



BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Studi pustaka adalah suatu pembahasan yang berdasarkan pada bahan-bahan buku referensi yang bertujuan untuk memperkuat materi pembahasan maupun sebagai dasar untuk menggunakan rumus-rumus tertentu dalam mendesain sesuatu.

Dari survey lapangan diperoleh indikasi bahwa pada daerah dataran aluvial umumnya berupa persawahan dan tanaman tebu, sedangkan pada daerah yang lebih tinggi dijumpai tanah penutup berwarna hitam, umumnya berupa kebun jagung, cabe dan pohon jati. Berdasarkan data sondir diperoleh data kedalaman lapisan tanah kompresibel. Lapisan kompresibel meliputi tanah dengan konsistensi sangat lunak sampai teguh (*firm*) yang dapat menyebabkan penurunan.

Kehadiran tanah lunak ini akan menjadi kajian utama, mengingat sebagian besar rencana konstruksi jalan berada diatas tanah timbunan. Suatu konstruksi timbunan jalan harus memenuhi syarat stabilitas daya dukung dan penurunan, untuk itu sebelum dilakukan penimbunan diperlukan upaya-upaya perbaikan tanah.

2.2 Perkerasan Jalan Raya

Perkerasan jalan adalah campuran antara agregat dan bahan ikat yang digunakan untuk melayani beban lalu lintas. Agregat yang dipakai dapat berupa batu pecah, batu kali, batu belah maupun stabilisasi tanah sedangkan bahan ikat bisa berupa aspal, semen atau tanah liat.

Secara umum, baik Rigid Pavement maupun Flexible Pavement terdiri dari lapisan-lapisan perkerasan. Lapisan-lapisan ini bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar yang tertekan dan dipadatkan.



Lapisan-lapisan tersebut adalah :

- Lapisan permukaan (*surface course*)
- Lapisan Pondasi (*base and sub base course*)
- Lapisan tanah dasar (*sub grade*)

a) Lapisan permukaan (*surface course*)

Lapisan permukaan adalah lapisan perkerasan yang paling atas. Lapisan ini berfungsi antara lain sebagai berikut :

- Lapis perkerasan penahan beban roda, mempunyai stabilitas tinggi untuk menahan beban roda selama masa layanan.
- Lapisan kedap air, air hujan yang jatuh tidak merembes kedalam lapisan perkerasan sehingga melemahkan lapisan-lapisan dibawahnya.
- Lapisan aus, karena menderita gaya gesekan dengan roda.
- Lapisan penyebar beban ke lapisan dibawahnya sehingga dapat dipikul oleh lapisan lain yang lebih jelek daya dukungnya.

b) Lapisan Pondasi (*base / sub base course*)

Lapisan pondasi perkerasan adalah lapisan antara lapisan permukaan dengan subgrade. Adapun fungsi lapisan pondasi adalah :

- Bagian perkerasan yang menahan gaya lintang roda dan menyebarkan ke lapisan yang dibawahnya (*sub grade*).
- Lapisan peresapan agar air tanah tidak berkumpul
- Bantalan dari lapisan permukaan.

Bahan-bahan untuk lapisan pondasi harus kuat sehingga dapat menahan beban-beban yang berada diatasnya. Sebelum menentukan suatu bahan yang digunakan sebagai bahan pondasi hendaknya dilakukan penyelidikan dan pertimbangan sebaik-baiknya sesuai dengan persyaratan teknis.

Campuran-campuran tanah setempat dengan kapur maupun semen Portland dalam beberapa hal sangat dianjurkan agar didapat bantuan yang efektif terhadap kestabilan struktur perkerasan.



c) Tanah Dasar (*subgrade*)

Tanah dasar adalah permukaan tanah semula atau permukaan tanah galian atau tanah permukaan timbunan yang dipadatkan dan merupakan permukaan dasar untuk perletakan bagian-bagian perkerasan yang lainnya. Kekuatan dan keawetan konstruksi perkerasan jalan tergantung dari sifat-sifat daya dukung tanah. Secara geoteknis, daya dukung tanah ditentukan oleh banyak hal. Pentingnya kekuatan dari tanah dasar menjadi point utama dalam ukuran kekuatan dan keawetan struktur perkerasan selama umur layanan. Umumnya permasalahan yang terjadi menyangkut tanah dasar berupa perubahan bentuk tetap, sifat mengembang dan daya dukung tidak merata. Bahan subgrade akan berpengaruh terhadap daya dukung tanah dasar tersebut. Semakin bagus spek tanah untuk subgrade maka akan semakin besar daya dukung tanah tersebut. Terutama untuk tanah dasar berupa tanah timbunan. Maka perlu diperhatikan beberapa hal sehubungan dengan daya dukung tanah tersebut. Antara lain :

- Klasifikasi tanah, berupa sifat butiran, plastisitas tanah sifat teknis tanah serta nilai CBR tanah. Kesemua hal itu berhubungan dengan kepadatan tanah, semakin padat tanah dasar maka akan semakin tinggi daya dukungnya.
- Kadar air, semakin tinggi kadar air maka daya dukung tanah itu akan semakin jelek.
- Kontrol pemadatan baik di laboratorium maupun lapangan.

2.3 Klasifikasi Tanah

Dalam banyak masalah teknis seperti dalam perencanaan perkerasan jalan, pemilihan tanah – tanah ke dalam kelompok ataupun sekelompok yang menunjukkan sifat atau kelakuan yang sama akan sangat membantu. Pemilihan ini disebut **klasifikasi**. Terdapat tiga sistem klasifikasi yang biasa digunakan, yaitu :

1. Sistem *Unified Soil Classification System*
2. Sistem AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*)



3. Sistem Tekstur

Sistem – sistem ini menggunakan sifat – sifat indeks tanah yang sederhana seperti distribusi ukuran butiran, batas cair dan indeks plastisitas.

2.3.1 Sistem **UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM**

Klasifikasi tanah dari sistem Unified mula pertama diusulkan oleh Casagrande (1942), kemudian direvisi oleh kelompok teksini dari USBR (United State Bureau of Reclamation). Dalam bentuk yang sekarang, sistem ini banyak digunakan oleh berbagai organisasi konsultan geoteknik. Pada klasifikasi sistem butiran ini, tanah dibagi dalam 2 kelompok besar yaitu:

- Tanah berbutir kasar (Course-Grained Soil), yaitu tanah kerikil dan pasir dimana kurang, dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan no. 200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf S atau G. S adalah untuk tanah pasir ataupun tanah berpasir dan G adalah untuk kerikil ataupun tanah kerikil.
- Tanah berbutir halus (Fine-Grained Soil) yaitu tanah dimana lebih dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan no.200. Simbol dari kelompok tanah ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau/silt anorganik. Simbol C untuk lempung/clay anorganik, symbol O untuk lanau dan lempung organik, dan symbol Pt untuk gambut/peat. Simbol-simbol yang digunakan dalam sistem butiran (Sistem Unified) adalah :

- W = Well Graded (tanah bergradasi baik)
- P = Poorly Graded (tanah bergradasi jelek)
- L = Low Plastisity (plastisitas rendah) ($LL < 50$)
- H = High Plastisiry (plastisitas tinggi) ($LL > 50$)

Tanah berbutir kasar ditandai denaan symbol kelompok seperti GW, GM. GC, SW, SP, SM dan SC. Tanah yang diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan subkelompok dapat dilihat dalam **Tabel 2.1**. Prosedur untuk menentukan klasifikasi tanah Sistem Unified yang ditunjukkan pada **Tabel 2.1** adalah sebagai berikut :



- (1) Menentukan apakah tanah berupa butiran halus atau butiran kasar dengan cara menyaring. Caranya yaitu tanah benda uji disaring lewat satu unit saringan standar. Berat tanah yang tinggal pada masing-masing saringan ditimbang, lalu persentase terhadap berat kumulatif dapat dihitung. Contoh nomor-nomor saringan dan diameter lubang dari standar Amerika dapat dilihat pada **Tabel 2.2**, sedang susunan saringan saat pengujian ditunjukkan dalam **Gambar 2.2**. Pada sistem Unified hanya digunakan saringan nomor 200 untuk menentukan apakah tanah berupa butiran kasar atau halus.
- (2) Jika tanah berupa butiran kasar :
 - a) Menyaring tanah tersebut dan menggambar grafik distribusi butirannya.
 - b) menentukan persen butiran lolos saringan no.4. bila persentase butiran yang lolos kurang dari 50%, klasifikasi tanah tersebut sebagai kerikil. Bila persen butiran yang lolos lebih dari 50%, klasifikasikan sebagai pasir.
 - c) menentukan jumlah butiran yang lolos saringan no.200. Jika persentase butiran yang lolos kurang dari 5%, pertimbangkan bentuk grafik distribusi butiran dengan menghitung C_u dan C_c . Jika termasuk bergradasi baik, maka klasifikasikan sebagai GW (bila kerikil) atau SW (bila pasir). Jika termasuk bergradasi buruk, klasifikasikan sebagai GP (bila kerikil) atau SP (bila pasir). Jika persentase butiran yang lolos saringan no.200 diantara 5 sampai 12%, tanah akan mempunyai simbol dobel dan mempunyai sifat keplastisan (GW – GM, SW – SM, dan sebagainya).
 - d) Jika persentase butiran yang lolos saringan no.200 lebih besar 12%, harus dilakukan uji batas-batas Atterberg dengan menyingkirkan butiran tanah yang tinggal dalam saringan no.40. Kemudian, dengan menggunakan diagram plastisitas, ditentukan klasifikasinya (GM, GC, SM, SC, GM – GC atau SM – SC).
- (3) Jika tanah berbutir halus :
 - a) Melakukan uji batas-batas Atterberg dengan menyingkirkan butiran tanah yang tinggal dalam saringan n0.40. jika batas cair lebih dari 50, klasifikasikan sebagai H (plastisitas tinggi) dan jika kurang dari 50, klasifikasikan sebagi L (pastisitas rendah).



- b) Untuk H (plastisitas tinggi), jika plot batas-batas Atterberg pada grafik plastisitas di bawah garis A, maka dapat ditentukan apakah tanah organik (OH) atau anorganik (MH). Jika plotnya jatuh di atas garis A, klasifikasikan sebagai CH.
- c) Untuk L (plastisitas rendah), jika plot batas-batas Atterberg pada grafik plastisitas di bawah garis A pada area yang diarsir, dapat disimpulkan klasifikasi tanah tersebut sebagai organik (OL) atau anorganik (ML) berdasar warna, bau, atau perubahan batas cair dan batas plastisnya dengan mengeringkannya di dalam oven.
- d) Jika plot batas-batas Atterberg pada grafik plastisitas jatuh pada area yang diarsir, dekat dengan garis A atau nilai LL sekitar 50, digunakan simbol dobel.

Cara penentuan klasifikasi tanah Sistem Unified dengan menggunakan diagram alir diperlihatkan dalam **Gambar 2.1**. Prosedur dalam menentukan klasifikasi tanahnya sama halnya dengan **Tabel 2.1**, hanya saja dilakukan dengan diagram alir.

