

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pencemaran Air Tanah

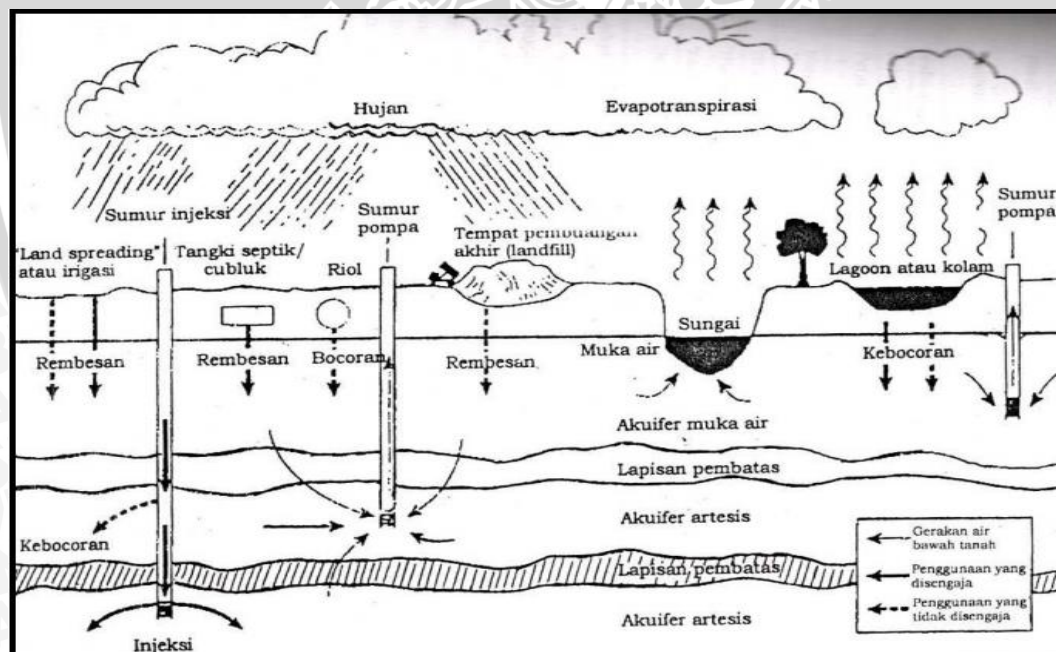
Pencemaran air tanah adalah suatu keadaan air tanah yang telah mengalami penyimpangan dari keadaan normalnya. Keadaan normal air masih tergantung pada faktor penentu, yaitu kegunaan air itu sendiri dan asal sumber air (Wardhana, 1995). Kontaminan merupakan zat kimia dalam bentuk cair, padat dan gas yang berasal dari kegiatan manusia dimana efek negatif atau dampaknya secara nyata terhadap manusia dan lingkungannya belum teridentifikasi secara jelas (Notodarmojo, 2004). Kontaminan yang masuk dalam air tanah sangat berbahaya bagi manusia. Kontaminan masuk ke dalam tubuh manusia melalui makanan dan minuman yang telah terkontaminasi air tanah. Sejauh mana kontaminan berdampak buruk bagi kesehatan manusia tergantung dari jenis, konsentrasi dan intensitasnya.

Kontaminan yang berpotensi untuk mencemari air tanah berasal dari berbagai sumber. OTA (*Office of Technology Assessment, USA*) membagi sumber kontaminan menjadi 6 (enam) kategori (Notodarmojo, 2004), yaitu:

- a. Sumber yang berasal dari tempat atau kegiatan yang dirancang untuk membuang dan mengalirkan zat atau substansi, misalnya tangki septic, kakus dan sumur injeksi.
- b. Sumber yang berasal dari tempat atau kegiatan yang dirancang untuk mengolah atau membuang zat atau substansi, misalnya *landfill* (TPA), tempat pembuangan limbah pertambangan, kolam penampungan dan tempat pembuangan limbah berbahaya dan material radioaktif.
- c. Sumber yang berasal dari tempat atau kegiatan transportasi zat atau substansi, misalnya saluran limbah dan jaringan pipa gas atau minyak.
- d. Sumber yang berasal dari konsekuensi suatu kegiatan yang terencana, misalnya pemupukan dan penyemprotan pestisida serta kotoran dari peternakan.
- e. Sumber yang berasal dari suatu kegiatan yang menyebabkan adanya jalan masuk bagi air terkontaminasi masuk ke dalam akuifer, misalnya sumur bor untuk produksi atau eksplorasi minyak dan gas serta panas bumi dan pengerukan tanah dalam jumlah besar.
- f. Sumber kontaminan yang terjadi secara alamiah tetapi penyebarannya disebabkan oleh aktivitas manusia, misalnya hujan asam yang disebabkan penggunaan bahan bakar minyak dan batubara.

Lindi (*leachate*) merupakan salah satu bentuk pencemaran air tanah. Lindi (*leachate*) adalah limbah cair yang timbul akibat masuknya air dari luar ke dalam timbunan sampah, melarutkan, dan membilas materi-materi terlarut, termasuk juga materi organik hasil proses dekomposisi biologis (Damanhuri, 1996). Banyak tempat pembuangan sampah awal tidak memiliki lapisan untuk menahan air hujan yang merembes melalui TPA, dan beberapa tempat pembuangan sampah baru memiliki lapisan yang bocor.

