3	ebooktekniksipil.files.wordpress.com Internet Source	2%
4	www.scribd.com Internet Source	1%
5	Submitted to Universitas Islam Indonesia Student Paper	1%
6	Submitted to Sultan Agung Islamic University Student Paper	1%
7	digilib.unila.ac.id Internet Source	1%
8	edoc.pub Internet Source	1%
9	id.scribd.com	

Internet Source

1%

10

journal.uny.ac.id

Internet Source

1%

Exclude quotes On

Exclude matches < 1%

Exclude bibliography On