

# PEDOMAN

Pd T-10-2005-B

**Konstruksi dan Bangunan**

---

**Penanganan tanah ekspansif  
untuk konstruksi jalan**



**DEPARTEMEN PEKERJAAN UMUM**

## Daftar isi

Daftar isi.....	i
Daftar gambar.....	iii
Daftar tabel.....	v
Daftar notasi.....	vi
Prakata.....	viii
1 Ruang lingkup.....	1
2 Acuan normatif.....	1
3 Istilah dan definisi.....	2
3.1 hisapan osmotik.....	2
3.2 hisapan tanah.....	2
3.3 hisapan total.....	2
3.4 pengangkatan tanah ( <i>heaving</i> ).....	2
3.5 pengembangan ( <i>swelling</i> ).....	2
3.6 penyusutan ( <i>shrinkage</i> ).....	2
3.7 tanah ekspansif.....	2
3.8 zona aktif.....	3
4 Tanah ekspansif.....	3
4.1 Karakteristik tanah.....	3
4.2 Ciri-ciri kerusakan jalan di atas tanah ekspansif.....	3
4.2.1 Retakan.....	3
4.2.2 Pengangkatan tanah.....	4
4.2.3 Penurunan.....	4
4.2.4 Longsor.....	4
5 Penyelidikan tanah.....	5
5.1 Studi meja ( <i>desk study</i> ).....	5
5.2 Penyelidikan lapangan.....	5
5.3 Pengujian laboratorium.....	6
6 Identifikasi tanah ekspansif.....	6
6.1 Identifikasi langsung.....	6
6.1.1 Kembang bebas ( <i>free swell</i> ).....	6
6.1.2 Perubahan volume potensial.....	7
6.1.3 Uji indeks pengembangan.....	8
6.2 Identifikasi tidak langsung.....	9
6.2.1 Nilai indeks plastisitas (PI) dan batas susut (SI).....	9
6.2.2 Tingkat keaktifan ( <i>activity</i> ).....	9
6.2.3 Mineral lempung.....	10
7 Pertimbangan desain.....	11
7.1 Kembang susut.....	11
7.2 Kondisi retak.....	11
7.3 Kondisi arah memanjang.....	11
7.4 Stabilitas.....	11
7.4.1 Stabilitas lereng.....	11
7.4.2 Daya dukung tanah.....	11

7.4.2.1	Kriteria keruntuhan batas ( <i>ultimate failure</i> ) .....	12
7.4.2.2	Kriteria perilaku elastis tanah .....	12
7.5	Faktor keamanan .....	12
7.6	Parameter desain.....	12
7.6.1	Kuat geser tanah jenuh .....	12
7.6.1.1	Pengujian tak terkonsolidasi – tak terdrainase ( <i>unconsolidated-undrained UU</i> ) .....	12
7.6.1.2	Pengujian terkonsolidasi – tak terdrainase ( <i>consolidated-undrained CU</i> ) .....	13
7.6.2	<i>Poisson's ratio</i> ( $\mu$ ) .....	13
7.7	Tekanan mengembang .....	13
7.7.1	Metode Nelson dan Miller .....	14
8	Analisis pengangkatan tanah ke atas pada tanah ekspansif .....	14
8.1	Hubungan konstitutif untuk tanah ekspansif .....	15
8.1.1	Keadaan tegangan.....	15
8.1.2	Hubungan konstitutif .....	15
8.1.3	Indeks hisapan .....	16
8.2	Hisapan tanah.....	16
8.3	Hisapan osmotik .....	17
8.3.1	Hisapan matrik .....	17
8.3.2	Hisapan total .....	18
8.4	Pengukuran hisapan tanah .....	19
8.4.1	Tensiometer .....	19
8.4.2	Metode kertas saring.....	20
8.4.3	<i>Thermal Matric Potential</i> .....	20
8.5	Perkiraan pengangkatan tanah berdasarkan uji oedometer .....	21
8.5.1	Uji konsolidasi mengembang .....	21
8.5.2	Uji volume konstan atau uji tekanan pengembangan .....	22
8.6	Perkiraan pengembangan berdasarkan uji hisapan tanah .....	23
9	Desain konstruksi jalan di atas tanah ekspansif .....	23
9.1	Zona aktif .....	23
9.2	Pemadatan tanah.....	24
9.3	Kuat geser tanah tak jenuh .....	24
9.4	Perilaku kuat geser akibat siklus berulang.....	25
9.5	Perilaku mengembang akibat siklus berulang .....	26
9.6	Tekanan tanah lateral .....	26
9.6.1	Tekanan tanah aktif.....	26
9.6.2	Retak tarik .....	27
9.6.3	Tekanan tanah pasif.....	28
9.6.4	Daya dukung tanah dan kestabilan lereng .....	29
10	Teknik konstruksi di atas tanah ekspansif .....	29
10.1	Penggantian material .....	30
10.2	Manajemen air .....	30
10.3	Stabilisasi.....	30
10.3.1	Stabilisasi dengan kapur .....	30
10.3.2	Stabilisasi dengan semen .....	31
10.4	Membran.....	31
10.4.1	Membran geosintetik.....	31
10.4.2	Pelat beton .....	32
10.4.3	Aspal .....	32
10.4.4	Membran horisontal .....	32
10.4.5	Membran vertikal.....	33

10.4.6	Membran pembungkus lapisan tanah .....	33
10.5	Pembebanan.....	34
11	Struktur perkerasan jalan di atas tanah ekspansif.....	36
11.1	Desain perkerasan lentur.....	36
11.1.1	Pengangkatan mengembang tanah di bawah jalan .....	36
11.1.2	Tahapan desain perkerasan lentur .....	36
11.2	Desain perkerasan kaku .....	41
11.2.1	Pengangkatan mengembang tanah di bawah jalan .....	41
11.2.2	Tahapan desain perkerasan kaku.....	41
Lampiran A	(informatif) Contoh penentuan pengembangan tanah ekspansif .....	46
Lampiran B	(informatif) Penyebaran tanah ekspansif di Pulau Jawa .....	59
Lampiran C	(informatif) Nama dan lembaga.....	60
Bibliografi	.....	61

### Daftar gambar

Gambar 1	Retakan memanjang pada tepi perkerasan jalan.....	4
Gambar 2	Penurunan perkerasan jalan .....	4
Gambar 3	Longsoran badan jalan.....	5
Gambar 4	Peralatan pengujian perubahan volume potensial .....	7
Gambar 5	Indeks pengembangan terhadap potensi perubahan volume .....	8
Gambar 6	Klasifikasi potensi kembang.....	10
Gambar 7	Kurva hubungan angka pori dan log tekanan .....	13
Gambar 8	Penentuan tekanan mengembang .....	14
Gambar 9	Penentuan tekanan mengembang .....	14
Gambar 10	Pengembangan tekanan osmotik melewati membran .....	17
Gambar 11	Hubungan air dan udara dalam tanah.....	18
Gambar 12	Kurva penyimpanan (retensi) air untuk tanah .....	18
Gambar 13	Tensiometer <i>Quick Draw</i> .....	19
Gambar 14	Hubungan pengukuran dengan kertas saring .....	20
Gambar 15	Sensor <i>thermal matric potential</i> .....	21
Gambar 16	Hasil uji konsolidasi mengembang.....	22
Gambar 17	Hasil uji volume konstan .....	22
Gambar 18	Metode penentuan zona aktif dari perubahan kadar air.....	24
Gambar 19	Kurva keruntuhan tanah tak jenuh .....	25
Gambar 20	Distribusi tekanan tanah aktif Rankine untuk tanah jenuh .....	27

Gambar 21	Komponen distribusi tekanan tanah aktif pada saat hisapan matrik konstan terhadap kedalaman .....	27
Gambar 22	Penentuan retak tarik.....	28
Gambar 23	Komponen distribusi tekanan tanah pasif pada saat hisapan matrik konstan terhadap kedalaman .....	29
Gambar 24	Stabilisasi dengan semen .....	31
Gambar 25	Membran geosintetik.....	32
Gambar 26	Membran horisontal pada konstruksi jalan.....	33
Gambar 27	Membran vertikal pada konstruksi jalan.....	33
Gambar 28	Membran pembungkus lapisan tanah pada konstruksi jalan .....	34
Gambar 29	Grafik desain untuk perkerasan lentur berdasarkan penggunaan nilai rata-rata untuk tiap inputnya .....	38
Gambar 30	Contoh konseptual grafik hubungan kehilangan tingkat pelayanan dengan perkembangan waktu untuk lokasi tertentu.....	39
Gambar 31	Contoh pengeplotan kumulatif lalu lintas ekivalen sumbu tunggal 8,16 ton terhadap waktu.....	40
Gambar 32	Grafik desain untuk perkerasan kaku berdasarkan penggunaan nilai rata-rata untuk tiap variabel input .....	44
Gambar A.1	Nomograf untuk memperkirakan besarnya kecepatan .....	51
Gambar A.2	Grafik untuk memperkirakan besarnya potensial pengangkatan vertikal tanah alami.....	52
Gambar A.3	Grafik untuk memperkirakan besarnya kehilangan masa pelayanan akibat pengembangan lapisan dasar jalan .....	53
Gambar A.4	Contoh desain angka pori terhadap log tekanan .....	54
Gambar A.5	Grafik hubungan indeks plastisitas dengan perubahan volume.....	55
Gambar A.6	Kurva hubungan antara potensi pengembangan vertikal dengan beban.....	56
Gambar A.7	Kurva hubungan antara potensi pengembangan vertikal dengan beban.....	57
Gambar A.8	Contoh borlog pengambilan sampel tanah ekspansif .....	58
Gambar B.1	Daerah yang diketahui memiliki masalah lempung mengembang di pulau Jawa .....	59

## Daftar tabel

Tabel 1	Penentuan skala peta dasar berdasarkan jenisnya .....	5
Tabel 2	Korelasi nilai indeks pengembangan dengan potensi pengembangan.....	8
Tabel 3	Korelasi indeks plastisitas, indeks susut dengan tingkat pengembangan .....	9
Tabel 4	Korelasi tingkat keaktifan dengan potensi pengembangan.....	9
Tabel 5	Hubungan antara jenis mineral dengan tingkat keaktifan .....	10
Tabel 6	Faktor keamanan .....	12
Tabel 7	Nilai <i>poisson's ratio</i> tanah lempung .....	13
Tabel 8	Persamaan tegangan efektif untuk tanah tak jenuh.....	15
Tabel 9	Batasan nilai indeks hisapan tanah .....	16
Tabel 10	Hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan metode konstruksi .....	34
Tabel 11	Contoh proses untuk memperkirakan waktu untuk lapis tambah pada struktur perkerasan permulaan dengan mempertimbangkan pengangkatan mengembang .....	37
Tabel 12	Contoh proses untuk memperkirakan waktu untuk lapis tambah struktur perkerasan kaku permulaan dengan mempertimbangkan pengangkatan mengembang .....	42
Tabel 13	Tingkat kepercayaan yang direkomendasikan untuk klasifikasi jalan berdasarkan fungsinya.....	43
Tabel 14	Standar penyimpangan normal berdasarkan tingkat kepercayaan.....	43
Tabel A.1	Korelasi tingkat pengembangan dengan batas cair, indeks plastisitas .....	47
Tabel A.2	Hasil pengujian tanah.....	50