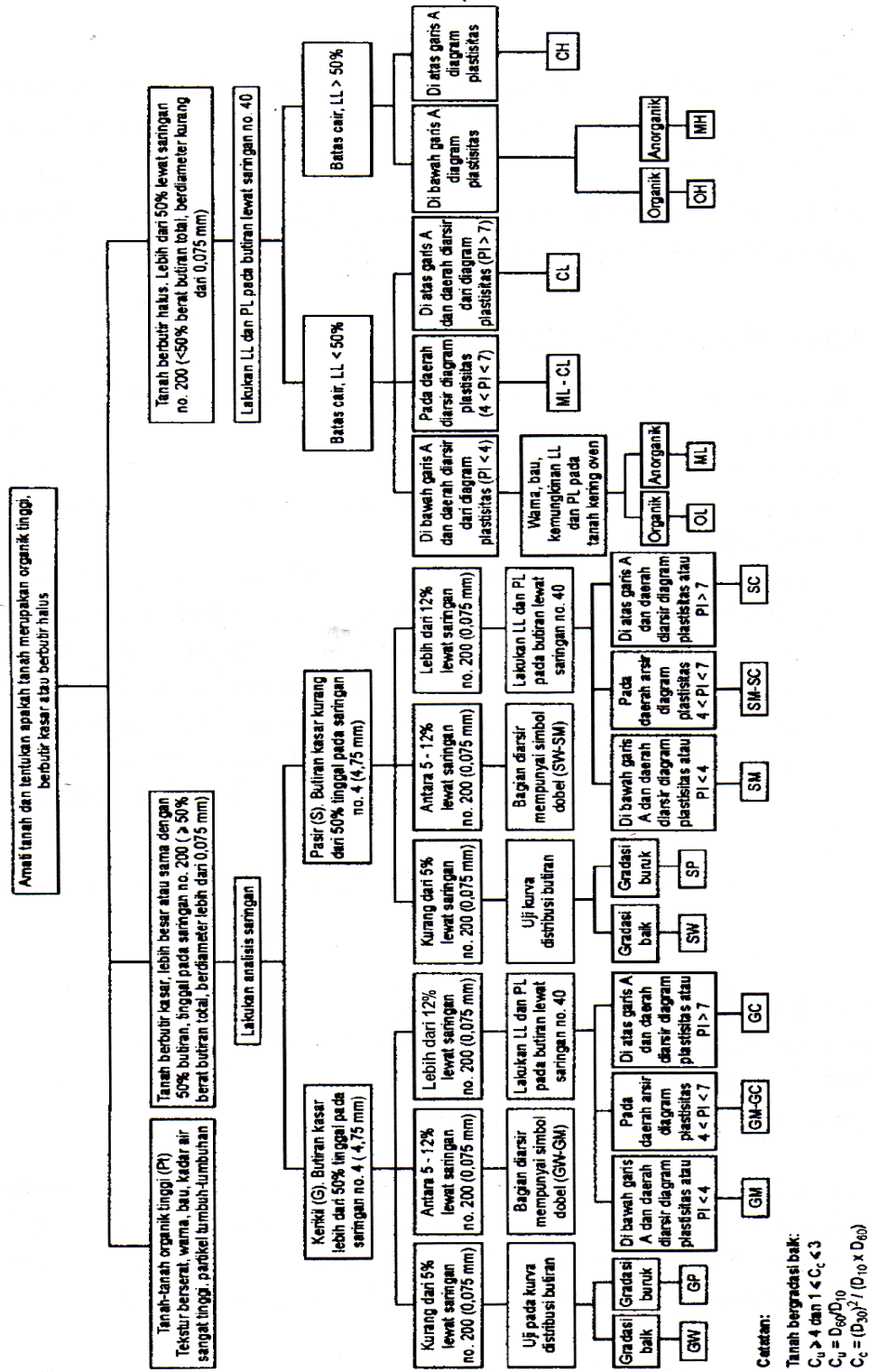


Tabel 2.1 Klasifikasi Tanah Sistem UNIFIED

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Jenis	Nama Jenis	
Tanah berbutir kasar 50% butiran tertahan saringan no. 200 (0,075 mm)	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	GW	Kerikil gradasi baik dan campuran pasir-kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
		GP	Kerikil gradasi buruk dan campuran pasir-kerikil atau tidak mengandung butiran halus		
	Kerikil banyak kandungan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil pasir-lempung	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol	
		GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil/pasir-lempung		
	Kerikil bersih (sedikit atau tak ada butiran halus)	SW	Pasir gradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW	
		SP	Pasir gradasi buruk, pasir kerikil, sedikit atau tidak mengandung butiran halus		
	Pasir lebih dari 50% Traksi kasar lolos saringan no. 4 (4,75 mm)	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau	Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 7$ Bila batas Atterberg berada di daerah arsir dari diagram plastisitas, maka dipakai simbol	
		SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		
	Tanah berbutir halus 50% atau lebih lolos saringan no. 200 (0,075 mm)	Lanau dan lempung batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau tak organik dan pasir sangat halus, serbuk batuan atau pasir halus berlanau atau berlempung	Diagram plastisitas: Untuk mengklasifikasi kadar butiran halus yang terkandung dalam tanah berbutir halus dan tanah berbutir kasar. Batas Atterberg yang termasuk dalam daerah yang arsir berarti batasan klasifikasinya menggunakan dua simbol. Manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat di ASTM Designation D-2488
			CL	Lempung tak organik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus ('lean clays')	
OL			Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah.		
MH		Lanau tak organik atau pasir halus diatomae, lanau elastis.			
OH		Lempung tak organik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk ('fat clays')			
Tanah dengan kadar organik tinggi	PI	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi Gambut ('peat') dan tanah lain dengan kandungan organik tinggi.			



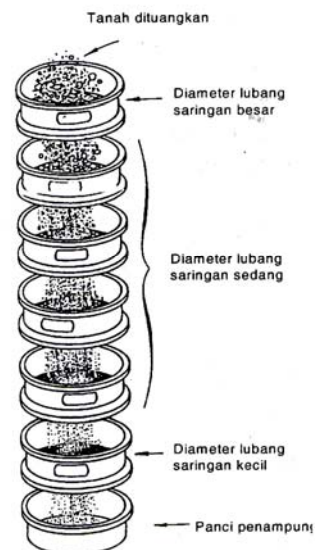
Gambar 2.1 Diagram Alir Sistem Klasifikasi UNIFIED





Tabel 2.2 Saringan Standar Amerika

No. saringan	Diameter lubang (mm)	No. saringan	Diameter lubang (mm)
3	6,35	40	0,42
4	4,75	50	0,30
6	3,35	60	0,25
8	2,36	70	0,21
10	2,00	100	0,15
16	1,18	140	0,106
20	0,85	200	0,075
30	0,60	270	0,053



Gambar 2.2 Uji Saringan

2.3.2 Sistem Klasifikasi AASHTO

Sistem klasifikasi ini dikembangkan pada tahun 1929. Pada sistem ini tanah diklasifikasikan ke dalam tujuh kelompok besar yang dapat dilihat pada **Tabel 2.3**, yaitu A-1 sampai dengan A-7. Pada **Tabel 2.3**, tanah yang diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A-3 adalah tanah berbutir dimana 35% butirannya atau kurang lolos ayakan No.200. Tanah dimana 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 AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) berguna untuk menentukan kualitas tanah dalam perancangan timbunan jalan *subbase* dan *subgrade*. Sistem ini terutama



ditujukan untuk maksud-maksud dalam lingkup tersebut. Sistem AASHTO didasarkan pada kriteria dibawah ini :

1. Ukuran Butir

Kerikil adalah bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3 inci) dan tertahan ayakan No.20 (2 mm). Pasir adalah bagian tanah yang lolos ayakan No.20 (2 mm) dan tertahan ayakan No.200 (0.075 mm). Lanau dan lempung adalah tanah yang lolos ayakan No.200.

2. Plastisitas

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung dipakai bilamana bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 11 atau lebih.

3. Apabila batuan (ukuran >75 mm atau lebih) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnva, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu, tetapi prosentasenya harus tetap dicatat.

Tanah-tanah dalam tiap kelompoknya dievaluasi terhadap indeks kelompoknya yang dihitung dengan rumus-rumus empiris. Pengujian yang digunakan adalah analisis saringan dan batas-batas Atterberg. Indeks kelompok (*group index*) (GI) digunakan untuk mengevaluasi lebih lanjut tanah – tanah dalam kelompoknya. Indeks kelompok dihitung dengan persamaan :

$$GI = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10)$$

dengan,

GI = indeks kelompok (*group index*)

F = persen butiran lolos saringan no.200 (0.075mm)

LL = batas cair

PI = indeks plastisitas

Bila indeks kelompok (GI) semakin tinggi, maka tanah semakin berkurang ketepatan penggunaannya.



Tabel 2.3 Sistem Klasifikasi AASHTO

Klasifikasi Umum	Material Granuler (<35% lolos saringan no.200)						Tanah-tanah lanau-lempung (>35% lolos saringan no.200)				
	A - 1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Klasifikasi kelompok	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Analisis saringan (%lolos) mm (no.10)	50 maks	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
0.425 mm (no.40)	30 maks	50 maks	51 min	-	-	-	-	-	-	-	
0.075 mm (no.200)	15 maks	25 maks	10 maks	35 maks	35 maks	35 maks	35 maks	36 min	36 min	36 min	
Sifat fraksi lolos saringan no.40											
Batas cair (LL)	-	-	-	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min	40 maks	41 min
Indeks Plastis (PI)	6 maks		Np	10 maks	10maks	11 min	11 min	10 maks	10 maks	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 batu		Pasir halus	Kerikil berlanau atau berlempung dan pasir				Tanah berlanau		Tanah berlempung	
Penilaian umum sebagai tanah dasar	Sangat baik sampai baik						Sedang sampai buruk				

Catatan :

Kelompok A-7 dibagi atas A-7-5 dan A-7-6 bergantung pada batas plastisnya (PL)

Untuk PL > 30, klasifikasinya A-7-5

Untuk PL < 30, klasifikasinya A-7-6

Np = Nonplastis



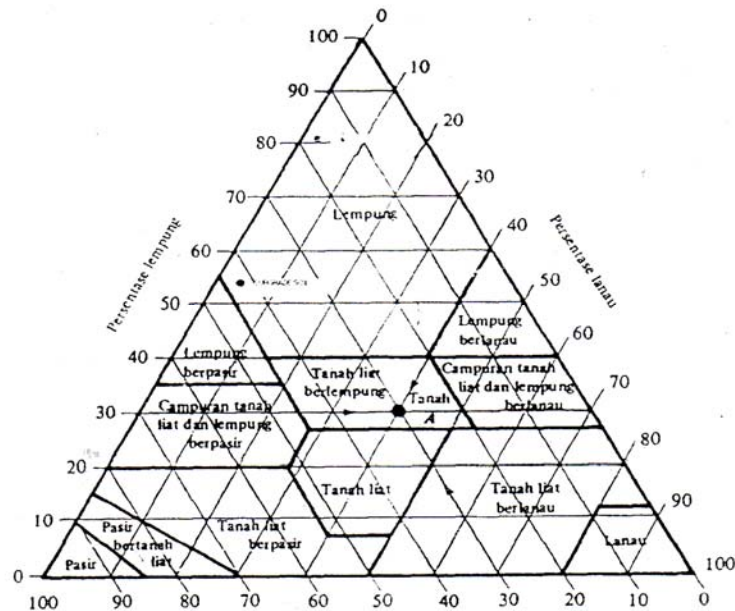
2.3.3 Sistem Tekstur

Dalam pengertian umum, arti dari tekstur adalah keadaan permukaan tanah dari suatu struktur tanah yang bersangkutan. Tekstur tanah dari suatu struktur tanah yang bersangkutan. Tekstur tanah dipengaruhi oleh ukuran tiap-tiap butir tanah. Atas dasar ukuran butir-butirnya tanah dibagi dalam beberapa kelompok, yaitu kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), Lanau (*silt*), dan Lempung (*clay*). Pada umumnya tanah asli merupakan campuran dari butir-butir yang mempunyai ukuran yang berbeda-beda. Dalam sistem klasifikasi tanah berdasarkan tekstur ini, tanah diberi nama atas komponen utama yang dikandungnya, misalnya lempung berpasir (*sandy-clay*), lempung berlanau (*silty-clay*), dan seterusnya.

Beberapa sistem klasifikasi berdasarkan tekstur telah dikembangkan sejak dulu oleh berbagai organisasi guna memenuhi kebutuhan sendiri. Diantaranya sistem tekstur yang berhasil dikembangkan adalah sistem yang digunakan oleh Departemen Pertanian Amerika (USDA). Sistem ini didasarkan pada ukuran batas dari butiran tanah yaitu :

- Pasir : merupakan butiran dengan diameter 2,0 s.d 0,05 mm
- Lanau : merupakan butiran dengan diameter 0,05 s.d 0,002 mm
- Lempung : merupakan butiran dengan diameter lebih kecil dari 0,002 mm

Gambar 2.3 berikut menjelaskan secara jelas tentang sistem USDA ini yang didasarkan pada ukuran batas dari butir tanah.



Gambar 2.3 Klasifikasi tanah berdasarkan tekstur

2.4 Batas Batas Konsistensi

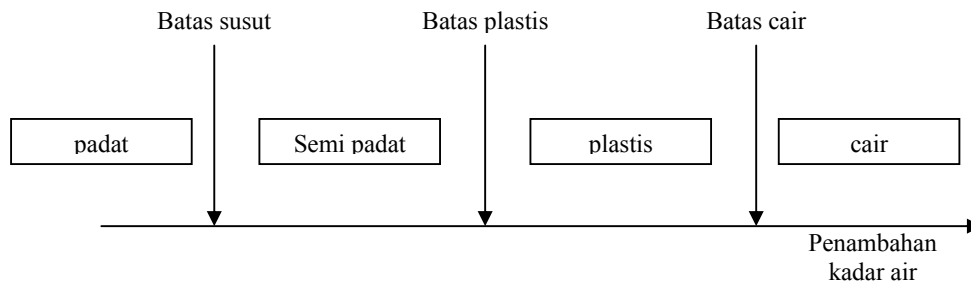
Sitat-sitat dan tanah yang dapat menunjukkan tanah berbutir halus dalam keadaan alami adalah konsistensi. Secara umum konsistensi dinyatakan dalam keadaan seperti : Lembek (soft), sedang, (medium), kaku (stift), dan keras (hard). Tetapi arti keadaan ini akan selalu berubah-ubah dan tergantung pada pendapat seseorang.

Bergantung pada kadar air, tanah dapat berbentuk cair, plastis, semi padat, atau padat. Kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi. Suatu hal yang penting pada tanah berbutir halus adalah sifat plastisitasnya. Plastisitas disebabkan oleh adanya partikel mineral lempung dalam tanah. Istilah plastisitas menggambarkan kemampuan tanah dalam menyesuaikan perubahan bentuk pada volume konstan tanpa retak-retak atau remuk.

Albert Atterberg, seorang ahli kimia asal Swedia yang mengembangkan suatu analisis yang disebut batas – batas Atterberg (*Atterberg Limits*), memberikan cara untuk menggambarkan batas-batas konsistensi dari tanah berbutir halus dengan mempertimbangkan kandungan kadar air tanah. Kedudukan batas – batas konsistensi untuk tanah kohesif ditunjukkan dalam **Gambar 2.4**.



Batas-batas tersebut adalah batas cair (liquid limit), batas plastis (plastic limit), dan batas susut (shrinkage limit).

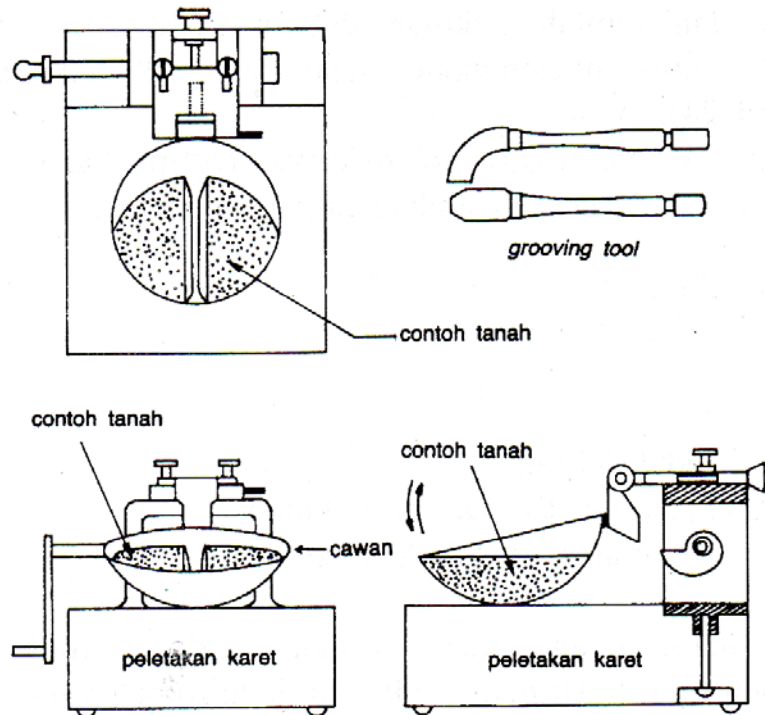


Gambar 2.4 Batas-batas Atterberg

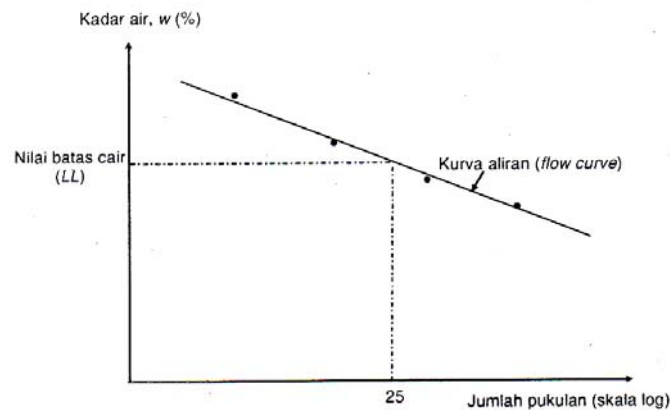
Batas Cair (Liquid Limit)

Batas cair (LL), menyatakan kadar air minimum dimana tanah masih dapat mengalir di bawah beratnya atau kadar air tanah pada batas antara keadaan cair ke keadaan plastis.