Air lindi ada yang mengalir di permukaan tanah berdampak pada air permukaan dan menimbulkan bau serta penyakit, sedangkan air lindi yang merembes ke dalam air tanah akan menimbulkan pencemaran air tanah dangkal di sekitarnya. Menurut Bagchi (1994), faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas lindi adalah komposisi sampah, umur TPA, temperatur pada lokasi TPA, kadar air sampah dan ketersediaan oksigen. Meningkatnya konsentrasi unsur-unsur pencemar pada kualitas air tanah dangkal juga dipengaruhi oleh jenis tanah serta topografi. Mekanisme kontaminasi air tanah dari berbagai sumber dapat dilihat pada Gambar 2.1. berikut.

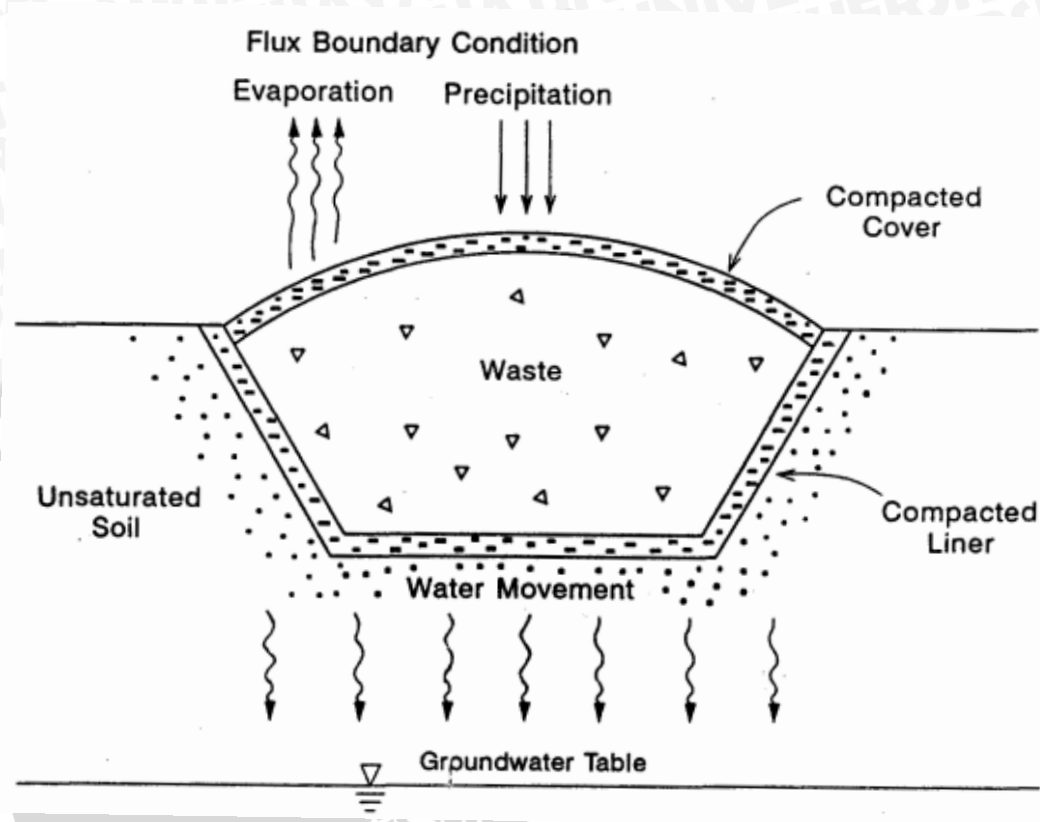


Gambar 2.1. Mekanisme Kontaminasi Air Tanah dari Berbagai Sumber
Sumber: Notodarmojo, 2004

2.2. Struktur *Compacted Soil Liner*

Compacted soil liner atau lapisan tanah yang dipadatkan telah lama digunakan dalam rekayasa hidrolik sebagai fasilitas penanganan limbah. *Compacted Soil Liner*

banyak digunakan untuk tempat pembuangan limbah sebagai penutup unit pembuangan limbah (*landfill*). *Compacted soil liner* terbentuk dari material tanah yang mengandung lempung yang diletakkan dan dipadatkan berlapis yang disebut *lifts*. Secara sederhana, struktur *compacted soil liner* dapat digambarkan terdiri dari pelapis dasar (*liner*) dan penutup (*cover*) seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Struktur *Compacted Soil Liner*

Sumber: *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 1993

Secara umum, *Environmental Protection Agency (EPA)*, 1993) menetapkan batas minimum ketebalan pelapis dasar (*liner*) yang diijinkan, yaitu ketebalan pelapis dasar (*liner*) harus lebih besar dari 2 ft (0,6 m).

Material yang digunakan sebagai konstruksi *compacted soil liner* meliputi:

- a. Material mineral alami (tanah alami).

Merupakan tipe yang paling umum dari *compacted soil liner* yang dibentuk dari tanah yang secara alami terbentuk yang terdiri dari kuantitas tanah lempung yang banyak. Tanah yang digunakan biasanya yang digolongkan sebagai CL, CH atau SC sesuai USCS (*Unified Soil Classification System*) dan ASTM D-2487.