## Daftar notasi

$\rho$	=	kerapatan tanah, kN/m <sup>3</sup>
$\alpha$	=	faktor kompresibilitas
$\chi$	=	variabel yang berhubungan dengan kejenuhan
$\mu$	=	<i>poisson's ratio</i>
$(\sigma_{ff} - u_{af})_f$	=	tegangan normal bersih pada bidang keruntuhan, kPa
$(\sigma - u_a)$	=	variabel tegangan efektif tanah jenuh, kPa
$\beta'$	=	faktor pengaruh kontak yang diukur dari sejumlah kontak pada tarikan efektif dalam kontribusi kekuatan tanah
$\phi^b$	=	sudut perubahan kuat geser terhadap hisapan matrik, derajat (°)
$\Delta e$	=	perubahan angka pori
$\tau_{ff}$	=	kuat geser tanah tak jenuh, kPa
$\sigma_{ff}$	=	tegangan normal pada bidang keruntuhan, kPa
$\Delta h$	=	perubahan hisapan total
$\Delta h_c$	=	perubahan hisapan matrik
$\Delta h_o$	=	perubahan hisapan osmotik
$\sigma_n$	=	tegangan normal pada bidang geser, kPa
$\Delta PSI$	=	kehilangan tingkat pelayanan total
$\Delta PSI_{SW}$	=	kehilangan tingkat pelayanan lingkungan total yang diakibatkan oleh pengangkatan mengembang
$\Delta PSI_{TR}$	=	kehilangan tingkat pelayanan lalu lintas
$\rho_s$	=	kerapatan larutan, kN/m <sup>3</sup>
$\rho_w$	=	kerapatan air, kN/m <sup>3</sup>
$\Delta_w$	=	perubahan kadar air
$[C_s]$	=	konsentrasi molar larutan
$\phi$	=	sudut tahanan geser, derajat (°)
	=	tekanan osmotik, kPa
$A_c$	=	tingkat keaktifan
$B$	=	kemiringan kurva hisapan versus kadar air
$c$	=	kohesi tanah, kPa
$C_c$	=	indeks kompresi
$C_d$	=	koefisien drainase
$CF$	=	persentase fraksi lempung, %
$C_m$	=	indeks hisapan matrik
$C_{mi}$	=	indeks hisapan matrik untuk lapis i
$C_{ti}$	=	indeks tegangan efektif untuk lapis i
$D$	=	jarak dari muka tanah ke muka air tanah, m
$D_m$	=	indeks kadar air sesuai dengan hisapan matrik
$D_t$	=	indeks kadar air sesuai dengan variabel tegangan efektif tanah jenuh
$E$	=	modulus elastisitas, kPa
$e$	=	angka pori
$E_c$	=	modulus elastisitas beton, kPa
$EI$	=	indeks pengembangan
$e_o$	=	angka pori awal
$F$	=	persentase butiran tanah lolos saringan No.4, %
$f_w$	=	tekanan air pori
$g$	=	percepatan gravitasi
$G_s$	=	berat jenis tanah
$H$	=	tebal lapisan tanah lempung, m

$h$	=	hisapan total, kPa
$h_c$	=	hisapan matrik, kPa
$h_o$	=	hisapan osmotik, kPa
ITP	=	Indeks Tebal Perkerasan (ITP) atau disebut juga <i>Structure Number</i> (SN)
$J$	=	modulus transfer beban
$K_a$	=	koefisien tanah aktif
$K_p$	=	koefisien tanah pasif
LL	=	batas cair
$M_R$	=	modulus efektif reaksi tanah dasar, kPa
$N_\phi$	=	faktor daya dukung, diperoleh persamaan $\frac{1}{N_\phi} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right)$
$p'$	=	penurunan tekanan air pori
PI	=	indeks plastisitas, %
PSI	=	tingkat pelayanan
$R$	=	konstanta gas universal
$r$	=	jari-jari dari sebuah bola ideal pada bagian bawah saluran udara
$R$	=	tingkat kepercayaan, %
$S$	=	kuat geser tanah, kPa
$S'_c$	=	modulus keretakan <i>mean concrete</i> , kPa
SI	=	indeks susut, %
$S_o$	=	standar deviasi keseluruhan
$T$	=	temperatur, derajat ( $^\circ$ )
$T_s$	=	tarikan permukaan membran
$u_a$	=	tekanan udara pori, kPa
$u_{af}$	=	tekanan udara pori pada bidang keruntuhan, kPa
$u_w$	=	tekanan air pori, kPa
$V_R$	=	potensi pengembangan vertikal ( <i>potential vertical rise, PVR</i> )
$W_{18}$	=	kumulatif lalu lintas ekuivalen sumbu tunggal 8,16 ton, juta
$Y_c$	=	kedalaman retak tarik, m
$z_i$	=	ketebalan lapisan $i$ , m
Zn	=	standar penyimpangan normal
$\Delta H$	=	persentase pengembangan
$\sigma$	=	tegangan normal total
$\sigma'$	=	tegangan normal efektif
$\psi$	=	parameter dengan rentang nilai 0 – 1

## **Prakata**

Pedoman penanganan tanah ekspansif untuk konstruksi jalan dipersiapkan oleh Panitia Teknik Standardisasi Bidang Konstruksi dan Bangunan melalui Gugus Kerja Bidang Geoteknik Jalan pada Sub Panitia Teknik Standardisasi Bidang Prasarana Transportasi. Pedoman ini diprakarsai oleh Pusat Litbang Prasarana Transportasi, Badan Litbang ex. Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.

Pedoman merupakan kajian dari literatur dan manual yang berkaitan dengan perencanaan dan pelaksanaan penanganan tanah ekspansif untuk konstruksi jalan.

Tata cara penulisan berdasarkan Pedoman BSN No. 8 tahun 2000 dan dibahas dalam forum konsensus yang melibatkan narasumber, pakar dan pihak yang terkait dengan Prasarana Transportasi sesuai ketentuan Pedoman BSN No. 9 tahun 2000.

## Penanganan tanah ekspansif untuk konstruksi jalan

### 1 Ruang lingkup

Pedoman ini merupakan tata cara penanganan tanah ekspansif untuk konstruksi jalan. Pedoman meliputi penjelasan mengenai ciri-ciri kerusakan jalan di atas tanah ekspansif, identifikasi tanah ekspansif, desain konstruksi jalan di atas tanah ekspansif serta teknik penanganan dengan metode penggantian material, manajemen air, stabilisasi, membran, geomembran dan pembebanan. Pedoman ini memberikan informasi dan petunjuk dalam merencanakan desain konstruksi, tetapi bukan merupakan petunjuk yang mendalam untuk desain detail. Prosedur baku yang telah ada tidak dibahas dalam pedoman ini tetapi tetap dijadikan rujukan.

### 2 Acuan normatif

- 1) SNI 03-1743, *Metode pengujian kepadatan berat untuk tanah*
- 2) SNI 03-1964, *Metode pengujian berat jenis tanah*
- 3) SNI 03-1965, *Metode pengujian kadar air tanah*
- 4) SNI 03-1966, *Metode pengujian batas plastis*
- 5) SNI 03-1967, *Metode pengujian batas cair tanah dengan alat cassagrande*
- 6) SNI 03-2455, *Metode pengujian triaksial A*
- 7) SNI 03-2812, *Metode pengujian konsolidasi tanah satu dimensi*
- 8) SNI 03-2813, *Metode pengujian geser langsung tanah terkonsolidasi dengan drain*
- 9) SNI 03-2827, *Metode pengujian lapangan dengan sondir*
- 10) SNI 03-2832, *Metode pengujian untuk mendapatkan kepadatan tanah maksimum dengan kadar air maksimum*
- 11) SNI 03-3420, *Metode pengujian geser langsung tanah tidak terkonsolidasi tanpa drain*
- 12) SNI 03-3422, *Metode pengujian batas susut tanah.*
- 13) SNI 03-3423, *Metode pengujian analisis ukuran butir tanah dengan alat hidrometer*
- 14) SNI 03-3638, *Metode pengujian kuat tekan bebas tanah kohesif.*
- 15) SNI 03-4153, *Metode pengujian penetrasi SPT.*
- 16) SNI 03-4813, *Metode pengujian triaksial untuk tanah kohesif dalam keadaan tanpa konsolidasi dan drain*
- 17) SNI 03-6376, *Metode prosedur penggalian parit uji*
- 18) Pt M-01-2002-B, *Panduan geoteknik 3, timbunan jalan pada tanah lunak : Penyelidikan tanah lunak, pengujian laboratorium*
- 19) Pt T-08-2002-B, *Panduan geoteknik 1, timbunan jalan pada tanah lunak : Proses pembentukan dan sifat-sifat dasar tanah lunak*
- 20) Pt T-09-2002-B, *Panduan geoteknik 2, timbunan jalan pada tanah lunak : Penyelidikan tanah lunak, desain dan pekerjaan lapangan*
- 21) Pt T-10-2002-B, *Panduan geoteknik 4, timbunan jalan pada tanah lunak : Desain dan konstruksi*
- 22) AASHTO (1993) *Guide for design of pavement structures*
- 23) AASHTO T 258-81 *Standard method of test for determining expansive soils*
- 24) ASTM D 1452-80 *Standard practice for soil investigation and sampling by auger borings*
- 25) ASTM D 2113-83 (1993) *Standard practice for diamond core drilling for site investigation*

- 26) ASTM D 4452-85 (1995) e1 *Standard methods for X-Ray radiography of soil samples*  
27) ASTM D 4546-90 *Standard test methods for one-dimensional swell or settlement potential of cohesive soils*

### **3 Istilah dan definisi**

Istilah dan definisi yang digunakan dalam pedoman ini sebagai berikut :