Batas cair biasanya ditentukan dari uji Casagrande. Gambar skematis dari alat pengukur batas cair dapat dilihat pada **Gambar 2.5**. Contoh tanah dimasukkan dalam cawan. Tinggi contoh dalam cawan kira-kira 8 mm. Alat pembuat alur / pemisah (*grooving tool*) dikerukkan tepat di tengah-tengah cawan hingga menyentuh dasarnya. Kemudian, dengan alat pengetuk / penggetar, cawan di ketuk-ketukkan pada landasan dengan tinggi jatuh 1 cm. Persentase kadar air yang dibutuhkan untuk menutup celah sepanjang 12,7 mm pada dasar cawan, sesudah 25 kali ketukan, didefinisikan sebagai batas cair tanah tersebut. Oleh karena sulitnya mengatur kadar air pada waktu celah menutup pada 25 kali ketukan, maka biasanya percobaan dilakukan beberapa kali, yaitu dengan kadar air yang berbeda dengan jumlah ketukan yang berkisar antara 15 sampai 35. kemudian, hubungan kadar air dengan jumlah pukulan digambarkan dalam grafik semi logaritmik untuk menentukan kadar air pada 25 kali ketukan (**Gambar 2.6**).



Gambar 2.5 Skema alat uji batas cair



Gambar 2.6 Kurva untuk penentuan batas cair lempung

Kemiringan dari garis dalam kurva didefinisikan sebagai indeks aliran (*flow index*), dan dinyatakan dalam persamaan :

$$I_f = \frac{w_1 - w_2}{\log(N_2 / N_1)}$$

dengan, I_f = indeks aliran

w_1 = kadar air (%) pada N_1 ketukan

w_2 = kadar air (%) pada N_2 ketukan



Dari banyak uji batas-cair, Waterways Experiment Station di Vicksburg, Missipi, mengusulkan persamaan batas cair :

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{tg\beta}$$

dengan, N = jumlah pukulan, untuk menutup celah 0.5 in (12,7 mm)

w_N = kadar air

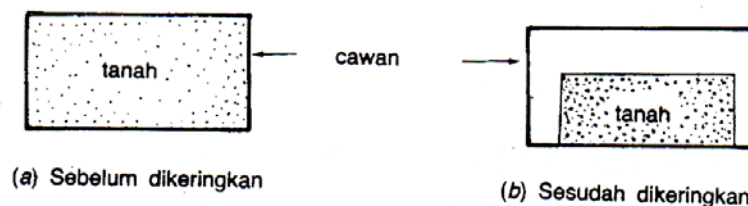
$tg\beta = 0.121$

Batas Plastis (Liquid Limit)

Batas Plastis (PL), menyatakan kadar air minimum dimana tanah masih dalam keadaan plastis atau kadar air minimum dimana tanah dapat digulung-gulung sampai diameter 3,1 mm (1/8 inchi) mulai retak – retak.

Batas Susut (Shrinkage Limit)

Batas Susut (SL), menyatakan batas dimana sesudah kehilangan kadar air, selanjutnya tidak menyebabkan penyusutan volume tanah lagi atau didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat. Percobaan batas susut dilaksanakan dalam laboratorium dengan cawan porselin diameter 44,4 mm dengan tinggi 12,7 mm. Bagian dalam cawan dilapisi dengan pelumas dan diisi dengan tanah jenuh sempurna. Kemudian dikeringkan dalam oven. **Gambar 2.7** menunjukkan perbedaan volume secara visual setelah dikeringkan dalam oven. Volume ditentukan dengan mencelupkannya dengan air raksa.



Gambar 2.7 Uji batas susut



Batas susut dinyatakan dalam persamaan :

$$SL = \left\{ \frac{(m_1 - m_2)}{m_2} - \frac{(v_1 - v_2)\gamma_w}{m_2} \right\} \times 100\%$$

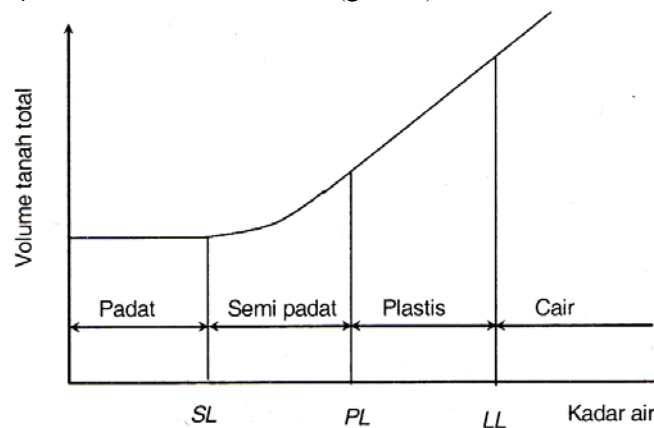
dengan, m_1 = berat tanah basah dalam cawan percobaan (gr)

m_2 = berat tanah kering dalam oven (gr)

v_1 = volume tanah basah dalam cawan (cm^3)

v_2 = volume tanah kering dalam oven (cm^3)

γ_w = berat volume air (gr/cm^3)



Gambar 2.8 Variasi volume dan kadar air

Gambar 2.8 menunjukkan hubungan variasi kadar air dan volume total tanah pada kedudukan batas cair, batas plastis, dan batas susut. Batas – batas Atterberg sangat berguna untuk identifikasi dan klasifikasi tanah. Batas – batas ini sering digunakan secara langsung dalam spesifikasi, guna mengontrol tanah yang akan digunakan untuk membangun struktur timbunan atau urugan.

Indeks Plastisitas (Plasticity Index)

Indeks Plastisitas (PI) adalah selisih batas cair dan batas plastis. Dapat dirumuskan :

$$PI = LL - PL$$

dengan, PI = Indeks Plastisitas

LL = Batas Cair

PL = Batas Plastis



Indeks plastisitas (*PI*) merupakan interval kadar air dimana tanah masih bersifat plasis. Karena itu, indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan tanah. Jika tanah mempunyai *PI* tinggi, maka tanah mengandung banyak lempung. Jika *PI* rendah, seperti lanau, sedikit pengurangan kadar air berakibat tanah menjadi kering. Batasan mengenai indeks plastisitas, sifat, macam tanah, dan kohesi diberikan oleh Atterberg dalam **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Nilai indeks plastisitas dan macam tanah

PI	Sifat	Macam tanah	Kohesi
0	Nonplastis	Pasir	Non kohesif
< 7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
> 7	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Indeks Cair (Liquidity Index)

Indeks cair (Liquidity Index) = L.I, menyatakan perbandingan dalam persentase antara kadar air tanah dikurangi batas plastis dengan indek plastis dan dinyatakan menurut persamaan :

$$LI = \frac{w_N - PL}{LL - PL} = \frac{w_N - PL}{PI}$$

Keterangan : LI = Indeks Cair

w_N = Kadar air di lapangan

Aktivitas

Activity (*A*) tanah lempung didefinisikan sebagai berikut (*Skempton, 1953*) :

$$A = \frac{PI}{\text{fraksi_lempung}}$$

dimana, *PI* adalah indeks plastisitas dan fraksi lempung adalah persentase berat tanah yang berukuran lebih kecil dari 2 μ m. Lempung dengan nilai activity sekitar 1 ($0,75 < A < 1,25$) diklasifikasikan sebagai "normal", $A < 0,75$ termasuk lempung tidak aktif dan $A > 1,25$ termasuk lempung aktif.



Permeabilitas

Tanah adalah butiran padat dan berpori-pori yang saling berhubungan satu sama lain sehingga air dapat mengalir dari suatu titik yang mempunyai energi lebih tinggi ke titik yang mempunyai energi yang lebih rendah. Studi tentang rembesan ini akan sangat berguna untuk menghitung kestabilan sebuah konstruksi akibat dari tanah yang mempunyai kondisi berubah-ubah.

Koefisien rembesan mempunyai satuan yang sama dengan kecepatan. Istilah koefisien rembesan sebagian besar digunakan oleh para ahli teknik tanah (geoteknik) dan para ahli geologi menyebutnya sebagai konduktivitas hidrolik.

Koefisien rembesan tanah tergantung dari beberapa faktor yaitu kebcntalan cairan, distribusi ukuran butir, distribusi ukuran pori, angka pori, kekasaran butiran tanah dan derajat kejenuhan. Pada tanah lempung, struktur tanah memegang peranan penting dalam menentukan koefisien rembesan.

Harga koefisien rembesan (k) untuk tiap-tiap tanah adalah berbeda-beda. Beberapa harga koefisien rembesan diberikan dalam **Tabel 2.5** berikut :

Tabel 2.5 Koefisien Permeabilitas

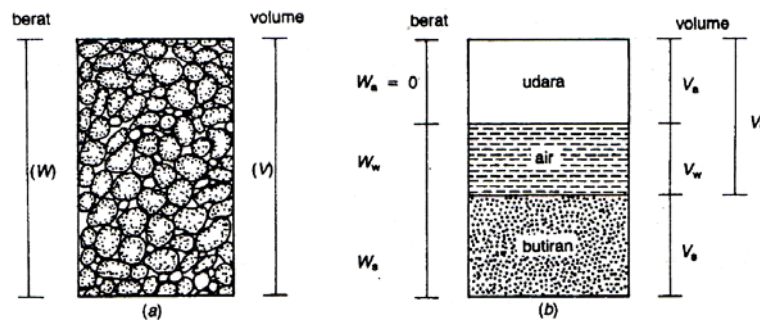
Jenis Tanah	Koefisien Permeabilitas (cm/ detik)
Kerikil halus	1,0 – 100
Pasir kasar	1,0 – 0,01
Pasir halus	0,01 – 0,001
Lanau	0,001 – 0,000001
Lempung	< 0,000001

Kedaaan permeabilitas seperti yang telah dijelaskan diatas berhubungan dengan kemampuan tanah untuk dapat ditembus aliran air. Dari **Tabel 2.5** dapat disimpulkan bahwa kerikil halus yang memiliki nilai koefisien permeabilitas yang paling besar, artinya dalam satu detik, air dapat mengalir hingga kedalaman 1,0-100 cm dari lapisan kerikil halus tersebut.



Berat Volume Tanah dan Hubungannya

Segumpal tanah dapat terdiri dari dua atau tiga bagian. Dalam tanah yang kering, maka tanah hanya terdiri dari dua bagian, yaitu butir-butir tanah dan pori-pori udara. Dalam tanah yang jenuh juga terdapat dua bagian, yaitu bagian padat atau butiran dan air pori. Dalam keadaan tidak jenuh, tanah terdiri dari tiga bagian padat (butiran), pori-pori udara, dan air pori. Bagian-bagian tanah dapat digambarkan dalam bentuk diagram fase ditunjukkan dalam **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Diagram fase tanah

Dari memperhatikan gambar tersebut dapat dibentuk persamaan :

$$W = W_s + W_w$$

$$V = V_s + V_w + V_a$$

$$V_v = V_w + V_a$$

dengan : W_s = berat butiran padat

W_w = berat air

V_s = volume butiran padat

V_w = volume air

V_a = volume udara

Berat udara (W_a) dianggap sama dengan nol. Hubungan-hubungan volume yang sering digunakan dalam mekanika tanah adalah kadar air (w), angka pori (e), porositas (n), dan derajat kejenuhan (S).

Angka Pori (e)

Didefinisikan sebagai perbandingan antara volume ruang kosong dengan volume tanah padat, atau apabila dirumuskan adalah :



$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Keterangan : e = Void ratio

V_v = Volume void dan V_s = Volume solid

Porositas (n)

Porositas merupakan prosentase perbandingan antara volume ruang kosong dan volume total dari tanah. Dalam Teknik Sipil porositas akan mempengaruhi penurunan pada sebuah konstruksi. Ada dua rumus yang dapat digunakan untuk mencari nilai porositas ini, yaitu :

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100\%$$

$$n = \frac{e}{(1+e)}$$

Keterangan : V_v = volume void

V_t = volume total

e = void ratio

Tabel 2.6 Perbandingan Void Ratio dengan Porositas

Jenis Tanah	e (void ratio)	n (porositas)
Lempung busuk dan gambut	2,33 – 9,00	70 – 90%
Lempung kotor, secara geologis sangat muda	1,55 – 9,00	60 – 90%
Lempung halus	1,00 – 2,33	50 – 70%
Lempung kaku	0,54 – 1,00	35 – 50%
Lempung keras	0,25 – 0,54	20 – 35%
Loam dan lempung batu	0,33 – 0,43	25 – 30%
Pasir seragam	0,43 – 1,00	30 – 50%
Pasir kerikil	0,33 – 0,54	25 – 35%

Dari **Tabel 2.6** dapat disimpulkan bahwa semakit besar nilai angka pori maka porositas dari tanah juga akan besar. Semakin besar penambahan nilai e maka akan semakin besar juga kenaikan nilai n.