- b. Campuran *Bentonite* dan tanah

Biasanya tanah yang digunakan sebagai fasilitas pembuangan limbah tidak hanya cukup mengandung tanah liat yang secara langsung digunakan sebagai material lapisan tanah, pada umumnya digunakan *Bentonite* sebagai campuran tanah alami.

c. Material Lain

Material lain kadang-kadang digunakan juga sebagai *compacted soil liner* misalnya *bentonite* yang dicampur dengan *Fly Ash* untuk membentuk lapisan dalam keadaan tertentu.

2.2.1. Pelapis Dasar (*Liner*) dan Tanah Penutup

Pada sebuah lahan urug yang baik biasanya dibutuhkan sistem pelapis dasar, yang bersasaran mengurangi mobilitas lindi ke dalam air tanah. Sebuah *liner* yang efektif akan mencegah migrasi cemaran ke lingkungan, khususnya ke dalam air tanah. Sistem pelapis tersebut dapat berupa bahan alami seperti tanah liat, *Bentonite* maupun sintesis. Penggunaan bahan *liner* tersebut bisa secara tunggal maupun kombinasi antara keduanya yang dikenal sebagai geokomposit, tergantung fungsi yang dibutuhkan. Formasi lapisan dan jenis bahan *liner* ini bermacam-macam tergantung pada karakteristik buangan padat yang ditimbun. Untuk jenis sampah kota, Bagchi merekomendasikan cukup mengaplikasikan sistem *single liner* dengan jenis bahan *liner* berupa *clay*.

Pelapis dasar yang dianjurkan adalah dengan geosintetis atau dikenal sebagai *flexible membrane liner (FML)*. Jenis geosintetis yang biasa digunakan sebagai pelapis dasar adalah:

1. *Geotextile* sebagai filter
2. *Geonet* sebagai sarana drainase
3. *Geomembrane* dan geokomposit sebagai lapisan penghalang.

Selain pelapis dasar diperlukan juga tanah penutup. Beberapa fungsi dari tanah penutup antara lain:

1. Meminimasi infiltrasi air hujan ke dalam tumpukan sampah setelah lahan urug selesai dipakai.
2. Mengontrol emisi gas dari lahan urug ke lingkungan.
3. Mengontrol binatang dan vektor-vektor penyakit yang dapat menyebabkan penyakit pada ekosistem.
4. Mengurangi resiko kebakaran.

5. Menyediakan permukaan yang cocok untuk berbagai kegunaan setelah lahan urug selesai digunakan, seperti untuk taman rekreasi dan lain-lain.
6. Elemen utama dalam reklamasi lahan.
7. Mencegah kemungkinan erosi.
8. Memperbaiki tampilan lahan urug dari segi estetika.

2.2.2. *Bentonite sebagai Material Compacted Soil Liner*

Bentonite adalah tanah lempung yang sebagian besar terdiri dari *montmorillonite* dengan mineral-mineral seperti kwarsa, kalsit, dolomit dan mineral lainnya. Montmorillonit merupakan bagian dari kelompok *smectit* dengan komposisi kimia secara umum $(Mg,Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot nH_2O$. Mineral monmorillonit terdiri dari partikel-partikel yang sangat kecil.

Berdasarkan kandungan alumino silikat hidrat yang terdapat dalam *Bentonite*, maka *bentonite* tersebut dapat dibagi menjadi dua golongan :

- a. *Activated clay*, merupakan lempung yang mempunyai daya pemucatan yang rendah.
- b. *Fuller's earth*, merupakan lempung yang secara alami mempunyai sifat daya serap terhadap zat warna pada minyak, lemak, dan pelumas.

Berdasarkan tipenya, *Bentonite* dibagi menjadi dua, yaitu :

➤ Tipe Wyoming (*Na-Bentonite-swelling Bentonite*)

Na *bentonite* memiliki daya mengembang hingga delapan kali apabila dicelupkan ke dalam air, dan tetap terdispersi beberapa waktu di dalam air. Dalam keadaan kering berwarna putih atau krem, pada keadaan basah dan terkena sinar matahari akan berwarna mengkilap. Na-*bentonite* dimanfaatkan sebagai bahan perekat, pengisi (*filler*), lumpur bor, sesuai sifatnya mampu membentuk suspensi kental setelah bercampur dengan air. Dalam keadaan kering berwarna putih atau cream, pada keadaan basah dan terkena sinar matahari akan berwarna mengkilap, mempunyai pH 8,5 – 9,8.

➤ Mg (*Ca-Bentonite-non swelling Bentonite*)

Tipe *Bentonite* ini kurang mengembang apabila dicelupkan ke dalam air, tetapi secara alami setelah diaktifkan mempunyai sifat menghisap yang baik. Dalam keadaan kering berwarna abu-abu, biru, kuning, merah, coklat. Ca-*bentonite* banyak dipakai sebagai bahan penyerap.