#### **3.1**

##### **hisapan osmotik**

gaya-gaya yang diupayakan pada molekul-molekul air sebagai hasil aktivitas kimia dalam tanah

#### **3.2**

##### **hisapan tanah**

potensi hisap yang ditimbulkan oleh daya ikatan permukaan partikel tanah dengan molekul air dan ikatan antar molekul air

#### **3.3**

##### **hisapan total**

fungsi dari hisapan osmotik dan hisapan matrik, hingga secara praktis dalam penerapan di bidang geoteknik adalah kadar air tanah yang diserap kation, pada umumnya penuh dengan hidrat dan gaya-gaya osmotik yang cukup konstan

#### **3.4**

##### **pengangkatan tanah (*heaving*)**

pengembangan tanah ke atas yang diakibatkan oleh membesarnya volume karena penambahan kadar air

#### **3.5**

##### **pengembangan (*swelling*)**

pembesaran volume tanah ekspansif akibat bertambahnya kadar air. Potensi pembesaran volume ini tergantung pada komposisi mineral, peningkatan kadar air, indeks plastisitas, kadar lempung dan tekanan tanah penutup

#### **3.6**

##### **penyusutan (*shrinkage*)**

pengecilan volume tanah ekspansif akibat berkurangnya kadar air. Potensi pengecilan volume ini terjadi apabila nilai kadar air lebih kecil dari nilai batas susutnya

#### **3.7**

##### **tanah ekspansif**

tanah atau batuan yang kandungan lempungnya memiliki potensi kembang-susut akibat perubahan kadar air

### 3.8

#### zona aktif

ketebalan lapisan tanah ekspansif yang dipengaruhi oleh fluktuasi kadar airnya, yaitu kedalaman dari permukaan tanah yang memiliki potensi mengembang atau menyusut

## 4 Tanah ekspansif

### 4.1 Karakteristik tanah

Tanah ekspansif memiliki karakteristik yang berbeda dengan jenis tanah pada umumnya, yaitu sebagai berikut:

a. Mineral lempung

Mineral lempung yang menyebabkan perubahan volume umumnya mengandung montmorillonite atau vermiculite, sedangkan illite dan kaolinite dapat bersifat ekspansif bila ukuran partikelnya sangat halus.

b. Kimia tanah

Meningkatnya konsentrasi kation dan bertambahnya tinggi valensi kation dapat menghambat pengembangan tanah. Sebagai contoh, kation  $Mg^{++}$  akan memberikan pengembangan yang lebih kecil dibandingkan dengan  $Na^+$ .

c. Plastisitas

Tanah dengan indeks plastisitas dan batas cair yang tinggi mempunyai potensi untuk mengembang yang lebih besar.

d. Struktur tanah

Tanah lempung yang berflokulasi cenderung bersifat lebih ekspansif dibandingkan dengan yang terdispersi.

e. Berat isi kering

Tanah yang mempunyai berat isi kering yang tinggi menunjukkan jarak antar partikel yang kecil, hal ini berarti gaya tolak yang besar dan potensi pengembangan yang tinggi.

### 4.2 Ciri-ciri kerusakan jalan di atas tanah ekspansif

Kerusakan jalan yang diakibatkan oleh perilaku tanah ekspansif dapat dilihat dengan ciri-ciri seperti di bawah ini.

#### 4.2.1 Retakan

Retak pada perkerasan terjadi akibat penyusutan maupun pengembangan tanah. Retak ini merupakan retak memanjang yang dimulai dari tepi bahu jalan menuju ke tengah perkerasan. Lebar retakan bervariasi mulai dari retak rambut sampai retak berbentuk celah hingga mencapai 10 cm. Kedalaman retakan bervariasi mulai dari 1,0 cm sampai dengan kedalaman 50 cm. Retakan memanjang arah jalan disebabkan oleh retak yang terjadi pada tanah dasar, dan secara refleksi menjalar ke struktur perkerasan yang berada di atasnya dimulai dari samping perkerasan jalan (lihat Gambar 1).



**Gambar 1 Retakan memanjang pada tepi perkerasan jalan**

(Dokumentasi foto jalan Wirosari-Cepu)

#### **4.2.2 Pengangkatan tanah**

Pengangkatan tanah atau cembungan perkerasan jalan dapat diakibatkan oleh mengembangnya tanah ekspansif yang berada di bawah perkerasan. Cembungan ini dapat mempengaruhi struktur perkerasan sehingga menyebabkan permukaan jalan bergelombang. Pada saat-saat tertentu cembungan terjadi pada tepi perkerasan akibat pemompaan tanah dasar yang lunak oleh repetisi roda kendaraan.

#### **4.2.3 Penurunan**

Penurunan permukaan perkerasan jalan dapat terjadi akibat berubahnya sifat tanah dasar menjadi tanah lunak atau terjadinya pengecilan volume akibat proses penyusutan. Penurunan permukaan yang terjadi dapat mencapai kedalaman 30 cm sehingga mengganggu kelancaran pengguna jalan.



**Gambar 2 Penurunan perkerasan jalan**

(Dokumentasi foto jalan Wirosari-Cepu)

#### **4.2.4 Longsoran**

Air permukaan yang berada di atas perkerasan dapat masuk ke dalam celah yang besar, sehingga tanah menjadi jenuh air dan kadar air di dalamnya meningkat. Dengan adanya peningkatan kadar air pada tanah ekspansif, maka kuat geser tanah semakin berkurang dan akan mencapai kuat geser kritisnya. Semakin berkurangnya kuat geser tanah akan berakibat semakin berkurang pula daya dukungnya, sehingga pada saat faktor keamanan mendekati satu, tanah dasar tidak mampu lagi menahan beban di atasnya dan longsoran pun tidak dapat dihindari.



**Gambar 3 Longsor badan jalan**

(Dokumentasi foto longsor jalan Ngawi-Caruban)

## 5 Penyelidikan tanah

Metode penyelidikan tanah yang dibutuhkan dalam menangani tanah ekspansif untuk konstruksi jalan. Dari beberapa macam penyelidikan tersebut dapat dipilih salah satu atau beberapa penyelidikan tanah yang sesuai dengan kebutuhan.

### 5.1 Studi meja (*desk study*)

Studi meja (*desk study*) dilakukan sebelum pelaksanaan penyelidikan lapangan dan laboratorium serta bertujuan untuk mempelajari kondisi daerah setempat. Kondisi yang diamati meliputi kondisi topografi, geologi permukaan serta riwayat konstruksi jalan, apabila jalan tersebut telah dibuat. Data-data yang dibutuhkan dalam pelaksanaan studi meja adalah penyediaan peta topografi dan peta geologi dengan skala peta yang merujuk pada Tabel 1, serta penginderaan jauh (*remote sensing*) untuk mengetahui kondisi permukaan tanah secara regional. Khusus untuk penyelidikan detail, peta topografi dan peta geologi perlu dibuat dengan skala yang lebih besar.

**Tabel 1 Penentuan skala peta dasar berdasarkan jenisnya**

Jenis	Skala	Sumber
Foto udara	1 : 30.000	Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional
Peta topografi	1 : 50.000 - 1 : 250.000	Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional Departemen Pertahanan (Dinas Topografi Angkatan Darat)
Peta dasar skala besar	1 : 1.000 - 1 : 5.000	Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi
Peta geomorfologi	1 : 50.000	Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional
Peta geologi	1 : 250.000	Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi
Peta tata guna lahan	1 : 250.000	Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional
Peta geohidrologi	1 : 250.000	Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi

(Panduan Geoteknik,2002)

### 5.2 Penyelidikan lapangan

Penyelidikan lapangan dilakukan untuk mendapatkan informasi lapisan tanah bawah permukaan yang sangat diperlukan baik dalam perencanaan, penanggulangan maupun pelaksanaannya. Penyelidikan ini bertujuan untuk mengetahui jenis tanah, kedalaman lapisan tanah keras, kekuatan serta konsistensi tiap lapisan.

Macam penyelidikan lapangan yang dilakukan beserta rujukan metode pelaksanaannya diberikan sebagai berikut:

- 1) pengeboran tangan, (ASTM D 1452-80);
- 2) pengeboran mesin, (ASTM D 2113-83 (1993));
- 3) penggalian sumur dan parit uji, (SNI 03-6376);
- 4) uji penetrasi standar (SPT), (SNI 03-4153);
- 5) penyondiran, (SNI 03-2827);
- 6) pengambilan contoh tanah dengan tabung, (SNI 03-4148).

### 5.3 Pengujian laboratorium

Pengujian laboratorium bertujuan untuk memperoleh sifat fisik maupun teknik tanah yang bersangkutan. Pengujian tanah di laboratorium dan metode pengujiannya dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- 1) pengujian Klasifikasi, terdiri dari:
  - a) pengujian Batas-Batas Atterberg, yang menghasilkan indeks plastisitas berdasarkan pengujian batas cair (SNI 03-1967) dan pengujian batas plastis (SNI 03-1966);
  - b) pengujian analisis butir dengan hidrometer ( SNI 03-3423 );
  - c) tata cara pengklasifikasian tanah dengan cara unifikasi ( SNI 03-6371).
- 2) pengujian Kekuatan untuk mendapatkan konsistensi dan kekuatan tanah, terdiri dari:
  - a) pengujian Triaksial (SNI 03-4813 dan SNI 03-2455);
  - b) pengujian Geser Langsung (SNI 03-3420 dan SNI 03-2813);
  - c) pengujian Kuat Tekan Bebas (SNI 03-3638);
  - d) pengujian CBR (SNI 03-1738).
- 3) pengujian sifat ekspansif, terdiri dari :
  - a) uji pengembangan (SNI 03-6795 ) dan uji penyusutan (SNI 03-4144);
  - b) uji tekanan mengembang (SNI 13-6424) dilakukan untuk mendapatkan besarnya tekanan mengembang pada tanah yang dipadatkan.
- 4) pengujian mineral di dalam tanah lempung dengan menggunakan metode *X-Ray Diffraction*;
- 5) pengukuran hisapan tanah, dilakukan untuk mendapatkan parameter hisapan tanah. Metode-metode pengukuran tersebut akan dibahas pada 8.4.