2.6.3 Kadar Air (w)

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

Suatu hal yang penting untuk mengetahui beberapa banyak air yang terkandung oleh tanah adalah tujuan teknis. Kadar air untuk tanah biasanya berada dalam kisaran dibawah 60%. Berikut ini ditampilkan kadar air untuk kebanyakan tanah sebagai berikut (**Tabel 2.7**):

Tabel 2.7 Kadar Air dalam Tanah

Jenis tanah	Kadar air (w)
Pasir lembab	2 – 10%
Lempung sedikit organik	2 – 10%
Lempung organik	20 – 60%

Pada **Tabel 2.7** dapat dilihat bahwa lempung organic memiliki nilai kadar air (w) yang paling besar karena daya simpan lempung terhadap air lebih besar dibanding jenis-jenis tanah yang lainnya.

2.6.4 Derajat Kejenuhan (s)

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\%$$

Persamaan ini menyatakan perbandingan dari air yang ada dalam pori-pori terhadap jumlah total air yang dapat terkandung secara penuh dalam semua pori-pori. Pemeriksaan dan persamaan menunjukkan bahwa jika tanah kering (tidak ada air) maka tanah akan mempunyai derajat kejenuhan 0 % dan jika semua pori terisi oleh air maka tanah tersebut dinyatakan mempunyai derajat kejenuhan 100%.

Tabel 2.8 menunjukkan berbagai macam derajat kejenuhan tanah untuk maksud klasifikasi.



Tabel 2.8 Derajat kejenuhan dan kondisi tanah

Keadaan tanah	Derajat kejenuhan (S)
Tanah kering	0
Tanah agak lembab	> 0 - 0,25
Tanah lembab	0,26 - 0,50
Tanah sangat lembab	0,51 - 0,75
Tanah basah	0,76 - 0,99
Tanah jenuh air	1

2.6.5 Berat Volume Basah (γ_b)

Berat volume basah atau lembab (γ_b), adalah perbandingan antara berat butiran tanah termasuk air dan udara (W) dengan volume total tanah(V).

$$\gamma_b = \frac{W}{V}$$

Dengan $W = W_w + W_s + W_a$ (dengan $W_a = 0$). Bila ruang udara terisi oleh air seluruhnya ($V_a = 0$), maka tanah menjadi jenuh.

2.6.6 Berat Volume Kering (γ_d)

Berat volume kering (γ_d), adalah perbandingan antara berat butiran (W_s) dengan volume total (V) tanah.

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

2.6.7 Berat Volume Butiran Padat (γ_s)

Berat volume butiran padat (γ_s), adalah perbandingan antara berat butiran padat (W_s) dengan volume butiran padat (V_s).

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$



2.6.8 Berat jenis / specific gravity (G_s)

Defenisi dasar dari berat jenis adalah perbandingan antara berat jenis butir tanah dengan volume butir pada temperature tertentu, atau dapat dihitung menurut persamaan sebagai berikut :

$$G_s = \frac{\text{Berat dari volume satuan dari setiap material}}{\text{Berat volume satuan dari air pada suhu } 4^0 C} = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

G_s tidak berdimensi. Secara tipikal, berat jenis berbagai jenis tanah berkisar antara 2,65 sampai 2,75. berat jenis $G_s = 2,67$ biasanya digunakan untuk tanah-tanah tidak berkohesi atau tanah granuler, sedang untuk tanah-tanah kohesif tidak mengandung bahan organik G_s berkisar di antara 2,68 sampai 2,72. Nilai – nilai berat jenis dari berbagai tanah diberikan dalam **Tabel 2.9**.

Tabel 2.9 Berat jenis tanah (specific gravity)

Macam tanah	Berat jenis
Kerikil	2,65 – 2,68
Pasir	2,65 – 2,68
Lanau anorganik	2,62 – 2,68
Lempung organik	2,58 – 2,65
Lempung anorganik	2,68 – 2,75
Humus	1,37
Gambut	1,25 – 1,80

2.7 Regangan / Deformasi Elastis Tanah

Terjadinya penurunan disebabkan kondisi mekanik tanah yang dipengaruhi beberapa hal, yaitu berupa terjadinya regangan dan keruntuhan geser akibat adanya pembebanan di atas lapisan tanah.

Jika Lapisan tanah mengalami pembebanan maka lapisan tanah akan mengalami regangan yang hasilnya berupa penurunan (settlement). Tegangan yang terjadi dalam tanah ini disebabkan oleh berubahnya susunan tanah maupun pengurangan rongga pori/ air di dalam tanah tersebut. Jumlah dari regangan sepanjang kedalaman lapisan merupakan penurunan total tanahnya. Penurunan



akibat beban adalah jumlah total dari penurunan segera (*immediately settlement*) dan penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*).

Penurunan yang terjadi pada tanah berbutir kasar dan halus yang kering atau tak jenuh terjadi dengan segera sesudah penerapan bebannya. Penurunan pada kondisi ini disebut penurunan segera. Penurunan segera merupakan penurunan bentuk elastis. Dalam prakteknya sangat sulit memperkirakan besarnya penurunan. Hal ini tidak hanya karena tanah dalam kondisi alamnya tidak homogen dan anistropis dengan modulus elastisitas yang bertambah dengan kedalamannya, tetapi juga terdapat kesulitan dalam mengevaluasi kondisi tegangan dan regangan di lapisannya.

Penurunan tanah yang mengalami pembebanan, secara garis besar diakibatkan oleh konsolidasi. Konsolidasi merupakan gejala yang menggambarkan deformasi yang tergantung pada waktu dalam suatu medium berpori jenuh seperti tanah yang mengalami pembebanan (*eksternal*). Bahan akan berdeformasi seiring dengan waktu ketika cairan atau air dalam pori secara sedikit demi sedikit berdifusi.

Penurunan konsolidasi adalah penurunan yang terjadi memerlukan waktu yang lamanya tergantung pada kondisi lapisan tanahnya. Penurunan konsolidasi dapat dibagi dalam tiga fase dimana :

1. Fase awal, yaitu fase dimana terjadi penurunan segera setelah bekerja. Disini terjadi proses penekanan udara keluar dari tanahnya. Proporsi penurunan awal dapat diberikan dalam perubahan angka pori dan dapat ditentukan dari kurva waktu terhadap penurunan dari penyujian konsolidasi.
2. Fase konsolidasi primer atau konsolidasi hidrodinamis, yaitu penurunan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran air yang meninggalkan tanahnya akibat adanya tekanan. Proses konsolidasi primer sangat dipengaruhi oleh sifat tanahnya seperti permeabilitas, kompresibilitas angka pori, bentuk geometri tanah termasuk tebal lapisan mampat, pengembangan arah horizontal dan zona mampat dan batas lapisan lolos air, dimana air keluar menuju lapisan lolos air.



3. Fase konsolidasi sekunder, merupakan lanjutan dari proses konsolidasi primer, dimana proses berjalan sangat lambat. Penurunan jarang diperhitungkan karena biasanya sangat kecil. Kecuali pada jenis tanah organik tinggi dan beberapa lempung tak organik yang sangat mudah mampat.

Penurunan total adalah jumlah penurunan segera dan penurunan konsolidasi. Bila dinyatakan dalam bentuk persamaan, penurunan total adalah:

$$\begin{aligned} O &= S_i + S_c + S_s \text{ dengan :} \\ S &= \text{penurunan total} \\ S_i &= \text{penurunan segera} \\ S_c &= \text{penurunan akibat konsolidasi primer} \\ S_s &= \text{penurunan akibat konsolidasi sekunder} \end{aligned}$$

2.8 Penurunan Segera (immediate settlement)

Penurunan segera atau penurunan elastis dari suatu pondasi terjadi segera setelah pemberian beban tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan kadar air. Besarnya penurunan ini bergantung pada ketentuan dari pondasi dan tipe material dimana pondasi itu berada.

Suatu pondasi lentur yang memikul beban merata dan terletak di atas material yang elastis (seperti lempung jenuh) akan mengalami penurunan elastis berbentuk cekung. Tetapi bila pondasi tersebut kaku dan berada di atas material yang elastis seperti lempung, maka tanah di bawah pondasi itu akan mengalami penurunan yang merata dan tekanan pada bidang sentuh akan mengalami pendistribusian ulang.

Bentuk penurunan dan distribusi tekanan pada bidang sentuh antara pondasi dan permukaan tanah seperti yang dijelaskan diatas adalah benar apabila modulus elastisitas dan tanah tersebut adalah konstan untuk seluruh kedalaman lapisan tanah.

Hasil pengujian SPT (Standart Penetration Test) yang dilakukan oleh Meyerhoff untuk tanah pasir pada tahun 1965, telah diperbaiki oleh Bowles pada



tahun 1977 dan menghasilkan persamaan guna menghitung penurunan segera. Persamaan tersebut adalah :

$$S_i = \frac{6q}{N} \left(\frac{B}{B+1} \right)^2 \quad \text{untuk } B > 1.2 \text{ m}$$

Berdasarkan analisis data lapangan dari Schultze dan Sherif (1973). Meyerhof (1974) yang dikutip oleh “Soedarmo G. D. dan Purnomo, S.J.E. 1997. *Mekanika Tanah 1 dan Mekanika Tanah 2*, Penerbit Kanisius”, memberikan hubungan empiris untuk penurunan pada pondasi dangkal sebagai berikut :

$$S_i = \frac{q\sqrt{B}}{N}$$

Keterangan :

- S_i = penurunan dalam inci
 q = intensitas beban yang diterapkan dalam Ton/ft²
 B = lebar pondasi dalam inci

2.9 Penurunan Konsolidasi (consolidation settlement)

Bila suatu lapisan tanah jenuh yang permeabilitasnya rendah dibebani, maka tekanan air pori dalam tanah tersebut akan bertambah. Perbedaan tekanan air pori pada lapisan tanah, berakibat air mengalir ke lapisan tanah yang tekanan air porinya lebih rendah, yang diikuti proses penurunan tanahnya. Karena permeabilitasnya rendah akibat pembebanan, dimana prosesnya dipengaruhi oleh kecepatan terlepasnya air pori keluar dari rongga tanah.

Penambahan beban di atas permukaan tanah dapat menyebabkan lapisan tanah di bawahnya mengalami pemampatan. Pemampatan tersebut disebabkan karena adanya deformasi partikel tanah, keluarnya air atau udara dari dalam pori. Faktor-faktor tersebut mempunyai hubungan dengan keadaan tanah yang bersangkutan.

Bilamana suatu lapisan tanah jenuh air diberi penambahan beban, angka tekanan air pori akan naik secara mendadak. Keluarnya air dari dalam pori selalu disertai dengan berkurangnya volume tanah yang menyebabkan penurunan lapisan tanah tersebut. Bila suatu lapisan tanah diberi penambahan tegangan, maka



penambahan tegangan akan diteruskan ke air pori dan butiran tanah. Hal ini berarti bahwa penambahan tegangan akan terbagi sebagian ke tegangan efektif dan sebagian lagi ke tegangan air pori. Secara prinsip dapat dirumuskan :

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_e + \Delta\mu$$

Keterangan :

$\Delta\sigma$ = penambahan tekanan total

$\Delta\sigma_e$ = penambahan tekanan efektif

$\Delta\mu$ = penambahan tekanan pori

Tanah lempung mempunyai daya rembesan yang sangat rendah, dan air adalah zat yang tidak begitu termampatkan dibandingkan dengan butiran tanah. Oleh karena itu pada saat $t = 0$, seluruh penambahan tegangan $\Delta\sigma$ akan dipikul oleh air sehingga $\Delta\sigma = \Delta\mu$ pada seluruh kedalaman lapisan tanah. Tidak sedikitpun dari penambahan tegangan tersebut akan dipikul oleh butiran tanah (jadi penambahan tegangan efektif $\Delta\sigma_e = 0$).

Sesaat setelah penambahan tegangan, air dalam ruang pori mulai tertekan dan akan mengalir keluar dalam dua arah menuju lapisan pasir. Dalam proses ini, tekanan air pori pada tiap kedalaman akan berkurang secara perlahan dan tegangan yang dipikul oleh butiran tanah akan bertambah. Jadi pada saat $0 < t < \infty$.

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_e + \Delta\mu \quad (\Delta\sigma_e > 0 \text{ dan } \Delta\mu < \Delta\sigma)$$

Secara teori, pada saat $t = \infty$, seluruh kelebihan tekanan air pori sudah hilang dari lapisan tanah lempung, jadi $\Delta\mu = 0$, sekarang penambahan tegangan total akan dipikul oleh butir tanah, jadi: $\Delta\sigma = \Delta\sigma_e$. Proses keluarnya air dari dalam pori-pori tanah, sebagai akibat dari penambahan beban, yang disertai dengan pemindahan kelebihan tekanan air ke tegangan efektif akan menyebabkan terjadinya penurunan.

Untuk menghitung penurunan akibat konsolidasi primer dapat digunakan rumus:

- a. Penurunan untuk lempung *normally consolidated* ($p_c' = p_o'$)

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log \left(\frac{P_o + \Delta p}{P_o} \right)$$

Bila didefinisikan $p_1' = p_o' + \Delta p$, maka :



$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$

- b. Untuk lempung *overconsolidated* ($p_c' > p_0'$) penurunan konsolidasi primer total dinyatakan oleh persamaan yang bergantung nilai p_1' .