2.2.3. *Fly Ash*

Fly Ash atau abu terbang merupakan material oksida anorganik berwarna abu-abu kehitaman yang mengandung silica dan alumina aktif karena sudah melalui proses pembakaran pada suhu tinggi. Abu terbang merupakan sisa-sisa pembakaran batubara yang dialirkan dari ruang pembakaran melalui ketel berupa semburan asap. Menurut ASTM C-618 *Fly Ash* dibagi menjadi dua kelas yaitu *Fly Ash* kelas F dan *Fly Ash* kelas C. Klasifikasi *Fly Ash* berdasarkan ASTM C-618 dapat dilihat pada Tabel 2.1

1. *Fly Ash* kelas F merupakan *Fly Ash* yang diproduksi dari pembakaran batubara anthracite atau bituminous, mempunyai sifat *pozzolanic* dan untuk mendapatkan sifat *cementitious* harus diberi penambahan *quick lime*, *hydrated lime*, atau semen.
2. *Fly Ash* kelas C diproduksi dari pembakaran batubara lignite atau sub-bituminous selain mempunyai sifat *pozzolanic* juga mempunyai sifat *self-cementing* (kemampuan untuk mengeras dan menambah kekuatan apabila bereaksi dengan air) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur.

Tabel 2.1. Klasifikasi *Fly Ash* Berdasarkan ASTM C-618

COMPUOND		F	C
Chemical			
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ + SO ₃	min %	70	50
SO ₃	max %	5	5
Moisture Content	max %	3	3
Loss of Ignitation	max %	6	6
Physical			
Available Alkalies	max %	1.5	1.5
Fineness +325 Mesh	max %	34	34
Strength Activity	max %	75	75
Water Requirment	max %	105	105
Uniformity			
Density	max %	5	5
Retained on 45- μ m (No.325)	max %	5	5

Sumber: ASTM C-618

2.3. Kriteria Permeabilitas untuk Desain *Compacted Soil Liner*

Permeabilitas tanah menunjukkan kemampuan tanah dalam meloloskan air. Permeabilitas adalah parameter yang paling dominan dalam desain dan implementasi fasilitas pembuangan limbah. Permeabilitas untuk material lapisan dasar dan penutup merupakan aspek yang penting. Koefisien permeabilitas yang biasanya digunakan untuk *compacted soil liner* yang memuat limbah berbahaya, limbah industri dan limbah padat adalah kurang dari atau sama dengan 1×10^{-6} cm/detik. (Koerner, R. M., 1984).

Ada dua cara penentuan koefisien permeabilitas yakni pengujian laboratorium dan pengujian lapangan. Pada metode pengujian laboratorium, pengujian tanah berbutir kasar dapat ditentukan dari uji tinggi konstan (*constant head test*) sedangkan untuk tanah berbutir halus digunakan uji tinggi jatuh (*falling head test*).

Koefisien permeabilitas terutama tergantung pada ukuran rata-rata pori yang dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel, bentuk partikel dan struktur tanah (Craig,1989:34). Pada tanah berlempung, struktur tanah konsentrasi ion dan ketebalan lapisan air yang menempel pada butiran lempung menentukan koefisien rembesan.

Koefisien permeabilitas juga bergantung pada tingkat kepadatan suatu tanah. Tingkat kepadatan suatu tanah diukur berdasarkan berat volume kering (γ_d) dari tanah yang bersangkutan. Tujuan pemadatan adalah mempertinggi kuat geser tanah, mengurangi sifat mudah mampat (*compresibilitas*), mengurangi permeabilitas, dan mengurangi perubahan volume sebagai akibat perubahan kadar air dan lain-lain. Penelitian Mitchell et al (1965) telah menunjukkan bahwa besarnya energi pemadatan dan metode pemadatan secara signifikan mempengaruhi besarnya koefisien permeabilitas pada tanah lempung yang dipadatkan. Pemadatan tanah lempung secara benar akan memberikan kuat geser yang tinggi, sedangkan stabilitas terhadap kembang susut tergantung dari jenis kandungan mineralnya. Air yang ditambahkan ke dalam tanah yang sedang dipadatkan berfungsi sebagai pelumas dari butiran tanah sehingga butiran tanah tersebut akan mudah bergerak untuk mendekat satu sama lain hingga keadaan yang paling padat dicapai.

Kepadatan maksimum suatu tanah akan dicapai pada kadar air optimum sehingga diperlukan pengujian pemadatan untuk menentukan kadar air optimum dari tanah dan kepadatan maksimum yang akan dicapai oleh tanah pada kadar air optimumnya.

Ada dua cara test pemadatan yang diperkenalkan oleh Proctor (1933) yaitu:

- a. *Standard Proctor Test*, menghasilkan berat kering maksimum yang kira-kira sama dengan berat kering tanah yang dipadatkan dengan menggunakan ukuran alat pemadatan sederhana.
- b. *Modified Proctor Test*, menghasilkan berat kering minimum yang kira-kira sama dengan berat kering tanah yang dipadatkan dengan menggunakan ukuran alat pemadatan berat.

Harga kepadatan kering dari suatu *compacted soil liner* harus lebih besar atau sama besar dengan suatu harga persentase (P) dari harga kepadatan kering maksimum

atau MDD (*Maximum Dry Density*) hasil pengujian pemadatan di laboratorium. Herrmann dan Elsbury (1987) memberikan persyaratan sebagai berikut:

- ❖ P = 95% dari MDD untuk *Standard Proctor Test* (ASTM D-698).
- ❖ P = 90% dari MDD untuk *Modified Proctor Test* (ASTM D-698).

Rentang kadar air yang digunakan untuk mendesain struktur *compacted soil liner* biasanya berkisar antara 0% – 4% lebih tinggi dari harga OMC (*optimum moisture content*) baik pada pengujian yang didapat dari *Standard Proctor* maupun *Modified Proctor*.