## 6 Identifikasi tanah ekspansif

### 6.1 Identifikasi langsung

Identifikasi langsung dilakukan melalui pengukuran pengembangan secara langsung, baik terhadap contoh tanah terganggu maupun tidak terganggu. Metode pengujian yang tersedia saat ini cukup beragam, tetapi pedoman ini hanya akan membahas beberapa di antaranya yaitu sebagai berikut:

#### 6.1.1 Kembang bebas (*free swell*)

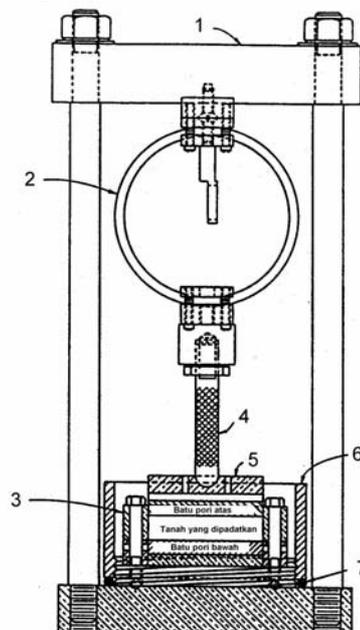
Uji kembang bebas dilakukan dengan cara menempatkan sejumlah tanah kering lolos saringan No. 40 ke dalam sebuah silinder ukur berisi air serta mengukur volume pengembangannya setelah tanah turun seluruhnya. Nilai kembang bebas dinyatakan sebagai perbandingan perubahan volume terhadap volume awalnya, yang dinyatakan dalam persen. Sodium montmorillonite (bentonite) dapat memiliki kembang bebas sebesar 1200% sampai dengan 2000%.

Tanah yang memiliki nilai kembang bebas minimal 100% akan mengalami pengembangan yang cukup besar di lapangan saat berada pada kondisi basah. Tanah pada kondisi ini perlu dipertimbangkan dalam desain.

### 6.1.2 Perubahan volume potensial

Perubahan volume potensial atau disebut juga *potential volume change (PVC)* diukur dengan menggunakan PVC meter yang diperlihatkan pada Gambar 4. Pengujian ini dilakukan dengan cara menempatkan contoh tanah terganggu pada cetakan pemadatan. Selanjutnya contoh tanah dipadatkan dengan usaha pemadatan dengan metode *modified Proctor* sebesar pada kadar air alami lapangan. Contoh tanah dijenuhkan dan dibiarkan mengembang hingga menekan cincin ukur. Besarnya tekanan pada cincin ukur dinyatakan sebagai indeks pengembangan dan nilainya dikorelasikan dengan nilai perubahan volume potensial dengan menggunakan grafik Gambar 5.

Pengujian ini memberikan keuntungan karena sederhana dan telah distandardisasikan. Meskipun demikian, pengujian ini menggunakan contoh tanah terganggu sehingga nilai perubahan volume potensial dan indeks pengembangan ini lebih sesuai jika digunakan dalam identifikasi dan bukan sebagai parameter desain.

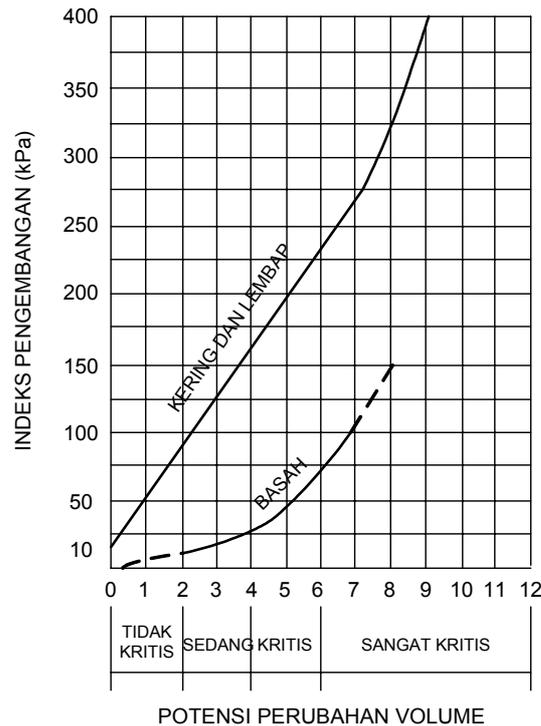


#### Keterangan gambar:

- |                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| 1 Pelat pembebanan  | 5 Penutup            |
| 2 Cincin ukur       | 6 Wadah              |
| 3 Cetakan pemadatan | 7 Cincin berbentuk O |
| 4 Batang pengatur   |                      |

**Gambar 4 Peralatan pengujian perubahan volume potensial**

(Nelson & Miller, 1992)



**Gambar 5 Indeks pengembangan terhadap potensi perubahan volume**

(Lambe, 1960)

### 6.1.3 Uji indeks pengembangan

Uji indeks pengembangan ini juga telah distandardisasi. Prinsip pengujiannya serupa dengan uji perubahan volume potensial, yang membedakannya hanyalah penggunaan beban tambahan konstan.

Pengujian dilakukan terhadap contoh tanah yang lolos saringan No. 4 dan berada pada kondisi kadar air mendekati optimum. Tanah dibiarkan selama 6 – 30 jam dan dipadatkan di dalam cetakan berdiameter 10,2 cm. Jika dibutuhkan, selanjutnya kadar air disesuaikan agar contoh tanah mendekati derajat kejenuhan sebesar 50%. Kemudian diberikan beban tambahan sebesar 6,9 kPa dan contoh tanah dibasahi. Perubahan volume dipantau selama 24 jam. Nilai indeks pengembangan hingga pembulatan terkecil dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$EI = 100 \Delta H \times F \quad (1)$$

dengan pengertian:

EI adalah indeks pengembangan

$\Delta H$  adalah persentase pengembangan

F adalah persentase butiran tanah lolos saringan No.4

Potensi pengembangan tanah juga telah dikelompokkan berdasarkan nilai indeks pengembangannya, sebagai berikut:

**Tabel 2 Korelasi nilai indeks pengembangan dengan potensi pengembangan**

Indeks pengembangan (EI)	Potensi pengembangan
0 – 20	Sangat rendah
21 – 50	Rendah
51 – 90	Sedang
91 – 130	Tinggi
> 130	Sangat tinggi

(Nelson dan Miller, 1992)

## 6.2 Identifikasi tidak langsung

Identifikasi tanah ekspansif secara sederhana melalui uji laboratorium umumnya menggunakan nilai Batas Atterberg dan persentase kandungan lempung untuk menggambarkan potensi pengembangan suatu tanah secara kualitatif. Identifikasi cara tidak langsung yang dijelaskan di dalam pedoman ini tidak berdiri sendiri melainkan perlu dibandingkan pula dengan cara lainnya.

### 6.2.1 Nilai indeks plastisitas (PI) dan batas susut (SI)

Identifikasi tanah ekspansif secara tidak langsung dengan menggunakan nilai indeks plastisitas (PI) dan nilai indeks susut (SI) diperlihatkan pada Tabel 3. Berdasarkan tabel tersebut dapat diperoleh besarnya tingkat pengembangan yang dibagi menjadi empat kelas yaitu rendah, sedang, tinggi dan sangat tinggi.

**Tabel 3 Korelasi indeks plastisitas, indeks susut dengan tingkat pengembangan**

PI (%)	SI (%)	Tingkat Pengembangan
< 12	< 15	Rendah
12 – 23	13 – 50	Sedang
23 – 32	30 – 40	Tinggi
> 32	> 40	Sangat Tinggi

(Chen, Raman ,1967)

### 6.2.2 Tingkat keaktifan (*activity*)

Batas Atterberg dan fraksi lempung dapat dikombinasikan menjadi satu parameter yang dinamakan tingkat keaktifan (*activity*). Pada umumnya, tanah dengan indeks plastisitas (PI) kurang dari 15% tidak akan memperlihatkan perilaku pengembangan. Untuk tanah dengan PI lebih besar dari 15%, kadar lempung dan batas Atterbergnya harus diuji. Persamaan berikut untuk menentukan tingkat keaktifan suatu tanah:

$$A_c = \frac{PI}{CF} \quad (2)$$

dengan pengertian:

$A_c$  adalah tingkat keaktifan (tanpa satuan)

PI adalah indeks plastisitas (%)

CF adalah persentase fraksi lempung (%)

Jika dikorelasikan dengan potensi pengembangan, maka tanah lempung dibagi menjadi tiga kelas berdasarkan tingkat keaktifannya, seperti yang diperlihatkan pada tabel berikut:

**Tabel 4 Korelasi tingkat keaktifan dengan potensi pengembangan**

Tingkat keaktifan	Potensi Pengembangan
< 0,75	Tidak Aktif
0,75 – 1,25	Normal
> 1,25	Aktif

(Skempton, 1953)

Untuk tanah yang dipadatkan dengan pemadatan standar pada kadar air optimum, tingkat keaktifannya ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$A_c = \frac{PI}{CF - 10} \quad (3)$$

dengan pengertian:

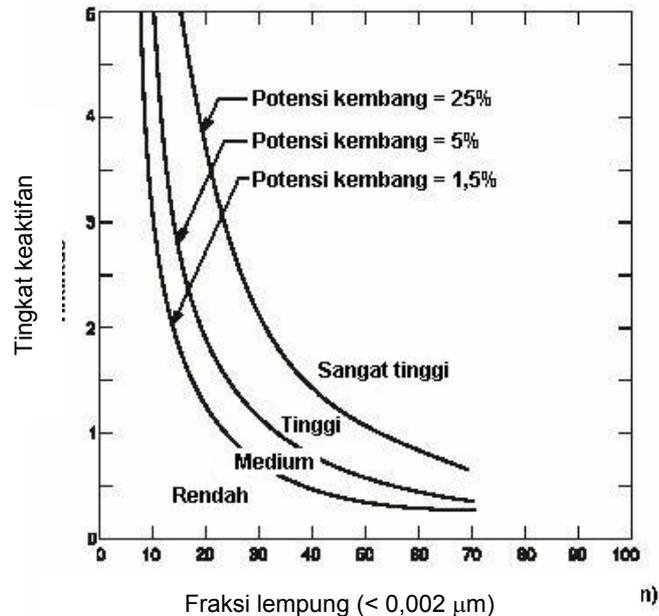
$A_c$  adalah tingkat keaktifan (tanpa satuan)

PI adalah indeks plastisitas (%)

CF adalah persentase fraksi lempung berdiameter kurang dari 0,002 mm (%)

10 adalah konstanta

Hasil perhitungan tingkat keaktifan dengan persamaan di atas dikaitkan dengan persentase fraksi lempungnya, kemudian diplot ke dalam grafik pada Gambar 6 untuk memperoleh besarnya tingkat potensi mengembang tanah yang dipadatkan.