1. Bila $p_1' < p_c'$

$$S_c = \frac{C_r \cdot H}{1 + e_0} \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right)$$

2. Bila $p_1' > p_c'$

$$S_c = C_r \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{P_1}{P_0} + C_c \frac{H}{1 + e_0} \log \frac{P_1}{P_c}$$

Keterangan :

S_c	=	besar penurunan lapisan tanah akibat konsolidasi
C_c	=	indeks pemampatan (<i>compression index</i>)
C_r	=	indeks pemampatan kembali (<i>recompression index</i>)
H	=	tebal lapisan tanah
e_0	=	angka pori awal
P_0	=	tekanan efektif rata-rata
Δp	=	besar penambahan tekanan

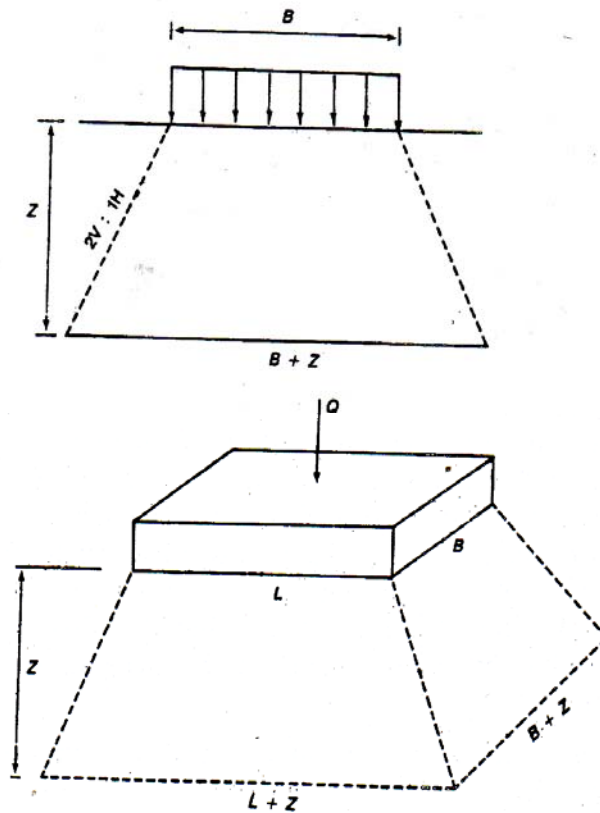
Untuk menghitung indeks pemampatan lempung yang terstruktur tanahnya belum terganggu belum rusak, menurut “Terzaghi, K., and Peck, R. B., 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice. A Wiley International Edition, 729 p”, seperti yang dikutip Braja M. Das (1993) menyatakan penggunaan rumus empiris sebagai berikut :

$C_c = 0,009 (LL-10)$, dengan LL adalah Liquid Limit dalam persen.

Salah satu pendekatan yang sangat sederhana untuk menghitung tambahan tegangan beban di permukaan diberikan Boussinesq. Caranya adalah dengan membuat garis penyebaran beban 2V : 1H (2 vertikal berbanding 1 Horizontal).

Gambar 2.10 menunjukkan garis penyebaran beban.

Dalam cara ini dianggap beban pondasi Q didukung oleh pyramid yang mempunyai kemiringan sisi 2V : 1H.



Gambar 2.10 Penyebaran Beban 2V : 1H

Tambahan tegangan vertikal dinyatakan dalam persamaan : y.

$$\Delta p = \frac{q \cdot L \cdot B}{((L + Z)(B - Z))}$$

Keterangan :

- Δp = hambatan tegangan vertikal
- Q = beban total pada dasar pondasi
- q = beban terbagi rata pada dasar pondasi
- L = panjang pondasi
- B = lebar pondasi
- Z = kedalaman yang ditinjau



Tabel 2.10 Nilai Perkiraan Modulus Elastisitas Tanah

Macam	E (kg/cm ²)
Lempung	3 – 30
Sangat lunak	20 – 40
Sedang	45 – 90
Keras	70 – 200
Berpasir	600 – 425

Sumber : “Bowles, J.E. 1992.

Tabel 2.11 Nilai Perkiraan Angka poisson tanah (μ)

Macam Tanah	(μ)
Lempung Jenuh	0,4 – 0,5
Lempung Tak Jenuh	0,1 – 0,3
Lempung Berpasir	0,2 – 0,3
Lanau	0,3 – 0,35
Pasir Padat	0,2 – 0,4
Pasir Kasar (e = 0,4 – 0,7)	0,15
Pasir Halus (e = 0,4 – 0,7)	0,25
Batu	0,1 – 0,4
Loes	0,1 – 0,3

Sumber : “Bowles, J.E. 1992.

Pada **Tabel 2.10** dan **Tabel 2.11** digambarkan mengenai nilai E (Modulus Young) dan (μ) (angka Poisson) tanah, angka ini dibutuhkan dalam perhitungan besarnya penurunan segera. Nilai E menunjukkan kemampuan tanah terhadap menahan regangan dan tegangan. Sedangkan angka Poisson didapat dari pengukuran regangan kompresi Aksial dan regangan lateral selama pengujian triaksial.



2.10 Kecepatan Waktu Penurunan

Lamanya waktu penurunan yang diperhitungkan adalah waktu yang dibutuhkan oleh tanah untuk melakukan proses konsolidasi. Hal ini dikarenakan proses penurunan segera (immediate settlement) berlangsung sesaat setelah beban bekerja pada tanah ($t = 0$). Waktu penurunan akibat Proses konsolidasi primer tergantung pada besarnya kecepatan konsolidasi tanah lempung yang dihitung dengan memakai koefisien konsolidasi (C_v), panjang aliran rata-rata yang harus ditempuh air pori selama proses konsolidasi (H_{dr}) serta faktor waktu (T_v).

Faktor waktu (T_v) ditentukan berdasarkan derajat konsolidasi (u) yang merupakan perbandingan penurunan yang telah terjadi akibat konsolidasi (S_{et}) dengan penurunan konsolidasi total (S_c), dimana S_{et} adalah besar Penurunan aktual saat ini (S_t) dikurangi besar penurunan segera (S_i).

$$U = \frac{S_{et}}{S_t} = \frac{S_t - S_i}{S_c} \text{ Cassagrande (1938) dan Taylor (1948) yang dikutip dari}$$

Braja M. Das (1993) memberikan hubungan U dan T_v sebagai berikut :

$$\text{Untuk } u < 60\% ; T_v = \left(\frac{\pi}{4}\right)U^2$$

$$\text{Untuk } u > 60\% : T_v = 1,781 - 0,933 \log (100 - U\%)$$

Untuk menghitung waktu konsolidasi digunakan persamaan berikut :

$$T = \frac{T_v H_1^2}{C_{v_1}}$$

Panjang aliran rata-rata ditentukan sebagai berikut :

- untuk tanah dimana air porinya dapat mengalir kearah atas dan bawah, maka H_{dr} sama dengan setengah tebal lapisan tanah yang mengalami konsolidasi.
- untuk tanah dimana air porinya hanya dapat mengalir keluar dalam satu arah saja, maka H_{dr} sama dengan tebal lapisan tanah yang mengalami konsolidasi.

2.11 Keruntuhan Geser Akibat Terlampauinya Daya Dukung Tanah

Analisa daya dukung tanah mempelajari kemampuan tanah dalam mendukung beban pondasi yang bekerja diatasnya. Dalam perencanaan biasanya diperhitungkan agar pondasi tidak menyebabkan timbulnya tekanan yang



berlebihan pada tanah dibawahnya, karena tekanan yang berlebihan dapat mengakibatkan penurunan yang besar bahkan dapat menyebabkan keruntuhan. Jika beban yang diterapkan pada tanah secara berangsur ditambah, maka penurunan pada tanah akan semakin bertambah. Akhirnya pada waktu tertentu, terjadi kondisi dimana beban tetap, pondasi mengalami penurunan Kondisi ini menunjukkan bahwa keruntuhan daya dukung tanah telah terjadi.

Gambar Kurva penurunan yang terjadi terhadap besarnya beban yang diterapkan diperlihatkan oleh **Gambar 2.11** mula-mula pada beban yang diterapkan, penurunan yang terjadi kira-kira sebanding dengan bebannya. Hal ini digambarkan sebagai kurva yang mendekati kondisi garis lurus yang menggambarkan hasil distorsi elastis dan pemampatan tanah. Bila beban bertambah terus, pada kurva terjadi suatu lengkungan tajam yang dilanjutkan dengan garis lurus kedua dengan kemiringan yang lebih curam. Bagian ini menggambarkan keruntuhan geser telah terjadi pada tanahnya. Daya dukung ultimate (ultimate bearing capacity) didefinisikan sebagai beban maksimum persatuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban dengan tanpa mengalami keruntuhan. Bila dinyatakan dalam persamaan, maka :

$$q_u = \frac{pu}{A}$$

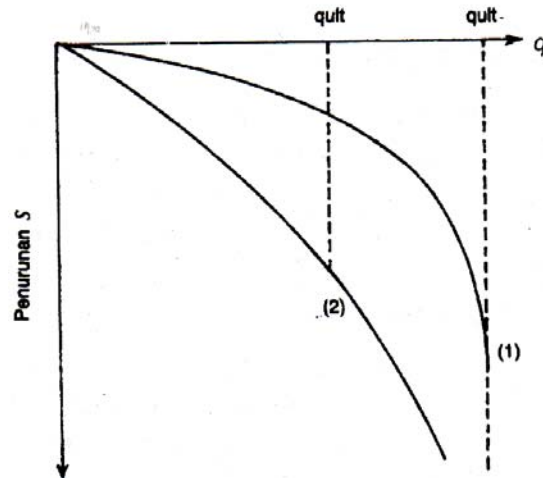
keterangan :

q_u = daya dukung ultimate atau daya dukung batas

pu = beban ultimate atau beban batas

A = luas area beban

Jika tanah padat, sebelum terjadi keruntuhan didalam tanahnya, penurunan kecil dan bentuk kurva penurunan beban akan seperti yang ditunjukkan kurva 1 dalam **Gambar 2.11**, kurva 1 menunjukkan kondisi keruntuhan geser umum (general shear failure). Saat beban ultimate tercapai, tanah melewati fasa kedudukan keseimbangan plastis. Jika tanah sangat tidak padat atau lunak, penurunan yang terjadi sebelum keruntuhan sangat besar. Keruntuhannya terjadi sebelum keseimbangan plastis sepenuhnya dapat dikerahkan seperti yang ditunjukkan kurva 2. Kurva 2 menunjukkan keruntuhan geser lokal (local shear failure).



Gambar 2.11 Kurva Penurunan Terhadap Beban yang Diterapkan.

Untuk menghitung daya dukung ultimate dari tanah dapat digunakan rumus :

$$q_{ult} = c N_c + \gamma \cdot D_f \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma ; \text{ untuk pondasi jalur}$$

$$S_f = \frac{q_{ult}}{q_{beban}}$$

Keterangan :

c = kohesi

q = γD_f = tekanan efektif overburden

γ = berat volume tanah

B = lebar fondasi

Sf = faktor keamanan

N_c, N_q, N_γ = faktor kapasitas dukung tanah (fungsi ϕ)

Faktor N_γ adalah faktor kapasitas dukung yang disebabkan oleh berat tanah yang merupakan fungsi dari sudut gesek dalam tanah (ϕ).

$$N_\gamma = \frac{\tan \phi}{2} \left\{ \frac{K p \gamma}{\cos^2 \phi} - 1 \right\}$$

Tekanan tanah pasif akibat kohesi dan beban terbagi rata secara sama dapat ditentukan, jika berat volume dianggap tidak berpengaruh terhadap bentuk zona longsor. Hasilnya dinyatakan oleh persamaan :

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi$$



$$Nq = \frac{a^2}{2 \cos^2(45^\circ + \Theta/2)}$$

$$a = e^{90,75\gamma - \Theta/2}$$

Faktor kapasitas dukung N_c dan N_q merupakan faktor kapasitas dukung akibat pengaruh kohesi dan beban terbagi rata yang keduanya merupakan fungsi dari sudut gesek. Nilai – nilai dari N_γ , N_c , N_q dalam bentuk nilai – nilai numerik ditunjukkan dalam **Tabel 2.12**.

Tabel 2.12 Faktor Daya Dukung Terzaghi

Θ (sudut geser)	N_c	N_q	N_γ	K_{py}
0	5,71	1,0	0,0	10,8
5	7,30	1,6	0,5	12,2
10	9,60	2,7	1,2	14,7
15	12,90	4,4	2,5	18,6
20	17,70	7,4	5,0	25,0
25	25,10	12,7	9,7	35,0
30	37,20	22,5	19,7	52,0
34	52,60	36,5	36,0	-
35	57,80	41,4	42,4	82,0
40	95,70	81,3	100,4	141,0
45	172,30	173,2	297,5	298,0
48	258,30	287,9	780,1	-
50	347,50	415,1	1153,2	800,0

Pada **Tabel 2.12** menggambarkan nilai N_c , N_q , N_γ , K_{py} dari setiap sudut geser tanah. Semakin besar sudut geser tanah maka nilai-nilai koefisien daya dukung Terzaghi juga akan semakin besar. Untuk angka sudut geser yang tidak ada di tabel diatas dapat dilakukan dengan cara interpolasi.



2.12 Pengaruh Lalu Lintas

2.12.1 Klasifikasi Menurut Kelas Jalan

Jalan dibagi dalam kelas-kelas yang penetapannya didasarkan pada kemampuan jalan untuk menerima beban lalu lintas yang dinyatakan dalam muatan sumbu terberat (MST) dalam satuan Ton. Dalam “Tata Cara Perencanaan Geometrik untuk Jalan Antar Kota tahun 1997”, klasifikasi dan fungsi jalan dibedakan seperti pada **Tabel 2.13** berikut :

Tabel 2.13 Klasifikasi Menurut Kelas Jalan

FUNGSI	KELAS	MUATAN SUMBU TERBERAT (TON)
ARTERI	I	10
	II	10
	III A	8
KOLEKTOR	III A	8
	III B	8

Sumber : Direktorat Jenderal Bina Marga (1997)

Klasifikasi jalan dibedakan menurut beberapa hal diantaranya :

1) Berdasarkan Fungsi Jalan, terbagi atas :

Jalan Arteri yaitu jalan yang melayani angkutan umum dengan ciri-ciri perjalanan jauh, kecepatan tinggi rata-rata dan jumlah jalan yang masuk dibatasi secara efisien.

Jalan Kolektor yaitu jalan yang melayani angkutan pengumpul/pembagi dengan ciri-ciri perjalanan sedang kecepatan rata-rata sedang, dan jumlah jalan masuk dibatasi.

Jalan Lokal yaitu jalan yang melayani angkutan setempat dengan ciri-ciri perjalanan jarak dekat, kecepatan rata-rata rendah, dan jumlah jalan masuk dibatasi.

2) Berdasarkan Kelas Jalan, terbagi atas :

Jalan Utama (Kelas I) adalah jalan raya yang melayani lalu lintas yang tinggi antara kota-kota yang penting/antara pusat-pusat produksi ekspor.



Jalan Sekunder (Kelas II) adalah jalan raya yang melayani lalu lintas yang cukup tinggi antara kota-kota penting dan kota-kota yang lebih kecil serta melayani daerah sekitar.

Jalan Penghubung (Kelas III) adalah jalan untuk keperluan aktivitas daerah yang juga dipakai sebagai jalan penghubung antara jalan-jalan yang sama atau berlainan.