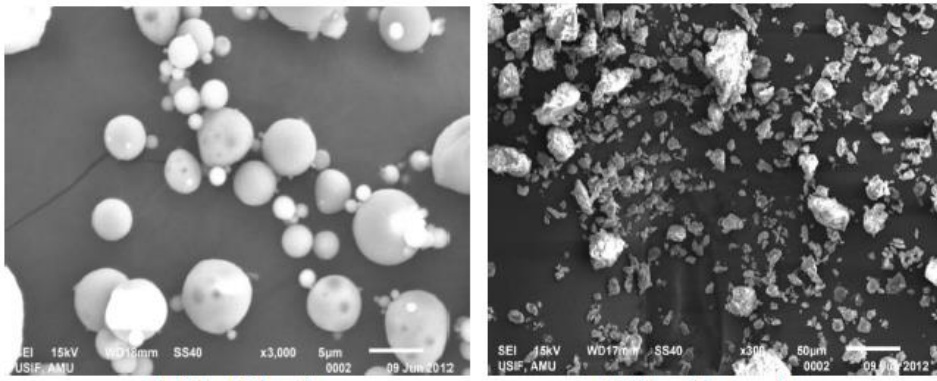
2.4. Kriteria Kuat Tekan Bebas *Compacted Soil Liner*

Suatu pelapis atau penutup dari tanah yang dipadatkan harus memiliki karakteristik kekuatan yang mencukupi untuk menjaga kestabilannya terhadap penurunan ataupun keretakan yang mungkin terjadi. Berdasarkan EPA (*Environmental Protection Agency*) di Amerika Serikat, lapisan tanah yang dipadatkan sebagai pelapis dan penutup ini harus memiliki harga q_u minimal 1500 lb/ft² setara dengan 71,6 kPa atau 0,716 kg/cm² (Koerner, R. M., 1984).

Penurunan tak seragam (*differential settlement*) dapat terjadi bila suatu area *landfill* mengalami penurunan lebih cepat dibandingkan area lainnya yang disebabkan oleh perbedaan kadar air, pemadatan tanah dan konsolidasi ketebalan awal timbunan sampah. Penurunan tidak seragam ini akan menyebabkan keretakan (*cracks*) pada penutup. Keretakan dapat dibagi dua jenis, yang pertama adalah keretakan akibat dekomposisi dan konsolidasi sampah, yang kedua adalah keretakan tarik akibat ketidakstabilan (*instability*) yang berasal dari pergerakan lateral timbunan sampah.

2.5. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Scanning Electron Microscope atau dikenal dengan uji atau analisis SEM adalah suatu pengujian yang digunakan untuk menampilkan hasil *scan* elektron suatu benda padat. Pengujian SEM diatur pada ASTM E-986-97. Uji SEM menggunakan sinar elektron berenergi tinggi untuk membangkitkan sinyal yang berbeda-beda dari permukaan suatu benda. Dalam uji SEM *output* yang dihasilkan adalah gambar perbesaran dari pembangkitan sinyal elektron tadi, sehingga terdapat suatu perbedaan antara benda-benda yang materialnya berbeda karena susunan elektronnya yang berbeda-beda pula. Contoh hasil uji SEM pada *Fly Ash* dan *Bentonite* dengan pembesaran 3000 kali dapat dilihat pada Gambar 2.3. berikut.



Gambar 2.3. SEM pada *Fly Ash* dan *Bentonite*
 Sumber: Khan, M.A., Alam, J. and Husain, M. (2013)

2.6. Pengaruh *Index Properties* Tanah

Sifat-sifat indeks (*index properties*) menunjukkan sifat-sifat tanah yang mengindikasikan jenis dan kondisi tanah, serta memberikan hubungan terhadap sifat-sifat mekanis (*engineering properties*) seperti kekuatan dan pemampatan atau kecenderungan untuk mengembang, dan permeabilitas. Pada umumnya, untuk tanah berbutir kasar (*coarse-grained*), sifat-sifat partikelnya dan derajat kepadatan relatif adalah sifat-sifat yang paling penting. Sedangkan, untuk tanah berbutir halus (*fine-grained*), konsistensi (keras atau lunak) dan plastisitas merupakan sifat-sifat yang paling berpengaruh.

2.7. Klasifikasi Tanah Berdasarkan Standard USCS dan AASHTO

2.7.1. Sistem *Unified Soil Classification System* (USCS).

Dalam sistem ini, *Casagrande* membagi tanah atas 2 (dua) kelompok yaitu :

1. Tanah berbutir-kasar (*coarse-grained-soil*), yaitu: tanah kerikil dan pasir di mana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No.200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.
2. Tanah berbutir-halus (*fine-grained-soil*), yaitu tanah di mana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan No.200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau-organik dan lempung-organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), *muck*, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Simbol-simbol lain yang digunakan untuk klasifikasi USCS adalah

W = well graded (tanah dengan gradasi baik)