**Gambar 6 Klasifikasi potensi kembang**

(Seed, 1962)

### 6.2.3 Mineral lempung

Mineral lempung merupakan faktor utama yang mengontrol perilaku tanah ekspansif. Tabel 5 di bawah ini memperlihatkan hubungan antara jenis mineral dengan tingkat keaktifan. Dari tabel tersebut terlihat bahwa apabila suatu lempung memiliki kandungan mineral monmorilonite maka tanah tersebut merupakan tanah ekspansif. Metode *X-ray diffraction* merupakan metode yang direkomendasikan untuk dipakai di antara metode-metode lainnya karena relatif murah dan cepat.

**Tabel 5 Hubungan antara jenis mineral dengan tingkat keaktifan**

Mineral	Keaktifan
Kaolinite	0,33 – 0,46
Illite	0,90
Montmorilonite (Ca)	1,5
Montmorilonite (Na)	7,2

(Skempton, 1953)

## **7 Pertimbangan desain**

### **7.1 Kembang susut**

Perubahan dari musim hujan ke kemarau dan sebaliknya, akan menimbulkan siklus basah-kering yang mengakibatkan adanya bagian yang mengalami saat-saat kering di dekat permukaan dan terjadinya retakan-retakan akibat proses pengawetan atau desikasi. Selama masa penyerapan yang besar, air akan masuk ke dalam retakan-retakan tersebut sehingga mengakibatkan tanah akan mengembang; dan selama masa kering, tanah tersebut akan menyusut.

Untuk pertimbangan desain, besarnya pengembangan yang dapat ditolerir sesuai jenis konstruksi perkerasan perlu diperkirakan. Perlu diketahui pula batasan perbedaan penurunan konstruksi perkerasan yang diizinkan.

### **7.2 Kondisi retak**

Pengecilan volume akibat penyusutan akan menimbulkan tegangan tarik pada permukaan tanah dasar dan akan menarik konstruksi perkerasan yang berada di atasnya. Apabila kekuatan perkerasan tidak mampu menahan kuat tarik tanah ekspansif, maka akan timbul retakan kecil. Retakan ini terjadi akibat regangan tanah yang dilampaui, sehingga retak kecil pada permukaan tanah ini semakin lama akan semakin membesar dan terbuka.

### **7.3 Kondisi arah memanjang**

Proses kembang-susut tidak hanya berpengaruh terhadap arah melintang tetapi juga terhadap arah memanjang (longitudinal). Perbedaan elevasi permukaan jalan pada arah lateral yang diakibatkan tanah dasar mengembang dan menyusut menimbulkan ketidakrataan permukaan jalan. Besarnya perbedaan pergerakan vertikal arah longitudinal biasanya diambil setengah dari besarnya pengembangan maksimum atau penyusutan maksimum.

### **7.4 Stabilitas**

#### **7.4.1 Stabilitas lereng**

Kestabilan badan jalan di atas tanah ekspansif menyangkut stabilitas lereng dan daya dukung tanah. Tanah lempung ekspansif akan berkurang kekuatannya seiring dengan waktu, misalnya pada tanah lempung yang terkonsolidasi lebih dan bercelah atau lempung kaku, maka nilai kekuatan geser yang terendah harus diambil untuk digunakan dalam analisis stabilitas. Hasil pengamatan menyatakan bahwa nilai kekuatan geser terendah untuk tanah lempung berkisar 15 - 35 kPa.

Lereng yang tersusun dari tanah lempung bersifat mudah retak, sehingga seringkali menimbulkan ketidakstabilan lereng. Air yang berada di permukaan merembes masuk ke dalam retakan, sehingga tanah lempung menjadi bersifat lunak. Penanganan dengan drainase harus dilakukan untuk mencegah agar air permukaan tidak menuju ke arah lereng.

Stabilitas lereng dapat dipertahankan melalui penanaman tumbuhan yang sesuai dengan kondisi tanah tersebut, seperti rumput-rumputan yang akarnya menyebar sehingga berfungsi menahan erosi permukaan. Pepohonan boleh ditanam di luar jalan sejauh 15 meter dari jalan beraspal.

#### **7.4.2 Daya dukung tanah**

Daya dukung tanah ditentukan berdasarkan dua kriteria perilaku keruntuhan tanah sebagai berikut:

#### 7.4.2.1 Kriteria keruntuhan batas (*ultimate failure*)

Kriteria yang sering digunakan untuk keruntuhan batas, menurut Coulomb adalah kombinasi antara tegangan normal dan tegangan geser yang diberikan dalam persamaan berikut:

$$S = c + \sigma_n \tan \phi \quad (4)$$

dengan pengertian:

S adalah kuat geser tanah (kPa)

c adalah kohesi tanah (kPa)

$\sigma_n$  adalah tegangan normal pada bidang geser (kPa)

$\phi$  adalah sudut tahanan geser ( $^\circ$ )

#### 7.4.2.2 Kriteria perilaku elastis tanah

Karakteristik tanah yang sangat penting pada perilaku elastis adalah bagaimana repetisi pembebanan terhadap tanah, dengan beban yang diberikan tidak melebihi tegangan lelehnya, serta tidak terjadi deformasi permanen pada tanah. Teori perilaku tanah mengacu kepada teori Boussinesq dimana distribusi tegangan adalah semi infinitif, homogen dan isotropis.

### 7.5 Faktor keamanan

Dalam mendesain jalan di atas tanah ekspansif terdapat beberapa ketidakpastian yang disebabkan oleh variabilitas tanah yang kompleks. Ketidakpastian dan cara pendekatannya harus dievaluasi untuk tiap kasusnya, sehingga faktor keamanan yang diambil cukup beralasan yang meliputi keandalan data tanah dan toleransi konstruksi. Faktor keamanan timbunan harus diambil untuk kondisi jangka pendek selama pelaksanaan. Nilai-nilai faktor keamanan diperlihatkan pada Tabel 6.

**Tabel 6 Faktor keamanan**

Kelas jalan	Faktor keamanan
I & II	1,4
III & IV	1,3

(Panduan Geoteknik 4, 2002)

Faktor keamanan ini telah mempertimbangkan hal-hal berikut :

- 1) investigasi untuk jalan kelas I dan kelas II harus menghasilkan data dengan kualitas yang lebih baik, oleh karena itu nilai parameter tanah yang digunakan dapat ditentukan;
- 2) biaya yang harus dikeluarkan akibat kerusakan yang timbul akan lebih kecil untuk kelas jalan yang lebih rendah.

### 7.6 Parameter desain

#### 7.6.1 Kuat geser tanah jenuh

Kuat geser tanah merupakan fungsi dari parameter-parameter kekuatan tanah yaitu kohesi (c) dan sudut geser dalam ( $\phi$ ). Parameter nilai c dan  $\phi$  tanah lempung didapat melalui pengujian triaksial, yang dilakukan melalui pengujian berikut

##### 7.6.1.1 Pengujian tak terkonsolidasi – tak terdrainase (*unconsolidated-undrained UU*)

Pada prinsipnya pengujian tanah dengan cara tak terkonsolidasi – tak terdrainase dapat memungkinkan kekuatan tanah tak terdrainase untuk tanah kempung sesuai dengan kondisi lapangan, dimana angka pori awal pada pengujian tidak berubah. Hasil pengujian dinyatakan

dalam tegangan total dengan selubung keruntuhan horisontal, yaitu  $\phi_u = 0$  dan besarnya kekuatan geser  $\tau_f = c_u$

### 7.6.1.2 Pengujian terkonsolidasi – tak terdrainase (*consolidated-undrained CU*)

Uji triaksial terkonsolidasi – tak terdrainase dilakukan dengan mengukur tekanan air pori pada keadaan tak terdrainase. Hasil pengujian dinyatakan dalam tegangan efektif.

Untuk tanah lempung yang terkonsolidasi normal, maka nilai  $c' = 0$ , sedangkan untuk tanah lempung yang terkonsolidasi berlebihan, maka nilai  $c'$  biasanya tidak melebihi 30 kPa dengan nilai  $\phi'$  berkisar antara  $20^\circ - 35^\circ$ .

### 7.6.2 Poisson's ratio ( $\mu$ )

Poisson's ratio ( $\mu$ ) tanah lempung dinyatakan di dalam Tabel 7 berikut ini:

**Tabel 7 Nilai poisson's ratio tanah lempung**

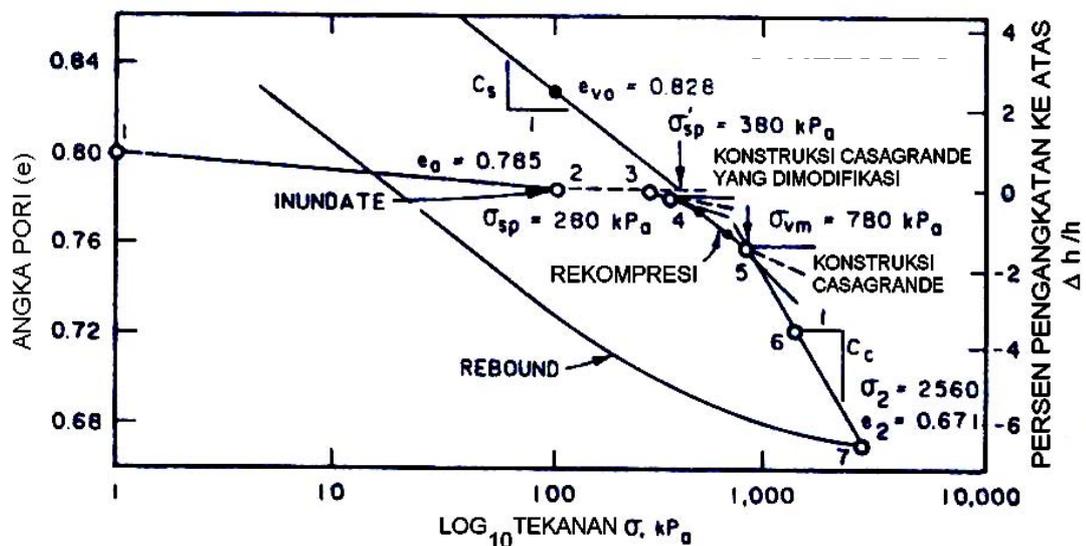
Kondisi tanah	Poisson's ratio ( $\mu$ )
Lempung jenuh	0,4 – 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 – 0,3

(Bowles, 1977)