3) Berdasarkan Administrasi Pemerintahan, terbagi atas :

Jalan nasional merupakan jalan arteri dan jalan kolektor dalam sistem jaringan jalan primer yang menghubungkan antaribukota provinsi, dan jalan strategis nasional, serta jalan tol.

Jalan provinsi merupakan jalan kolektor dalam sistem jaringan jalan primer yang menghubungkan ibukota provinsi dengan ibukota kabupaten/kota, atau antaribukota kabupaten/kota, dan jalan strategis provinsi.

Jalan kabupaten merupakan jalan lokal dalam sistem jaringan jalan primer yang tidak termasuk jalan yang menghubungkan ibukota kabupaten dengan ibukota kecamatan, antaribukota kecamatan, ibukota kabupaten dengan pusat kegiatan lokal, antarpusat kegiatan lokal, serta jalan umum dalam sistem jaringan jalan sekunder dalam wilayah kabupaten, dan jalan strategis kabupaten.

Jalan kota adalah jalan umum dalam sistem jaringan jalan sekunder yang menghubungkan antarpusat pelayanan dalam kota, menghubungkan pusat pelayanan dengan persil, menghubungkan antarpersil, serta menghubungkan antarpusat permukiman yang berada di dalam kota.

Jalan desa merupakan jalan umum yang menghubungkan kawasan dan/atau antarpermukiman di dalam desa, serta jalan lingkungan.

Klasifikasi kelas jalan juga dapat ditentukan berdasarkan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) dalam smp.

2.12.2 Lalu Lintas Harian Rata-rata

Lalu Lintas Harian rata-rata adalah jumlah kendaraan yang melewati satu titik dalam satu ruas dengan pengamatan selama satu tahun dibagi 365 hari.



Besarnya LHR akan digunakan sebagai dasar perencanaan jalan dan evaluasi lalu lintas pada masa yang akan datang. Untuk memprediksi jumlah LHR pada tahun rencana, digunakan persamaan regresi :

$$Y = a + bX$$

$$b = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{n \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{\sum Y - \sum X * b}{n}$$

$$i = \left[\frac{LHR_n - LHR_{(n-1)}}{LHR_{(n-1)}} \right] \times 100\%$$

$$R = \frac{(1+i)^{UR} - 1}{i}$$

Keterangan :

Y = Volume Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR)

X = Tahun ke-

A dan b = konstanta

LHR_n = lalu lintas harian rata-rata pada tahun n

n = jumlah tahun

i = pertumbuhan lalu lintas

R = faktor pertumbuhan lalu lintas

UR = Umur rencana (tahun)

Rumus faktor pertumbuhan lalu – lintas (R) di atas dirangkum dalam **Tabel 2.14**.

Tabel 2.14 Faktor pertumbuhan lalu-lintas (I)

Umur Rencana (Tahun)	Laju Pertumbuhan (i) per tahun (%)					
	0	2	4	6	8	10
5	5	5,2	5,4	5,6	5,9	6,1
10	10	10,9	12	13,2	14,5	15,9
15	15	17,3	20	23,3	27,2	31,8
20	20	24,3	29,8	36,8	45,8	57,3
25	25	32	41,6	54,9	73,1	98,3
30	30	40,6	56,1	79,1	113,3	164,5
35	35	50	73,7	111,4	172,3	271
40	40	60,4	95	154,8	259,1	442,6

Sumber : Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah, (2003)



2.12.3 Volume Lalu Lintas

Volume lalu lintas adalah banyaknya kendaraan yang melintas di suatu titik pada suatu ruas jalan dengan interval waktu tertentu yang dinyatakan jalan satuap mobil penumpang (smp). Untuk setiap jenis kendaraan besarnya nilai SMP ini berbeda-beda sesuai dengan tingkat gangguan yang ditimbulkannya. Maka untuk memperoleh besaran volume tersebut, tiap-tiap jenis kendaraan harus dikalikan dengan koefisien-koefisien sebagaimana pada **Tabel 2.15** berikut ini.

Tabel 2.15 Nilai SMP untuk setiap jenis kendaraan

Jenis Kendaraan	Nilai SMP
Sedan, Jeep, Combi, Box, Minibus	1,0
Bus Kecil	2,0
Bus Besar	3,0
Truk Kecil	2,0
Truk Besar	3,0
Truk Gandengan/ Trailer	5,0
Sepeda Motor	1,0
Kendaraan Umum kecil	1,0

Dalam sebuah perencanaan, digunakan perhitungan volume puncak yang dinyatakan dalam volume per-jam perencanaan. Perhitungan volume lalu lintas digunakan rumus berdasarkan MKJI No. 036/ T/ BM/ 1997.

$$Q_{dh} = LHRT \times k$$

Keterangan :

Q_{dh} = arus lalu lintas yang digunakan untuk perancangan.

k = faktor peubah dari LHRT ke lalu lintas jam puncak

LHRT = lalu lintas harian rata-rata tahunan.

2.12.4 Beban Gandar

Beban gandar akan mempengaruhi perhitungan baik pada perhitungan flexible pavement maupun rigid pavement. Selain itu beban gandar juga akan mempengaruhi perencanaan geotekstil dan daya dukung tanah dasar. Berikut ini



akan ditampilkan beban gandar untuk masing-masing kendaraan pada **Tabel 2.16** dibawah :

Tabel 2.16 Beban Gandar Kendaraan

Jenis kendaraan	Beban (ton)	Distribusi beban (ton)
Kendaraan ringan	2	1 + 1
Bus	8	3 + 5
Truk 2 as	13	5 + 8
Truk 3 as	20	6 + 7,7
Truk 4 as	30	6 + 7,7 + 5,5

Beban gandar 8 ton dengan distribusi 3+5 artinya gandar depan memikul beban dengan muatan sumbu sebesar 3 ton dan gandar belakang sebesar 5 ton, jadi beban gandar lebih dipengaruhi oleh jenis kendaraan serta jumlah gandar kendaraan. Muatan sumbu terberat selalu berada di gandar belakang.

2.12.5 Desain Geometrik Jalan

Standar yang dipergunakan sebagai acuan desain geometrik adalah Keputusan Menteri Pemukiman dan Prasarana Wilayah No. 353/KPTS/M/200 tentang Ketentuan Teknik, Tata Cara Pembangunan dan Pemeliharaan Jalan Tol, 22 Juni 2001, Departemen Pemukiman dan Prasarana Wilayah.

Beberapa ketentuan dasar dalam menentukan dimensi, geometrik, dan kecepatan rencana jalan tol, sesuai dengan KepMen 353/KPTS/2001 meliputi lebar lajur, bahu jalan, dan median yang ditunjukkan dalam **Tabel 2.17** dan **Tabel 2.18** di bawah ini.



Tabel 2.17 Petunjuk Umum Penentuan Kecepatan Rencana Jalan Tol

Kondisi Terrain	Kecepatan Rencana (Km/jam)	
	Di Luar Kota	Dalam Kota
Datar (lereng melintang 0%-2.9%)	120	80
Perbukitan (lereng melintang 3%-24.9%)	100	80
Pegunungan (lereng melintang >25%)	80	60

Sumber : KepMen 353/KPTS/2001

Tabel 2.18 Lebar Jalur, Bahu jalan, dan Median

	Luar Kota	Dalam Kota
1. Lebar Lajur	3.60 m	3.50 m
2. Lebar Bahu Luar yang diperkeras	3.00 m	2.00 m
3. Lebar Bahu Dalam yang diperkeras	1.50 m	0.50 m
4. Lebar Median		
- Tahap Awal	13.00 m	10.00 m
- Tahap Akhir	5.50 m	3.00 m
(jarak antara garis tepi dalam lajur lalu lintas)	(4.00 m)	
5. Lebar Lajur & Pulau pada Gerbang Tol :		
- Lebar Lajur		2.90 m
- Lebar Lajur Terluar		3.50 m
- Lebar Pulau		2.10 m



Parameter-parameter perencanaan yang akan dipergunakan dalam perencanaan geometrik Jalan Tol disarikan dalam **Tabel 2.19**.

Tabel 2.19 Standart Perencanaan Geometrik Jalan Tol

Item	Satuan	Standar Yg Digunakan		
		120	100	80
Kecepatan Rencana	km/jam	120	100	80
Jarak Pandang Henti Minimum	m	225	160	110
<u>Potongan Melintang</u>				
Lebar Lajur	m	3.60	3.60	3.60
Lebar Bahu Kiri	m	3.00	3.00	3.00
Lebar Bahu Kanan	m	1.50	1.50	1.50
Lebar Median	m	10.00	10.00	10.00
Kemiringan Melintang Perkerasan	%	2	2	2
Kemiringan Melintang Bahu	%	4	4	4
<u>Alinemen Horisontal</u>				
Jari-jari minimum	m	1000	700	450
Jari-jari min. tanpa Superelevasi	m	7000	5000	3500
Panjang Lengkung minimum	m	210	170	100
Superelevasi Maksimum	%	6	6	6
Panjang Lengkung Peralihan Minimum	m	100	85	60
Jari-jari min. tanpa Peralihan	m	2000	1500	1000
<u>Parameter Alinemen Vertikal</u>				
Kemiringan (Grade) maksimum	%	2	3	4
Jari-jari min. Lengkung Vertikal				
Cembung (Crest)	m	20000	10000	6000
Cekung (Sag)	m	10000	4500	2500
Panjang Lengkung Vertikal Minimum	m	120	85	70

2.12.6 Desain Perkerasan Jalan

Desain perkerasan harus mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi antara lain :

- Lalu lintas, yaitu jenis / golongan kendaraan dan jumlah kendaraan.



- Data pertumbuhan lalu lintas.
- Data CBR tanah dasar (subgrade) dimana jalan dibangun.
- Rencana umur perkerasan (dimulai tahun pembukaan lalu lintas).
- Muatan Sumbu Terberat (MST)
- Perkiraan tahun pembukaan lalu lintas.
- Faktor wilayah (Regional Factor) = Pengaruh keadaan lingkungan

Faktor keadaan drainase : Alam lingkungan atau buatan. Makin baik keadaan drainase, faktor wilayah makin kecil. Pada jalan tol, sistem drainase di desain sempurna, maka faktor wilayah yang dipakai adalah 1 (satu).

Pemilihan tipe dan material perkerasan pada **Tabel 2.20** akan didasarkan pada pertimbangan dari segi ekonomi, kondisi setempat, tingkat kebutuhan, kemampuan pelaksanaan dan syarat teknis lainnya.

Tabel 2.20 Karakteristik Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku

Karakteristik	Perkerasan Lentur (Flexible Pavement)	Perkerasan Kaku (Rigid Pavement)
Umur Rencana	10 tahun atau kurang	20 tahun
Pemeliharaan	Cukup sering	Relatif tanpa pemeliharaan
Pengawasan Kualitas (Quality Control)	Relatif Lebih Sulit	Relatif Lebih Mudah
Sensitivitas terhadap beban lebih truk	Relatif Sensitif	Relatif kurang sensitif
Sumber Material	Aspal import	Semen lokal
Kemudahan dalam pelaksanaan	Relatif Lebih Sulit dan Lama	Relatif Lebih Mudah dan Cepat
Biaya	Biaya investasi awal maupun biaya pemeliharaan relatif lebih mahal	Biaya investasi awal maupun biaya pemeliharaan relatif lebih murah

Ada beberapa pertimbangan penggunaan rigid pavement yaitu :

- ❖ Tuntutan akibat perkembangan lalu lintas
 - Pertumbuhan volume dan berat lalu lintas
 - Overspeed dan overload
- ❖ Tuntutan perkembangan jalan
 - 40% aspal minyak masih harus di-impor
 - Masalah pemeliharaan jalan aspal



Sifat – sifat umum dari rigid pavement :

a. Mempunyai kehandalan tinggi

- Umur panjang : 20- 40 tahun.
- Tahan terhadap proses pelapukan, oksidasi, abrasi dll.

b. Pemeliharaan ringan.

- Konstruksi lapis tunggal
- Secara struktural terdiri dari satu lapis beton mutu tinggi. .
- Sub-base tidak terlalu struktural.

c. Sangat kaku

- E rigid pavement = 15 -25 E flexible pavement.
- Penyebaran beban ke tanah dasar lebih luas.
- Peranan kekuatan tanah dasar "kecil"

Ada dua macam dasar perhitungan dalam menentukan tebal perkerasan yaitu dari buku pedoman Penentuan tebal perkerasan Lentur jalan raya 1983 Dirjen Bina Marga dan AASHTO untuk pedoman perkerasan kaku. Langkah – langkahnya sebagai berikut :

A. Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)

Menentukan Faktor Regional (FR)

Faktor regional adalah faktor setempat yang menyangkut keadaan lapangan dan iklim, yang dapat mempengaruhi keadaan pembebanan, daya dukung tanah dasar dan perkerasan. Dengan memakai parameter curah hujan, kelandaian plan dan prosentase kendaraan berat didapat FR.

Menghitung dan menampilkan jumlah komposisi lalu lintas harian rata-rata LHR awal rencana.

Menhitung angka ekivalen (E)

Yaitu angka yang menyatakan jumlah lintasan sumbu tunggal seberat 8,16 ton pada jalur rencana yang diduga terjadi pada permulaan umur rencana.



Menurut Buku Pedoman Penentuan Tebal Perkerasan lentur Jalan raya 1983, Dirjen Bina Marga harga ekivalen masing-masing kendaraan dihitung dengan memakai rumus :

Angka Ekivalen sumbu tunggal.

$$E = (\text{beban I sumbu tunggal} / 8,16)^4$$

Angka Ekivalen sumbu ganda

$$E = 0.086 (\text{beban I sumbu ganda} / 8.16)^4$$

Mengitung lintas ekivalen permulaan (LEP)

Jumlah ekivalen harian rata-rata dari sumbu tunggal seberat 8,16 ton pada jalur rencana yang diduga terjadi pada permulaan umur rencana.

Menurut Buku Pedoman Penentuan tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya 1983. Dirjen Bina Marga, harga lintas ekivalen permulaan dapat dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$LEP = LHR_j \times C_j \times E_j$$

keterangan :

C = koefisien distribusi kendaraan

$\sum LHR_j$ = lalu lintas harian rata-rata pada awal umur rencana

E_j = Angka ekivalen untuk tiap jenis kendaraan

Menghitung lintas ekivalen akhir (LEA)

Jumlah lintas ekivalen harian rata-rata dari sumbu tunggal seberat 8,16 ton pada jalur rencana yang diduga terjadi pada akhir umur rencana.