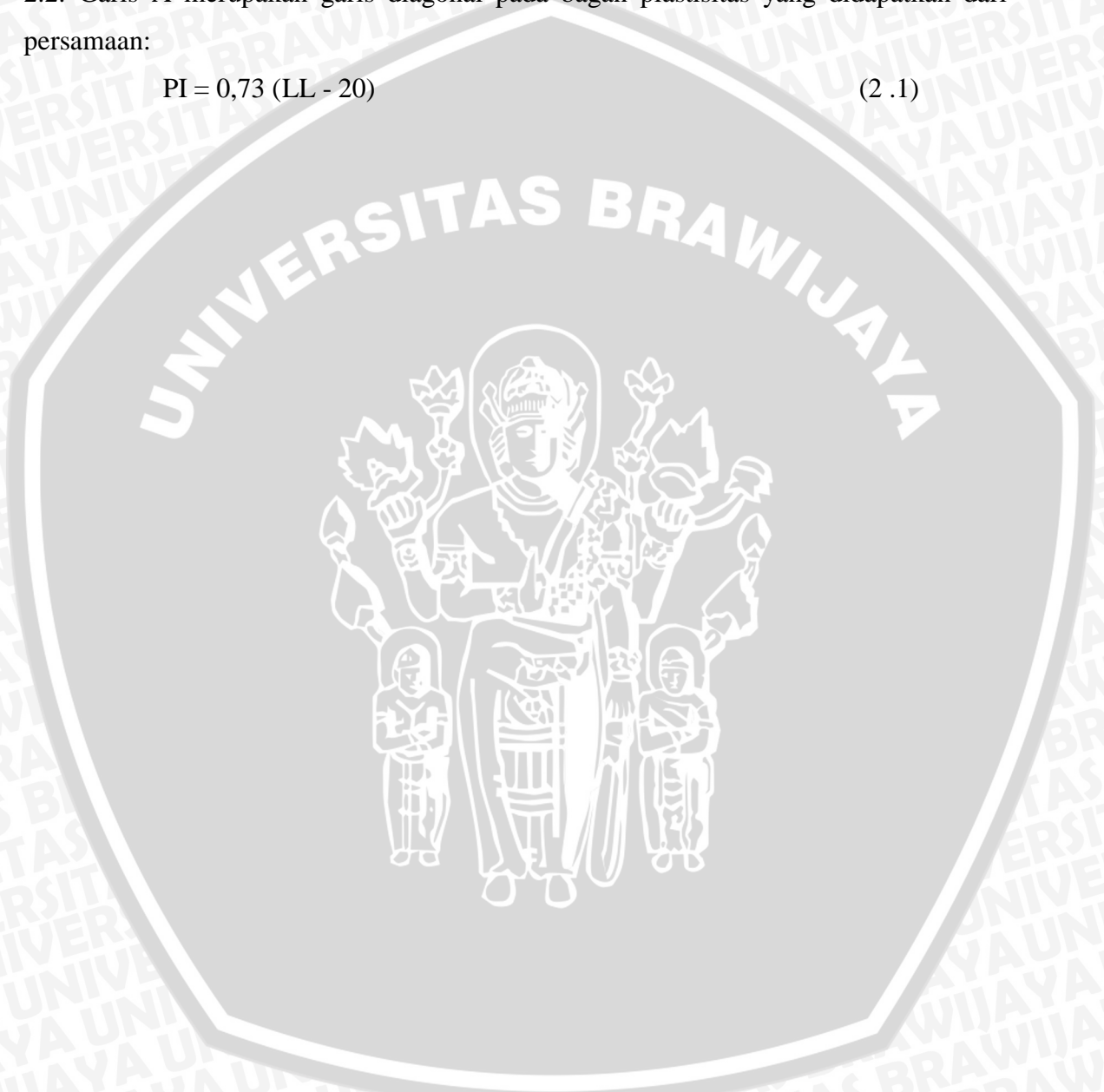
P = poorly graded (tanah dengan gradasi buruk)

L = low plasticity (plastisitas rendah)($LL < 50$)

H = high plasticity (plastisitas tinggi) ($LL > 50$)

Klasifikasi tanah berbutir halus dengan simbol ML, CL, OL, MH, CH, dan OH didapatkan dengan cara menggambar batas cair dan indeks plastisitas tanah yang bersangkutan pada bagan plastisitas (Casagrande, 1948) yang diberikan dalam Tabel 2.2. Garis A merupakan garis diagonal pada bagan plastisitas yang didapatkan dari persamaan:

$$PI = 0,73 (LL - 20) \quad (2.1)$$



Tabel 2.2. Sistem Klasifikasi USCS

Divisi utama		Simbol kelompok	Nama umum
Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200 ¹	Pasir lebih dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No. 4	Kerikil bersih (hanya kerikil)	GW Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
			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
			GC Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung
	Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan pada ayakan No. 4	Pasir bersih (hanya pasir)	SW Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
			SP Pasir bergradasi-buruk dan pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus
		Pasir dengan butiran halus	SM Pasir berlanau, campuran pasir-lanau
			SC Pasir berlempung, campuran pasir - lempung
	Tanah Berbutir Halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	Lanau dan Lempung Batas cair 50% atau kurang	ML Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung
			CL Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (lean clays)
OL Lanau - organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah			
Lanau dan Lempung Batas cair lebih dari 50%		MH Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis.	
		CH Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (fat clays)	
		OH Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi	
		PT Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi	

* Menurut ASTM (1982)

† Berdasarkan tanah yang lolos ayakan 75 mm (3 in)