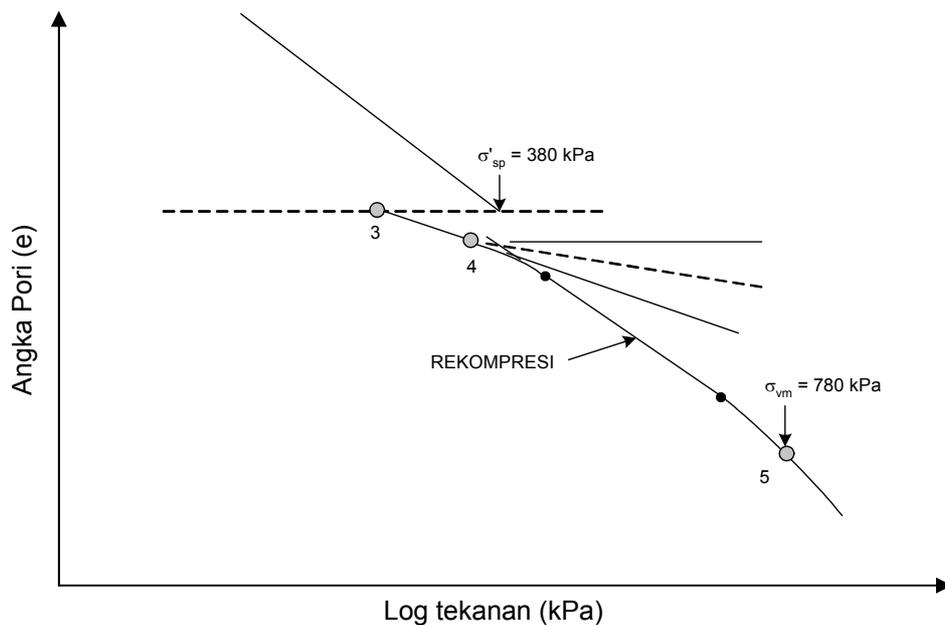
### 7.7 Tekanan mengembang

Pendekatan praktis untuk memperkirakan perubahan volume adalah dengan melakukan pengujian lintas dari kondisi tanah tak jenuh ke dalam kondisi jenuh. Prinsip utama pengujian adalah menempatkan contoh tanah tak terganggu di dalam oedometer serta memberikan beban tambahan sebesar 6,9 kPa selama 24 jam. Selanjutnya contoh tanah tersebut dijenuhi dan diukur jumlah perubahan volumenya.

Melalui pengujian ini dapat diukur besarnya tekanan mengembang serta perilaku tegangan dan regangan yang akan digunakan untuk memperkirakan besarnya pengangkatan tanah. Metode pengujian perubahan volume yang digunakan adalah Metode C yang mengacu pada AASHTO (1993). Metode ini umum digunakan karena menggunakan alat uji konsolidasi biasa. Metode ini juga membutuhkan kurva *rebound* untuk mendefinisikan garis kompresi sebelum tekanan mengembang tercapai. Besarnya tekanan mengembang dapat dilakukan dengan prosedur yang diperlihatkan pada Gambar 7.



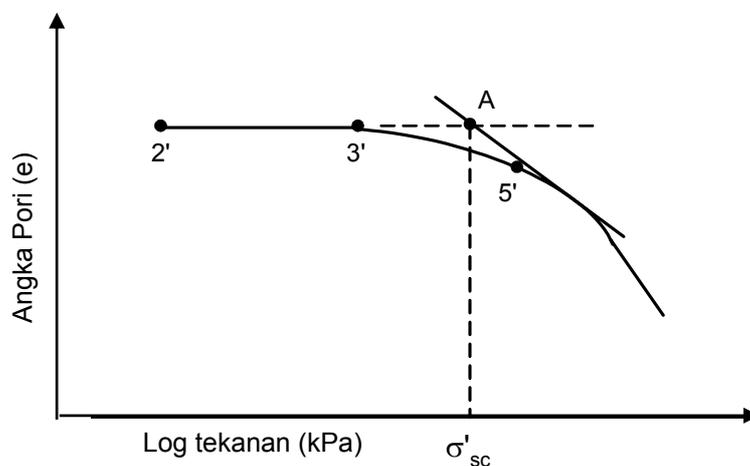
**Gambar 7 Kurva hubungan angka pori dan log tekanan**



**Gambar 8 Penentuan tekanan mengembang**  
(AASHTO, 1993)

#### 7.7.1 Metode Nelson dan Miller

Metode yang lebih mudah dan sederhana dikembangkan oleh Nelson dan Miller (1992), seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



**Gambar 9 Penentuan tekanan mengembang**  
(Nelson & Miller, 1992)

## 8 Analisis pengangkatan tanah ke atas pada tanah ekspansif

Perubahan volume atau tekanan mengembang tanah ekspansif telah ditentukan melalui berbagai prosedur pengujian di laboratorium. Analisis mekanika tanah untuk memperkirakan perubahan volume membutuhkan pendefinisian kondisi tegangan awal dan tegangan akhir tanah. Tegangan-tegangan tersebut harus ditentukan berdasarkan pendekatan terhadap variabel-variabel keadaan tegangan. Untuk menentukan keadaan tegangan pada tanah tak jenuh dibutuhkan dua variabel keadaan tegangan.

Variabel yang sering digunakan adalah salah satu dari dua tegangan efektif yaitu variabel ( $\sigma - u_a$ ) atau ( $\sigma - u_w$ ) dan tegangan hisapan matrik ( $u_a - u_w$ ). Perubahan volume tanah ekspansif umumnya disebabkan oleh variasi kadar air yang mengakibatkan perubahan dalam variabel tegangan hisapan matrik ( $u_a - u_w$ ).

### 8.1 Hubungan konstitutif untuk tanah ekspansif

Perkembangan terakhir dalam analisis pengembangan tanah ekspansif adalah pendefinisian variabel keadaan tegangan yang sesuai untuk tanah tak jenuh. Perubahan volume pada tanah tak jenuh dapat dihubungkan dengan variabel keadaan tegangan, yaitu dengan menggunakan pendekatan hubungan konstitutif, seperti di bawah ini.

#### 8.1.1 Keadaan tegangan

Tanah yang memiliki potensi untuk mengembang, baik tanah tak jenuh maupun tanah jenuh memiliki tekanan air pori yang negatif. Pada tanah yang berada dalam keadaan jenuh air, tekanan air pori sekurang-kurangnya memiliki dua komponen yaitu tekanan air pori ( $u_w$ ) dan tekanan udara pori ( $u_a$ ), dimana nilai  $u_w$  dan  $u_a$  tersebut tidak sama besar. Perbedaan tekanan yang terjadi diseimbangkan oleh gaya tarik permukaan pada bidang kontak udara dan air. Perbedaan tekanan ini diketahui sebagai tekanan kapiler atau hisapan matrik ( $h_c$ ) dan merupakan variabel persamaan tegangan tunggal yang valid serta sama dengan persamaan berikut:

$$h_c = (u_a - u_w) \quad (5)$$

dengan pengertian:

$h_c$  adalah hisapan matrik (kPa)

$u_a$  adalah tekanan udara pori (kPa)

$u_w$  adalah tekanan air pori (kPa)

Apabila nilai  $u_w$  mendekati nilai  $u_a$ , maka nilai hisapan akan mengecil sehingga tingkat kejenuhan membesar. Hisapan ini tidak pernah bernilai negatif. Pada tanah dalam kondisi jenuh dengan nilai  $u_w > 0$ , maka nilai ( $u_a - u_w$ ) diambil sama dengan nol. Tabel di bawah ini memperlihatkan persamaan tegangan efektif untuk tanah tak jenuh.

**Tabel 8 Persamaan tegangan efektif untuk tanah tak jenuh**

No.	Persamaan	Deskripsi variabel
1.	$\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w)$	$\sigma$ = tegangan normal total $\sigma'$ = tegangan normal efektif $\chi$ = variabel yang berhubungan dengan kejenuhan $u_a$ = tekanan pada fase gas dan uap $u_w$ = tekanan air pori
2.	$\sigma' = \sigma + \psi p'$	$\psi$ = parameter dengan rentang nilai 0 – 1 $p'$ = penurunan tekanan air pori
3.	$\sigma' = \sigma - \beta' u_w$	$\beta'$ = faktor pengaruh kontak yang diukur dari sejumlah kontak pada tarikan efektif dalam kontribusi kekuatan tanah

(Nelson & Miller, 1992)

#### 8.1.2 Hubungan konstitutif

Perubahan volume pada tanah tak jenuh dapat dihubungkan dengan variabel keadaan tegangan yaitu menggunakan pendekatan hubungan konstitutif. Karena variabel keadaan tegangan sifatnya bebas, maka hubungan antara tegangan dan regangan harus digambarkan dalam tiga sumbu seperti yang diperlihatkan untuk angka pori. Permukaan

konstitutif dapat berbentuk linier dengan memplotkan parameter berat volume (angka pori, kadar air atau kejenuhan) terhadap logaritma dari variabel keadaan tegangan. Persamaan hubungan konstitutif dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\Delta e = C_t \Delta \log(\sigma - u_a) + C_m \Delta \log(u_a - u_w) \quad (6)$$

dengan pengertian :

- $\Delta e$  adalah perubahan angka pori
- $C_c$  adalah indeks kompresi
- $(\sigma - u_a)$  adalah variabel tegangan efektif tanah jenuh (kPa)
- $C_m$  adalah indeks hisapan
- $(u_a - u_w)$  adalah hisapan matrik (kPa)

Hubungan konstitutif untuk fase air dapat disamakan, yaitu :

$$\Delta_w = D_t \Delta \log(\sigma - u_a) + D_m \Delta \log(u_a - u_w) \quad (7)$$

dengan pengertian:

- $\Delta_w$  adalah perubahan kadar air
- $D_t$  adalah indeks kadar air sesuai dengan variabel tegangan efektif tanah jenuh
- $D_m$  adalah indeks kadar air sesuai dengan hisapan matrik

### 8.1.3 Indeks hisapan

Sebagai pendekatan, maka nilai indeks hisapan dapat diperoleh dari hubungan antara perubahan hisapan dengan perubahan volume. Hubungan antara perubahan hisapan terhadap perubahan volume ditentukan dalam beberapa cara yang diperlihatkan pada Tabel 9. Uji hisapan dengan menggunakan beban rendah memiliki prosedur yang sangat sederhana dan tidak memerlukan peralatan khusus. Nilai indeks hisapan harus diukur terhadap variasi perubahan yang terjadi di lapangan.