Menurut Buku Pedoman Penentuan Tebal Perkerasan Lentur jalan Raya 1983, Dirjen Bina Marga, harga lintas ekivalen akhir dapat dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$LEA = \sum LHR_j (1+i)^{UR} \times C_j \times E_j$$

keterangan :

C_j = koefisien distribusi kendaraan

$\sum LHR_j$ = lalu lintas harian rata-rata pada awal umur rencana

E_j = Angka ekivalen untuk tiap jenis kendaraan

i = perkembangan lalu lintas dalam tahun



UR = Umur rencana jalan

Menghitung lintas ekivalen tengah (LET)

Jumlah ekivalen harian rata-rata dari sumbu tunggal seberat 8.16 ton pada jalur rencana yang diduga terjadi pada tengah umur rencana.

Menurut Buku Pedoman Penentuan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya 1983, Dirjen Bina Marga, harga lintas ekivalen akhir dapat dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$LET = \frac{1}{2} (LEA + LEP)$$

Dimana :

LEA = Lintas Ekivalen Akhir

LEP = Lintas Ekivalen Permulaan

Menghitung Lintas Ekivalen Rencana (LER)

Suatu beban yang dipakai dalam nomogram penetapan tebal perkerasan untuk menyatakan jumlah lintas ekivalen rata-rata dari sumbu tunggal seberat 8,16 ton pada jalur rencana.

Menurut Buku Pedoman Penentuan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya 1983, Dirjen Bina Marga, harga lintas ekivalen akhir dapat dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} LER &= LET \times (UR / 10) \\ &= LET \times FP \end{aligned}$$

Keterangan :

FP = Faktor Penyesuaian

LET = Lintas Ekivalen Tengah

UR = Umur Rencana

Menghitung Indeks Tebal Perkerasan (ITP)

Adalah angka yang berhubungan dengan penentuan tebal perkerasan, caranya sebagai berikut :

- Berdasarkan CBR tanah dasar, dari grafik didapat (DDT) daya dukung tanah dasar (grafik IV).



- Dengan parameter klasifikasi jalan dan besarnya LER, dari grafik didapat indeks permukaan akhir umur rencana (grafik VII).
- Berdasarkan jenis lapis perkerasan dari daftar VIII didapat indeks permukaan pada awal umur rencana (Ipo).
- Selanjutnya dengan parameter DDT, IP, FR dan LER dengan memakai nomogram penetapan tebal perkerasan didapat indeks tebal perkerasan ijin (ITP).

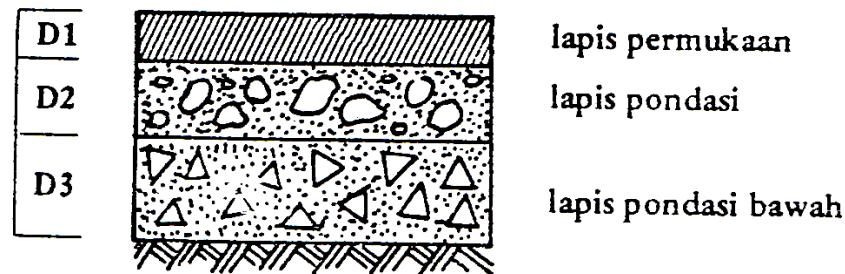
Menurut Buku Pedoman Penentuan Tebal Perkerasan Lentur Jalan Raya 1983, Dirjen Bina Marga, lalu lintas ekivalen akhir dapat dicari dengan rumus sebagai berikut :

$$ITP = (a_1 \times D_1) + (a_2 \times D_2) + (a_3 \times D_3)$$

Dimana :

a_1, a_2, a_3 = Koefisien kekuatan relative bahan perkerasan

D_1, D_2, D_3 = Tebal minimum masing-masing perkerasan



Gambar 2.12 Lapisan Struktur Perkerasan Jalan

Perencanaan tebal lapis tambahan metode analisa komponen Sebelum perencanaan perlu dilakukan survey penilaian terhadap kondisi perkerasan jalan lama (existing pavement) yang meliputi lapis permukaan lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah. Seperti pada perencanaan perkerasan lentur, pada lapis tambahan metode analisa kompom dihitung LHR pada akhir umur rencana LEP, LEA, LET dan LER. Dari perhitungan tersebut dengan menggunakan nomogram dapat diketahui ITP yang dibutuhkan. Dari selisih antara ITP yang dibutuhkan dengan ITP yang ada (existing pavement), dapat diketahui tebal lapis tambahan yang diperlukan.



B. Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*)

Menentukan Traffic

Menentukan umur rencana dengan faktor distribusi lajur (D_L), mengacu pada **Tabel 2.21**.

Tabel 2.21 Faktor distribusi lajur (D_L)

Jumlah lajur setiap arah	D_L (%)
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80

Reliability

Reliability merupakan Probabilitas bahwa perkerasan yang direncanakan akan tetap memuaskan selama masa layannya. Penetapan angka Reliability dari 50% sampai 99,99% menurut AASHTO merupakan tingkat kehandalan desain untuk mengatasi, mengakomodasi kemungkinan melesetnya besaran-besaran desain yang dipakai. Semakin tinggi reliability yang dipakai semakin tinggi tingkat mengatasi kemungkinan terjadinya selisih (*deviasi*) desain perkerasan. Besaran-besaran desain yang terkait dengan ini antara lain :

- Peramalan kinerja perkerasan.
- Peramalan lalu-lintas.
- Perkiraan tekanan gandar.
- Pelaksanaan konstruksi.

AASHTO menyarankan angka reliability untuk tol antara 80 – 99,99%. Pengambilan 90 % (angka tengah) cukup memadai, dan disarankan juga oleh AASHTO bila tidak didapat besaran yang lebih pasti. Nilai Reliability (R) mengacu pada **Tabel 2.22** serta standard normal deviasi (Z_R) mengacu pada **Tabel 2.23**.

Tabel 2.22 Reliability (R) yang disarankan

Klasifikasi Jalan	R (%)	
	Urban	Rural
Jalan tol	85 – 99,9	80 – 99,9

**Tabel 2.23** Standart normal deviation (Z_R)

R (%)	Z_R	R (%)	Z_R
50	-0,000	93	-1,476
60	-0,253	94	-1,555
70	-0,524	95	-1,645
75	-0,674	96	-1,751
80	-0,841	97	-1,881
85	-1,037	98	-2,054
90	-1,282	99	-2,327
91	-1,340	99,9	-3,090
92	-1,405	99,99	-3,750

Serviceability

Terminal serviceability index (p_t) mengacu pada **Tabel 2.24**. Initial serviceability untuk rigid pavement : $p_o = 4,5$. Total loss of serviceability : $\Delta PSI = p_o - p_t$

Tabel 2.24 Terminal serviceability index

Percent of people stating unacceptable	p_t
12	3,0
55	2,5
85	2,0

Modulus Reaksi Tanah Dasar

Modulus of subgrade reaction (k) menggunakan gabungan formula dan grafik penentuan modulus reaksi tanah dasar berdasar ketentuan CBR tanah dasar.

$$MR = 1.500 \times CBR$$

$$k = \frac{MR}{19,4}$$

MR = Resilient modulus.

Faktor Loss of Support (LS) berdasarkan pada **Tabel 2.25**.

Tabel 2.25 Loss of Support Factor (LS)

No.	Type material	LS
1.	Cement Treated Granular Base (E = 1.000.000 – 2.000.000 psi)	0 – 1
2.	Cement Aggregate Mixtures (E = 500.000 – 1.000.000 psi)	0 – 1
3.	Asphalt Treated Base (E = 350.000 – 1.000.000 psi)	0 – 1
4.	Bituminous Stabilized Mixtures (E = 40.000 – 300.000 psi)	0 – 1
5.	Lime Stabilized (E = 20.000 – 70.000 psi)	1 – 3
6.	Unbound Granular Materials (E = 15.000 – 45.000 psi)	1 – 3
7.	Fine grained / Natural subgrade materials (E = 3.000 – 40.000 psi)	2 – 3



Modulus Elastisitas Beton

$$E_c = 57.000\sqrt{f_c'}$$

E_c = Modulus elastisitas beton (psi).

f_c' = Kuat tekan beton (psi).

Flexural Strength

Berdasarkan spesifikasi umum perkerasan kaku, flexural strength (modulus of rupture) : $Sc' = 45 \text{ kg/cm}^2 = 640 \text{ psi}$.

Load Transfer

Load transfer coefficient (J) mengacu pada **Tabel 2.26**.

Tabel 2.26 Load transfer coefficient

Shoulder	Asphalt		Tied PCC	
	Yes	No	Yes	No
Load transfer devices				
Pavement type				
1. Plain jointed & jointed reinforced	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
2. CRCP	2.9 – 3.2	N/A	2.3 – 2.9	N/A

Penetapan parameter load transfer :

- Joint dengan dowel : $J = 2,5 - 3,1$.
- Untuk overlay design : $J = 2,2 - 2,6$.

Drainage Coefficient

1. Variabel faktor drainase

AASHTO memberikan 2 variabel untuk menentukan nilai drainase, yaitu :

- Variabel pertama : mutu drainase, dengan variasi excellent, good, fair, poor, very poor. Mutu ini ditentukan oleh berapa lama air dapat dibebaskan dari pondasi perkerasan.
- Variabel kedua : persentasi struktur perkerasan dalam satu tahun terkena air sampai tingkat mendekati jenuh air (saturated), dengan variasi $< 1 \%$, $1 - 5 \%$, $5 - 25 \%$, $> 25 \%$.



2. Penetapan variable mutu drainase

Penetapan variable pertama berdasarkan pada **Tabel 2.27**, dan dengan pendekatan sebagai berikut :

- a. Air hujan atau air dari atas permukaan jalan yang akan masuk ke dalam pondasi jalan, relatif kecil berdasar hidrologi yaitu berkisar 70 – 95 % air yang jatuh di atas jalan beton akan masuk ke sistem drainase.
- b. Air dari samping jalan yang kemungkinan akan masuk ke pondasi jalan, inipun relatif kecil terjadi, karena adanya bahu yang diperkeras dan cross drain, juga muka air tertinggi terletak jauh di bawah subgrade.
- c. Pendekatan dengan lama dan frekuensi hujan, yang rata-rata terjadi hujan selama 3 jam per hari dan jarang sekali terjadi hujan terus menerus selama 1 minggu.

Tabel 2.27 Quality of drainage

Quality of drainage	Water removed within
Excellent	2 jam
Good	1 hari
Fair	1 minggu
Poor	1 bulan
Very poor	Air tidak terbebaskan

3. Penetapan variable prosen perkerasan terkena air

Penetapan variabel kedua yaitu persentasi struktur perkerasan dalam satu tahun terkena air sampai tingkat saturated, relatif sulit, belum ada data rekaman pembanding dari jalan tol lain, tetapi dengan pendekatan diantaranya :

- a. Perancangan subgrade hampir semua berupa timbunan borrow material berupa sirtu, maka kemungkinan kemasukan air sampai terkurung di struktur dalam perkerasan sangat kecil.
- b. Berdasar seperti pada pendekatan pada variable pertama yang telah dijelaskan sebelumnya di atas.

Prosen struktur perkerasan dalam 1 tahun terkena air dapat dilakukan pendekatan dengan asumsi sebagai berikut :

$$P_{heff} = \frac{T_{jam}}{24} \times \frac{T_{hari}}{365} \times W_L \times 100$$



P_{heff} = Prosen hari effective hujan dalam setahun yang akan berpengaruh terkenanya perkerasan (dalam %).

T_{jam} = Rata-rata hujan per hari (jam).

T_{hari} = Rata-rata jumlah hari hujan per tahun (hari)

W_L = Faktor air hujan yang akan masuk ke pondasi jalan (%)

Selanjutnya, nilai drainage coefficient (C_d) mengacu pada **Tabel 2.28**.

Tabel 2.28 Drainage coefficient (C_d)

Quality of drainage	Percent of time pavement structure is exposed to moisture levels approaching saturation			
	< 1 %	1 – 5 %	5 – 25 %	> 25 %
Excellent	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Good	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Fair	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Poor	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Very poor	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Persamaan Penentuan Tebal Pelat (D)

$$\log_{10} W_{18} = Z_R S_o + 7,35 \log_{10}(D+1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,5-1,5} \right]}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D+1)^{8,46}}} +$$

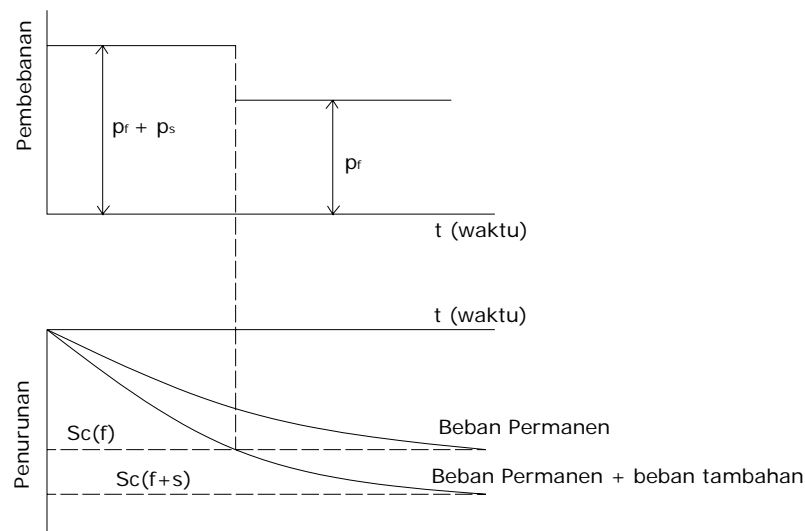
$$(4,22 - 0,32 p_t) \times \log_{10} \frac{S_c C_d \times \left[D^{0,75} - 1,132 \right]}{215,63 \times J \times \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c/k)^{0,25}} \right]}$$

2.13 Prapembebanan (*Preloading*)

Prapembebanan adalah metode yang umum digunakan dan membutuhkan biaya yang relatif murah bila dibandingkan dengan metode – metode lainnya. Prapembebanan (*preloading*) adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengurangi total penurunan pada tanah lunak dengan cara memberikan beban tambahan yang lebih besar daripada beban rencana yaitu sebesar 1,5 sampai 2 kali lebih besar dari beban rencana.