Tabel 2.2. Lanjutan Sistem Klasifikasi USCS

	Kriteria klasifikasi	
<p>Klasifikasi berdasarkan persentase butir halus</p> <p>Kurang dari 5% lolos ayakan No. 200 GW, GP, SW, SP</p> <p>Lebih dari 12% lolos ayakan No. 200 GM, GC, SM, SC</p> <p>5% sampai 12% lolos ayakan No. 200</p> <p>Klasifikasi perbatasan yang memerlukan penggunaan dua simbol</p>	$C_u = D_{60}/D_{10}$ Lebih besar dari 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3.	
	Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$	Batas-batas Atterberg yang digambar dalam daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda
	Batas-batas Atterberg di atas garis A dengan $PI > 7$	
	$C_u = D_{60}/D_{10}$ Lebih besar dari 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3	
	Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW	
	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$	Batas-batas Atterberg yang digambar dalam daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda
	Batas-batas atterberg di atas garis A dengan $PI > 7$	

Bagan Plastisitas

Untuk klasifikasi tanah berbutir-halus dan fraksi halus dari tanah berbutir-kasar

Batas Atterberg yang digambarkan di bawah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda

Persamaan garis A
 $PI = 0,73(LL - 20)$

Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat dalam
 ASTM Designation D-2488

Sumber: Braja M. Das (1985)

2.7.2. Sistem AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Official*)

Sistem klasifikasi ini dikembangkan dalam tahun 1929 sebagai *Public Road Administration Classification System*. Pengklasifikasian sistem ini berdasarkan kriteria ukuran butir dan plastisitas. Maka dalam mengklasifikasikan tanah membutuhkan pengujian analisis ukuran butiran, pengujian batas cair dan batas plastis. Sistem klasifikasi AASHTO Tabel 2.3. Pada sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar, yaitu A-1 sampai dengan A-7.

Tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir di mana 35% atau kurang dari jumlah butiran tanah tersebut lolos ayakan No.200. Tanah di mana lebih dari 35% butirannya lolos ayakan No.200 diklasifikasikan ke dalam kelompok A-4, A-5, A-6, dan A-7. Butiran dalam kelompok A-4 sampai dengan A-7 tersebut sebagian besar adalah lanau dan lempung.

Sistem klasifikasi ini didasarkan pada kriteria di bawah ini:

- 1) Ukuran butir
 - a) Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm dan yang tertahan di ayakan No.10 (2 mm).
 - b) Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No. 10 (2 mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm).
 - c) Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No. 200.
- 2) Plastisitas

Lanau merupakan bagian-bagian yang halus dari tanah dengan indeks plastisitas sebesar 10 atau kurang. Lempung merupakan bagian-bagian yang halus dari tanah dengan indeks plastik sebesar 11 atau lebih.
- 3) Apabila batuan (ukurannya lebih besar dari 75 mm) ditemukan didalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Gambar 2.4. merupakan rentang batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.

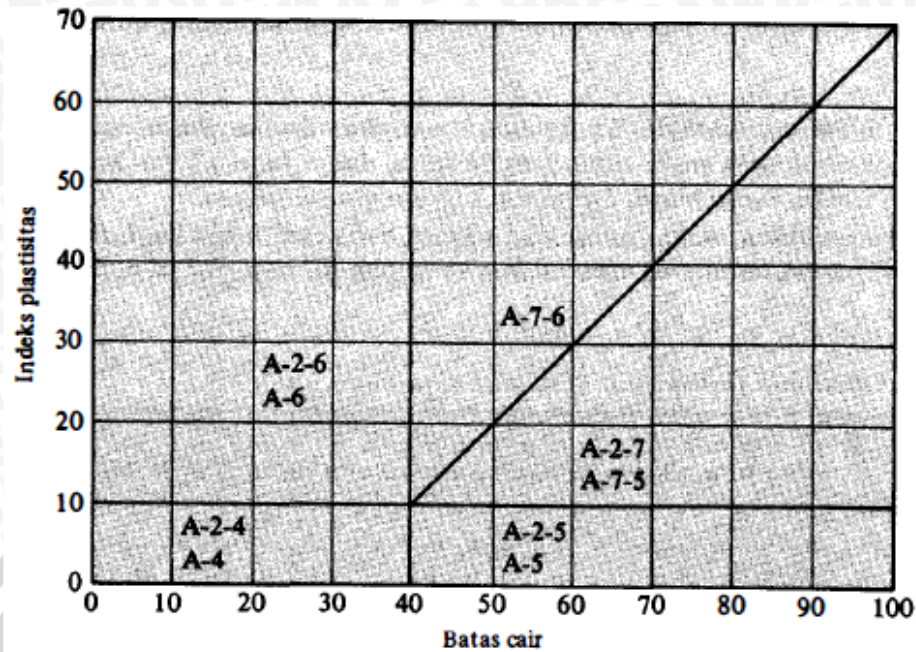
Tabel 2.3. Klasifikasi Tanah AASHTO

Klasifikasi Umum	Tanah Granuler ¹						
Kelompok	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	
Persen lolos saringan :							
No. 10	50 max						
No. 40	30 max	50 max	51 min				
No. 200	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	
Batas cair ² Indeks Plastisitas ³	6 max		NP	40 max 10 max	41 min 10 max	40 max 11 min	
Fraksi tanah	Kerikil dan pasir		Pasir halus	Kerikil dan pasir lanau atau lempung			
Kondisi kuat dukung	Sangat baik hingga baik						
Klasifikasi Umum	Tanah Mengandung Lanau-Lempung ²						
Kelompok	Tanah Granuler		A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-2	A-2-7				A-7-5 ^b	A-7-6 ^c
Persen lolos saringan :							
No. 10							
No. 40							
No. 200	35 max		36 min	36 min	36 min	36 min	
Batas cair ³ Indeks Plastisitas ³	41 min 11 min		40 max 10 min	41 min 10 max	40 max 10 min	40 max 10 min	
Fraksi tanah	Kerikil, pasir lanau/lempung		Lanau		lempung		
Kondisi kuat dukung	Sangat baik hingga baik			kurang baik hingga jelek			

* Untuk A-7-5, $PI \leq LL - 30$

† Untuk A-7-6, $PI > LL - 30$

Sumber : Braja, M. Das (1985)



Gambar 2.4. Rentang Batas Cair (LL) dan Indeks Plastisitas (PI) untuk Tanah Kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.