**Tabel 9 Batasan nilai indeks hisapan tanah**

Acuan	Simbol	Definisi	Nilai
Fredlund (1979)	$C_m$	Kemiringan angka pori terhadap log hisapan matrik: $C_m = \frac{\Delta e}{\Delta \log(u_a - u_w)}$	0,1 – 0,2 (tanah lempung)
Sherry (1982)	$C_m$	Kemiringan angka pori terhadap log hisapan matrik didekati dengan persamaan: $C_m = \frac{\Delta e}{\Delta \log(u_a - u_w)}$	0,23 (tanah lumpur)

(Nelson & Miller, 1992)

### 8.2 Hisapan tanah

Hisapan total di dalam tanah terdiri dari dua bagian, yaitu hisapan osmotik dan hisapan matrik yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$h = f(h_o, h_c) \quad (8)$$

dengan pengertian:

- $h$  adalah hisapan total (kPa)
- $h_o$  adalah hisapan osmotik (kPa)
- $h_c$  adalah hisapan matrik (kPa)

Pada beberapa literatur, fungsi  $f$  dinyatakan sebagai penjumlahan  $h_o$  dan  $h_c$ .

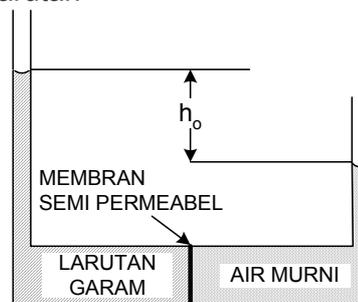
### 8.3 Hisapan osmotik

Hisapan osmotik di dalam tanah lempung berasal dari gaya-gaya molekul-molekul air sebagai hasil aktivitas kimia tanah. Gambar 10 merupakan ilustrasi hisapan osmotik alami dimana terjadi kontak antara air pori dan larutan garam melalui membran semipermeabel. Membran permeabel merupakan membran yang lolos terhadap molekul air tetapi tidak terhadap larutan. Konsentrasi larutan menarik molekul air sehingga cenderung mengalir ke dalam larutan melalui membran semipermeabel. Keseimbangan akan dicapai bila tinggi tekanan hidrostatik ( $h_o$ ) dari larutan menjadi cukup besar untuk mengimbangi gaya osmotik yang cenderung mendorong air ke dalam larutan. Perbedaan tekanan osmotik diberikan dalam persamaan berikut:

$$\Omega = \rho_s g h_o = RT [C_s] \quad (9)$$

dengan pengertian:

- $\Omega$  adalah tekanan osmotik (kPa)
- $\rho_s$  adalah kerapatan larutan ( $\text{kN/m}^3$ )
- $g$  adalah percepatan gravitasi
- $h_o$  adalah tinggi tekanan osmotik (m)
- $R$  adalah konstanta gas universal
- $T$  adalah temperatur ( $^\circ$ )
- $[C_s]$  adalah konsentrasi molar larutan



**Gambar 10 Pengembangan tekanan osmotik melewati membran yang semi permeabel**

(Nelson & Miller, 1992)

#### 8.3.1 Hisapan matrik

Gambar 11 memperlihatkan hubungan keberadaan udara dan air pada tanah tak jenuh. Ketinggian di atas muka air, dimana tanah akan tetap jenuh, akan dikendalikan oleh ukuran pori dan perbedaan tekanan udara dan air.

Pembahasan mengenai sifat alami hubungan air dan udara dan menyatakan bahwa untuk kebutuhan desain hubungan tersebut dapat dikondisikan sebagai membran yang menggambarkan fase tanah dengan jelas.

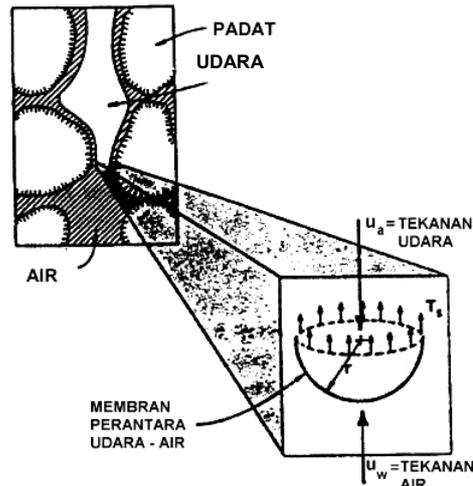
Keseimbangan membran dinyatakan di dalam persamaan berikut:

$$(u_a - u_w) = \frac{2T_s}{r} \quad (10)$$

dengan pengertian:

- $r$  adalah jari-jari dari sebuah bola ideal pada bagian bawah saluran udara
- $T_s$  adalah tarikan permukaan membran
- $u_a$  adalah tekanan udara
- $u_w$  adalah tekanan air

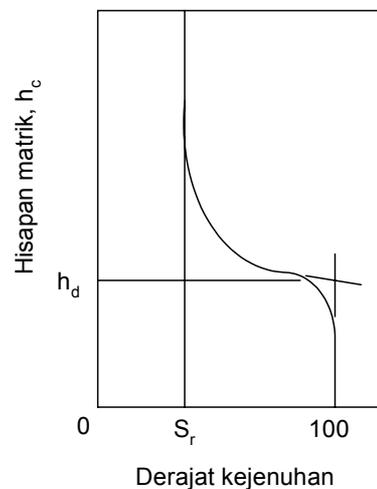
Nilai  $(u_a - u_w)$  disebut hisapan matrik. Dalam satuan tinggi tekanan, hisapan matrik ini dinyatakan dengan  $h_c$ .



**Gambar 11 Hubungan air dan udara dalam tanah**

(Nelson & Miller, 1992)

Pada bagian bawah saluran udara, seperti diperlihatkan pada Gambar 11, tanah dalam keadaan jenuh. Seiring dengan membesarnya hisapan, besarnya hisapan pada bidang kontak air-udara akan terpecah, sehingga tanah menjadi tak jenuh. Kondisi tersebut dinyatakan dengan tinggi tekan berpindah yang diberi simbol  $h_d$ , seperti ditunjukkan pada Gambar 12.



**Gambar 12 Kurva penyimpanan (retensi) air untuk tanah**

(Nelson & Miller, 1992)

### 8.3.2 Hisapan total

Hisapan total merupakan fungsi dari hisapan osmotik dan hisapan matrik pada tanah. Pada sebagian besar aplikasi rekayasa geoteknik, rentang kadar air dalam tanah merupakan kation yang terserap yang umumnya terhidrasi penuh dan gaya osmotiknya cukup konstan. Perubahan yang signifikan pada hisapan osmotik tidak akan terjadi pada rentang kadar air yang umumnya muncul di lapangan. Perubahan hisapan total akan timbul apabila terjadi perubahan hisapan matrik, seperti diperlihatkan pada persamaan berikut:

$$\Delta h_o = 0$$

$$\Delta h = F(\Delta h_o, \Delta h_c) = \Delta h_c$$

(11)

dengan pengertian:

$\Delta h$  adalah perubahan hisapan total

$\Delta h_o$  adalah perubahan hisapan osmotik

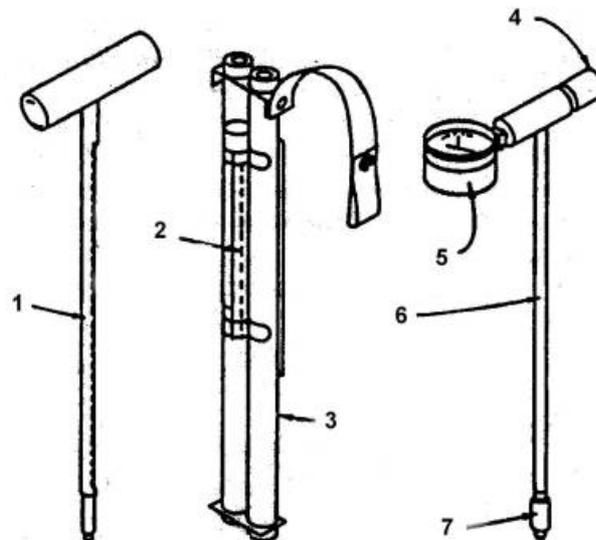
$\Delta h_c$  adalah perubahan hisapan matrik

#### 8.4 Pengukuran hisapan tanah

Secara praktis dalam penerapannya di bidang geoteknik, hisapan tanah merupakan besarnya kadar air tanah yang diserap kation, pada umumnya penuh dengan hidrat dan gaya-gaya osmotik dengan cukup konstan. Seperti telah dijelaskan pada sub pasal sebelumnya perubahan hisapan total yang terjadi hanya disebabkan oleh perubahan hisapan matrik, sehingga metode-metode yang dikemukakan berikut ini merupakan metode pengukuran besarnya hisapan matrik.

##### 8.4.1 Tensiometer

Tensiometer terdiri dari batu pori halus yang ditempatkan langsung berhubungan dengan tanah. Tensiometer terdiri dari alat pengukur tekanan seperti arloji ukur, manometer atau transducer elektronik yang dihubungkan dengan batu pori pada bagian samping tanah yang berlawanan untuk mencatat tekanan dalam air. Untuk mempertahankan batu pori tetap dalam kondisi jenuh air sehingga tidak dilewati oleh udara, tekanan gelembungnya harus lebih besar daripada hisapan tanah terukur. Tensiometer *Quick Draw* merupakan alat yang dapat digunakan untuk mengukur besarnya hisapan di lapangan (lihat Gambar 13).



Keterangan gambar:

- |   |                  |   |  |
|---|------------------|---|--|
| 1 | Alat penginti    | 5 | Arloji pembacaan                         |
| 2 | Batang pembersih | 6 | Alat penduga (kira-kira sepanjang 0,5 m) |
| 3 | Tabung pembawa   | 7 | Ujung sensor keramik poros               |
| 4 | Tombol pengatur  |   |  |

**Gambar 13 Tensiometer Quick Draw**

(Nelson & Miller, 1992)

Tensiometer juga dilengkapi dengan sebuah tabung fleksibel yang digunakan untuk pemasangan yang lebih permanen baik di lapangan maupun di laboratorium. Oleh karena ujung sensor keramik bersifat poros, larutan garam dapat merembes ke dalam keramik sehingga tensiometer hanya dapat mengukur komponen hisapan matrik.