Bila dalam pelaksanaan dibutuhkan pembebanan terbagi rata dengan tambahan intensitas tegangan sebesar P_f (**Gambar 2.13**), akibat pembebanan, penurunan konsolidasi primer total diperkirakan akan sama dengan $S_c(f)$. Jika diinginkan untuk menghilangkan penurunan konsolidasi primer, maka harus dikerjakan intensitas beban terbagi rata total sebesar $P = P_f + P_s$. Beban ini akan menyebabkan penurunan yang lebih cepat. Bila penurunan total $S_c(f)$ telah tercapai, beban disingkirkan untuk kemudian dilaksanakan pembangunan struktur yang diinginkan.



Gambar 2.13 Konsep mempercepat penurunan dengan cara prapembebanan

Korelasi antara tekanan P_s dan waktu harus dipertimbangkan dalam hitungan. Dalam prapembebanan digunakan rumus pendekatan untuk menentukan derajat konsolidasi yang dikutip dari buku Hary Christady H. 2003, adalah sebagai berikut :

$$U_{(f+s)} = \frac{\log[1 + (P_f / P_0')] }{\log(\{1 + P_f / P_0'\} \{1 + P_s / P_f\})}$$

$$S_{c(f+s)} = \frac{H \times C_c}{1 + e_0} \log \frac{P_0' + P_f + P_s}{P_0'}$$

dengan,

P_0' = tekanan overburden efektif rata-rata

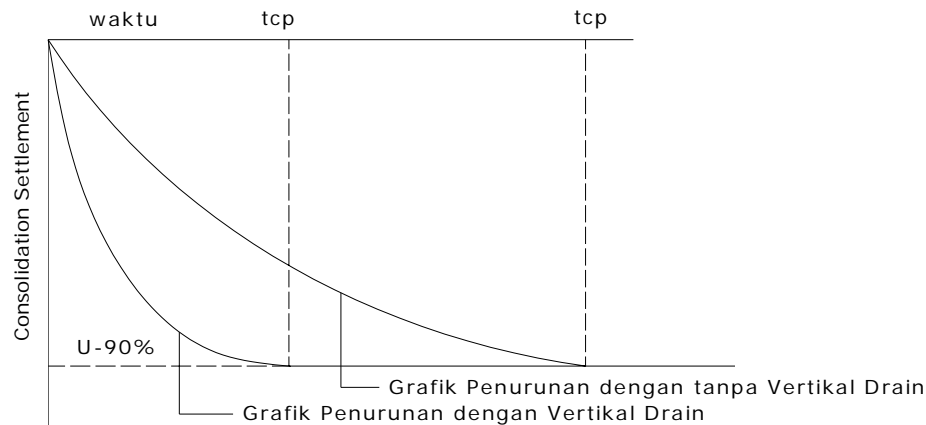
P_s = tegangan akibat beban timbunan



- P_f = tegangan akibat tambahan beban timbunan
 $S_{c(f+s)}$ = penurunan konsolidasi primer akibat beban $P_f + P_s$
 $U_{(f+s)}$ = derajat konsolidasi akibat beban $P_f + P_s$

2.14 Prefabricated Vertical Drain (PVD)

Tanah kompresibel yang cukup tebal jika dibebani akan mengalami penurunan sebagai akibat dari konsolidasi yang berlangsung sebagai fungsi waktu seperti pada **Gambar 2.14**. Dengan menggunakan vertikal drain, akan dihasilkan waktu penurunan yang lebih cepat dibanding tanpa menggunakan vertikal drain. Tanah yang telah mengalami penurunan akibat pembebanan akan menjadi lebih mampat sehingga tanah menjadi lebih kokoh dengan demikian daya dukung tanahnya meningkat.



Gambar 2.14 Efek penggunaan vertikal drain

Hal terpenting dalam PVD yaitu bahwa PVD hanya berfungsi untuk mempercepat proses konsolidasi dan tidak dapat untuk mengurangi besarnya *consolidation settlement*. Proporsi tekanan air pori yang terdisipasi pada waktu tertentu (U) dalam suatu perlapisan tanah yang dipasang vertikal drainase dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$1 - U_{vh} = (1 - U_v) \cdot (1 - U_h)$$

Dimana :

- U_{vh} = menyatakan efek kombinasi
 U_v = menyatakan drainase vertikal



U_h = menyatakan drainase horizontal

Pengaruh drainase vertikal sangat kecil dibandingkan dengan drainase arah horisontal sebagai akibat dari jalur drainase yang harus ditempuh jauh lebih panjang. Penentuan waktu konsolidasi, t dihitung dengan persamaan Barron yang kemudian dikembangkan lagi oleh Hansbo (1979) untuk PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) yaitu dengan memasukkan dimensi fisik dan karakteristik dari PVD sebagai berikut :

$$t = \frac{D^2}{8.C_h} . F(n) . \ln \frac{1}{1-U_h}$$

Dimana :

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left(\ln(n) - \frac{3n^2}{4n^2} \right)$$

yang dapat disederhanakan menjadi,

$$F(n) = \ln(n) - 0.75$$

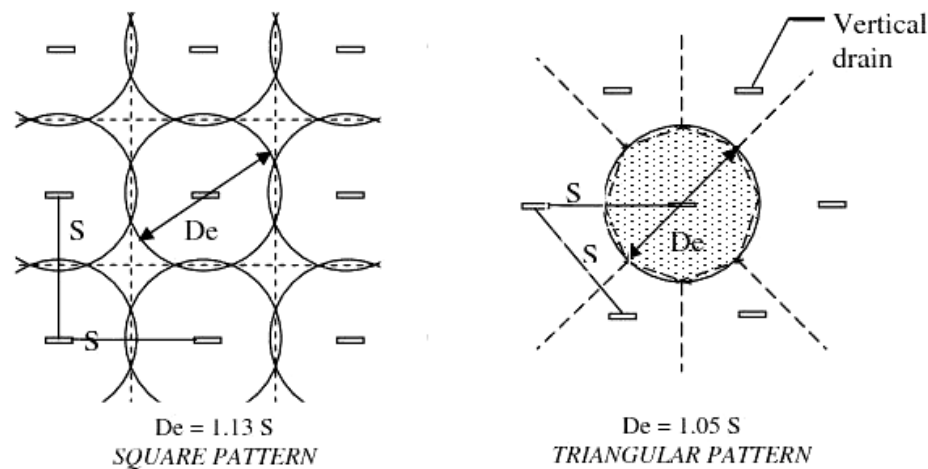
dan $n = D/d_w$

dimana :

D = diameter ekivalen lingkaran

d_w = diameter drain

Di lapangan ada dua pola pemasangan vertikal drain, seperti terlihat pada **Gambar 2.15**.

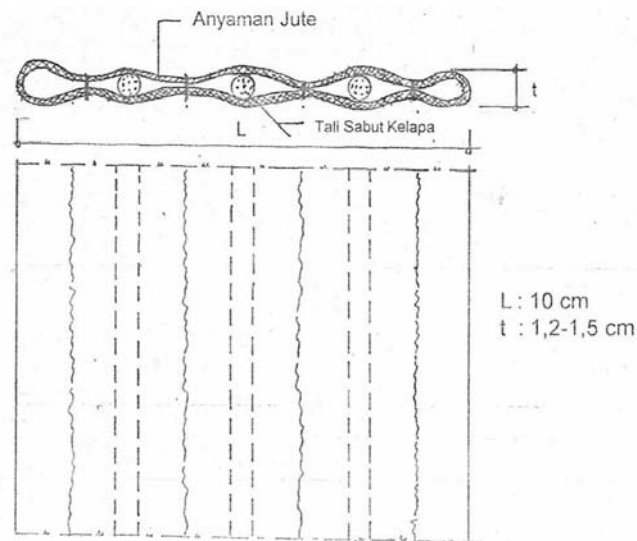


Gambar 2.15 Pola pemasangan Vertikal Drain



2.15 Geojute (Fibrejute)

Kecepatan konsolidasi yang rendah pada tanah – tanah lempung, dan tanah yang mudah mampat lainnya, dapat dipercepat dengan menggunakan Geojute yang ditanam secara vertikal. Geojute tidak jauh berbeda dengan PVD, yang keduanya merupakan metode perbaikan tanah drainase vertikal. Geojute dibuat dari anyaman jute (goni) sebagai filter dan tali sabut kelapa sebagai sumbu. Geojute dikembangkan oleh Prof. Lee dan dimanufaktur oleh PT.Indonesia Nihon Seima, Jakarta. Geojute mempunyai bentuk seperti pita yang ditunjukkan pada **Gambar 2.16**, dengan lebar 100 mm dan tebal 1,2 hingga 1,5 centimeter.



Gambar 2.16 Bentuk Geojute Fibre Jute

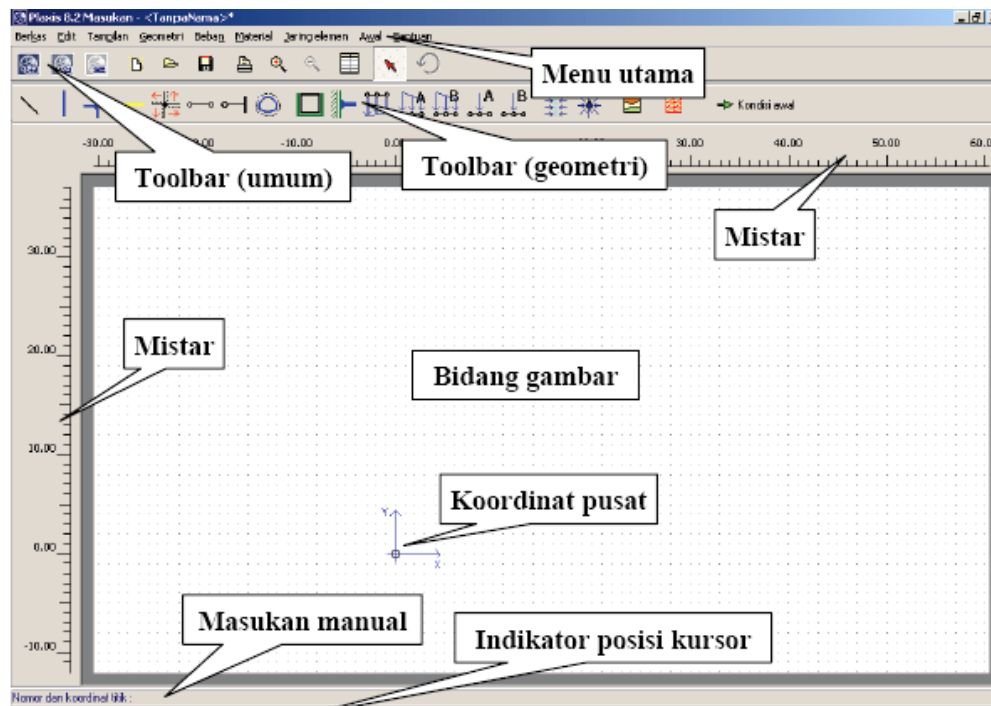
Geojute juga merupakan salah satu metode perbaikan tanah dengan sistem drainase vertikal, sehingga urutan perhitungan dalam menentukan kecepatan konsolidasi tidak jauh berbeda dengan Prefabricated Vertical Drain (PVD).

2.16 Program Plaxis dalam Analisis Geoteknik

Plaxis adalah sebuah paket program yang disusun berdasarkan metode elemen hingga yang telah dikembangkan secara khusus untuk melakukan analisis deformasi dan stabilitas dalam bidang rekaya geoteknik. Prosedur pembuatan model secara grafis yang mudah memungkinkan pembuatan suatu model elemen



hingga yang rumit dapat dilakukan dengan cepat, sedangkan berbagai fasilitas yang tersedia dapat digunakan untuk menampilkan hasil komputasi secara mendetail. Proses perhitungannya sendiri sepenuhnya berjalan secara otomatis dan didasarkan pada prosedur numerik handal. Beberapa menu tampilan mengenai program plaxis ditunjukkan pada **Gambar 2.17**.



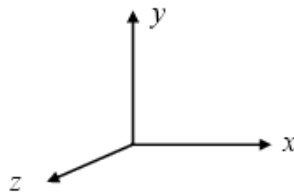
Gambar 2.17 Jendela utama dari program plaxis

Dalam plaxis, terdapat beberapa perjanjian tanda dan satuan yang harus disesuaikan agar analisa yang dihasilkan sesuai dengan yang diharapkan. Penggunaan sistem satuan secara konsisten merupakan hal yang penting dalam setiap analisis. Saat memulai suatu permodelan geometri, satu set satuan dasar harus dipilih terlebih dahulu dari saruan – satuan satndar yang tersedia. Satuan – satuan dasar yang mencakup satuan panjang, gaya, dan waktu. **Tabel 2.29** memberikan seluruh satuan yang tersedia beserta faktor konversinya.

**Tabel 2.29** Satuan yang tersedia dan faktor konversinya

Panjang	Konversi	Gaya	Konversi	Waktu	Konversi
mm	= 0.001 m	N	= 0.001 kN	dtk (detik)	= 1/86400 hari
[m]	= 1 m	[kN]	= 1 kN	mnt	= 1/1440 hari
in (inci)	= 0.0254 m	MN	= 1000 kN	jam	= 1/24 hari
ft (kaki)	= 0.3048 m	lb (pon)	= 0.0044482 kN	[hari]	= 1 hari
		klb (kilopon)	= 4.4482 kN		

Plaxis selalu menghasilkan model elemen hingga dua dimensi berdasarkan pada suatu model geometri. Model geometri ini dibuat dalam bidang x-y yang berada dalam sistem koordinat global (**Gambar 2.18**), dimana arah-z adalah arah yang tegak lurus keluar dari bidang gambar. Dalam sistem koordinat global, arah-z positif adalah arah yang tegak lurus keluar dari bidang gambar ke arah pengguna.

**Gambar 2.18** Sistem koordinat arah positif pada plaxis