Sumber: Braja M. Das (1985)

Untuk mengevaluasi mutu (kualitas) dari suatu tanah sebagai bahan lapisan tanah dasar (*subgrade*) dari suatu jalan raya, suatu angka yang dinamakan indeks group (*group index*, GI) juga diperlukan selain kelompok dan sub kelompok dari tanah yang bersangkutan. Harga GI ini dituliskan di dalam kurung setelah nama kelompok dan sub kelompok dari tanah yang bersangkutan. Indeks group dapat dihitung dengan memakai persamaan seperti di bawah ini:

$$GI = (F-35)[0,2+0,005 (LL-40)]+0,01(F-15)(PI-10) \quad (2.2)$$

dimana:

F = presentase butiran yang lolos ayakan No. 200

LL = batas cair (*Liquid Limit*)

PI = indeks plastisitas

Suku pertama persamaan 2.2. yaitu $(F-35) [0,2+0,005(LL-4)]$, adalah bagian dari indeks group yang ditentukan dari batas cair (LL). Suku yang kedua, yaitu $0,01(F-15)(PI-10)$, adalah bagian dari indeks group yang ditentukan dari indeks plastisitas (PI).

Berikut ini adalah aturan untuk menentukan harga dari indeks group:

- a. Apabila persamaan (2.2) menghasilkan nilai GI yang negatif, maka harga GI dianggap nol.

- b. Indeks group yang dihitung dengan menggunakan persamaan (2.2) dibulatkan ke angka yang paling dekat (sbagai contoh: GI=3,4 dibulatkan menjadi 3,0; GI=3,5 dibulatkan menjadi 4,0).
- c. Tidak ada batas atas untuk indeks group.
- d. Indeks group untuk tanah yang masuk dalam kelompok A-1 a, A-1 b, A-2-4, A-2-5, dan A-3 selalu sama dengan nol.
- e. Untuk tanah yang masuk kelompok A-2-6 dan A-2-7, hanya bagian dari indeks group untuk PI saja yang digunakan, yaitu:

$$CI = 0,01 (F-1,5) (PI-10) \quad (2.3)$$

Pada umumnya, kualitas tanah yang digunakan untuk bahan tanah dasar dapat dinyatakan sebagai kebalikan dari harga indeks group.

2.8. Kriteria Kadar Air-Kepadatan untuk *Compacted Soil Liner*

Lapisan tanah (*soil liner*) secara tradisional telah dipadatkan di lapangan untuk berat kering minimal berdasarkan rentang kadar air yang ditentukan. Pendekatan ini berkembang dimana struktur yang kuat dan kompresibilitas menjadi perhatian utama. Pada *soil liner*, konduktivitas hidrolik sangat penting, oleh karena itu pendekatan yang digunakan untuk memastikan kekuatan yang memadai dan kompresibilitas yang diperbolehkan belum tentu berlaku untuk pembangunan pelapis tanah (*soil liner*). Tanah yang dipadatkan sebagai penutup dan pelapis tersebut harus memiliki harga koefisien permeabilitas ($k \leq 10^{-6}$ cm/dt (Koerner, R. M. 1984).

Keberhasilan desain dan konstruksi pelapis tanah dan penutup melibatkan banyak aspek, misalnya, pemilihan bahan, penilaian kompatibilitas kimia, penentuan metodologi konstruksi, analisis stabilitas lereng dan daya dukung, evaluasi penurunan, pertimbangan faktor-faktor lingkungan seperti pengeringan, dan pengembangan dan pelaksanaan rencana jaminan kualitas sebuah konstruksi (Daniel 1987; Oakley 1987; Elsbury et all 1989). Kebanyakan insinyur hanya mengandalkan kadar air dan berat isi kering pada pengukuran lapangan untuk memverifikasi pemadatan tanah yang baik.

Dalam hal kekuatan, suatu pelapis (*liner*) atau penutup (*cover*) dari tanah yang dipadatkan harus memiliki karakteristik kekuatan yang mencukupi untuk menjaga kestabilannya terhadap penurunan ataupun keretakan yang mungkin terjadi. Berdasarkan EPA (*Environmental Protection Agency*) di Amerika Serikat, lapisan tanah yang dipadatkan sebagai pelapis dan penutup ini harus memiliki harga q_u minimal 1500 lb/ft² (setara dengan 71,6 kPa atau 0,716 kg/cm²).

Fokus dari penelitian ini adalah konduktivitas hidrolis berdasarkan kriteria kadar air-kepadatan yang digunakan untuk jaminan kualitas pembangunan pelapis tanah (*soil liner*).