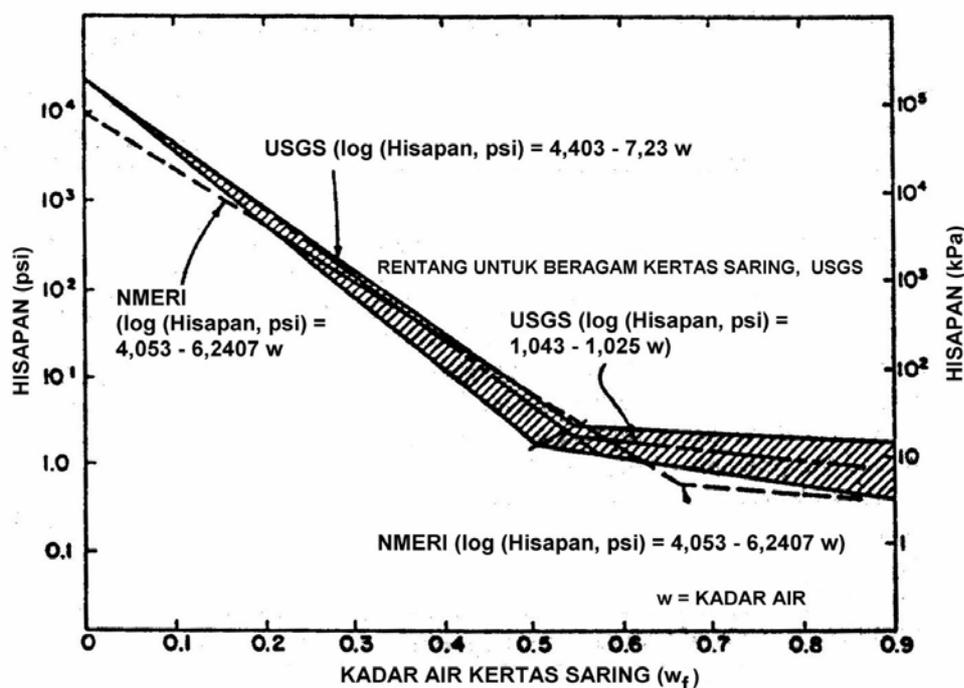
Tensiometer umumnya memiliki pengukuran yang terbatas untuk nilai hisapan kurang dari 1 atmosfer (101,3 kPa), sedangkan hisapan yang lebih besar dari 1 atmosfer dapat menimbulkan rongga di dalam tensiometer. Pada sebagian besar tanah ekspansif umumnya

nilai hisapan matrik di lapangan lebih besar dari 1 atmosfer. Dengan demikian, digunakan metode pengukuran dengan sensor *Thermal Matric Potential* dan metode kertas saring yang akan dijelaskan pada dua sub pasal berikut ini.

#### 8.4.2 Metode kertas saring

Pada metode ini, contoh tanah dan kertas saring yang telah dikalibrasi ditempatkan di dalam kontainer yang letaknya saling berdekatan. Kontainer yang digunakan terbuat dari material yang tahan karat. Kertas saring tidak boleh menyentuh contoh tanah. Contoh tanah dan kertas saring didiamkan pada temperatur yang konstan selama sekurang-kurangnya 7 hari agar mencapai kesetimbangan. Setelah mencapai 7 hari, kertas saring dilepaskan dan ditentukan kadar airnya dengan ketelitian penimbangan  $\pm 0,001$  gram, pada kondisi sebelum dan setelah dikeringkan di dalam oven.

Metode kertas saring ini dapat digunakan untuk mengukur nilai hisapan tanah dengan rentang  $0 - 10^6$  kPa ( $0 - 148$  atm). Metode ini telah digunakan pada sejumlah penyelidikan lapangan dan terbukti memberikan hasil yang memuaskan. Keuntungan yang diperoleh jika menggunakan metode ini adalah rentang pengukuran hisapannya yang cukup besar serta kesederhanaan prosedurnya. Sedangkan kerugiannya adalah tingkat ketepatan penimbangan kertas saring harus cukup tinggi.



Catatan : USGS adalah U.S Geological Survey  
NMERI adalah New Mexico Engineering Research Institute

**Gambar 14 Hubungan pengukuran dengan kertas saring**

(Nelson & Miller, 1992)

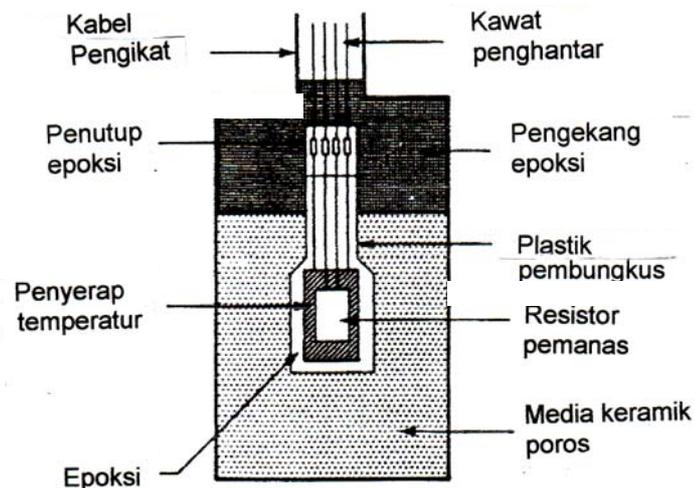
#### 8.4.3 *Thermal Matric Potential*

Sensor *thermal matric potential* memiliki prinsip kerja dimana konduktivitas termal material keramik poros sebanding dengan kadar air material tersebut. Dengan mengukur kecepatan penurunan panas keramik poros, kadar air di dalam keramik pun dapat ditentukan. Kadar air di dalam keramik tersebut merupakan fungsi dari hisapan matrik. Rentang hisapan matrik yang dapat diukur dengan menggunakan sensor *thermal matric potential* adalah  $0 - 200$  kPa.

Sejumlah peralatan telah dikembangkan dengan menggunakan sensor keramik porous hasil kalibrasi yang dimasukkan ke dalam tanah dan dibiarkan hingga mencapai kondisi seimbang dengan tanahnya. Sensor tersebut dikalibrasi dengan menggunakan peralatan pelat tekanan untuk menentukan hubungan antara kadar air dan hisapan. Setelah kondisi seimbang tercapai, sebuah *controlled heat pulse* dipasang pada bagian tengah penduga porous, dan peningkatan temperatur diukur selama periode waktu tertentu. Perubahan temperatur sebanding dengan kadar air volumetrik material keramik porous.

Aplikasi hasil kalibrasi di pabrik terhadap perubahan temperatur akan memungkinkan penggunaannya untuk menghitung hisapan matrik tanah. Sensor tersebut tidak tergantung pada jenis tanah, larutan garam, dan temperatur. Sensor *thermal matric potential* seperti terlihat pada Gambar 15.

Hasil dari sensor sangat sesuai dengan hasil dari kedua metode tersebut untuk nilai yang lebih besar dari 200 kPa. Sedangkan untuk nilai yang lebih kecil, sensor menunjukkan sejumlah hasil yang tersebar yang patut dipertimbangkan. Oleh karena tanah ekspansif seringkali memiliki nilai hisapan matrik di atas 200 kPa, dibutuhkan kehati-hatian jika menggunakan sensor tersebut untuk memastikan hasilnya yang akurat.



**Gambar 15 Sensor *thermal matric potential***  
(AGWA II, Phene et al, 1971)

## 8.5 Perkiraan pengangkatan tanah berdasarkan uji oedometer

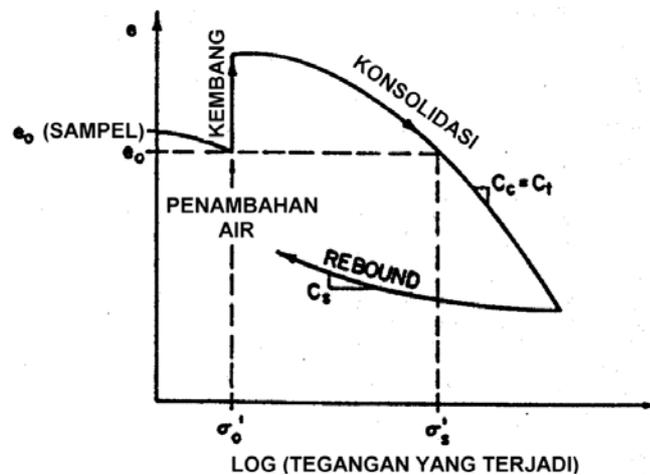
Pengujian untuk memperkirakan besarnya pengangkatan tanah membutuhkan peralatan uji konsolidasi satu dimensi atau oedometer. Pengujian konsolidasi tersebut dapat dikelompokkan ke dalam dua tipe pengujian dasar sebagai berikut.

### 8.5.1 Uji konsolidasi mengembang

Pengujian ini membutuhkan pembebanan awal contoh tanah tak jenuh untuk mendapatkan tegangan awal. Contoh tanah tersebut selanjutnya akan mengembang seiring dengan penambahan air dan beban yang diberikan.

Beban awal dapat mewakili besarnya kelebihan beban tambahan, kelebihan beban ditambah beban struktur, atau penambahan beban lainnya. Setelah terjadi pengembangan, contoh tanah akan dibebani dan dihilangkan bebannya. Tekanan pengembangan merupakan besarnya tekanan yang dibutuhkan untuk tanah terkompresi kembali, atau kembali ke volume semula.

Gambar 16 memperlihatkan hasil pengujian konsolidasi mengembang, dimana  $\sigma'_o$  adalah tegangan pada contoh tanah dalam kondisi basah dan  $\sigma'_s$  merupakan tekanan mengembang.

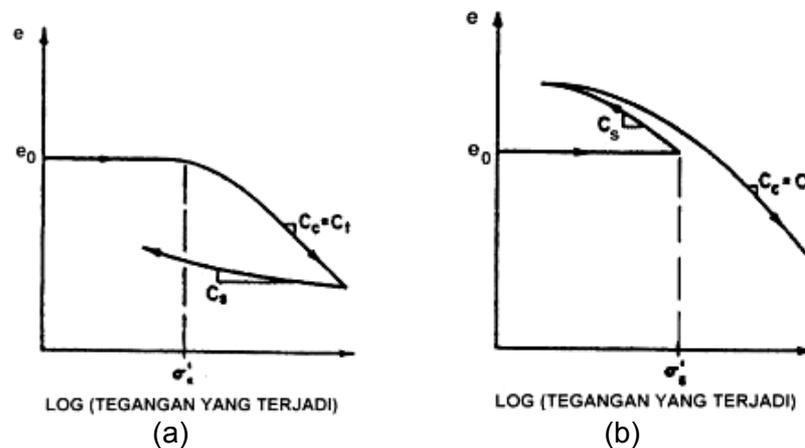


**Gambar 16 Hasil uji konsolidasi mengembang**

(Nelson & Miller, 1992)

### 8.5.2 Uji volume konstan atau uji tekanan pengembangan

Prosedur yang dilakukan dalam pengujian meliputi perendaman sampel di dalam oedometer untuk mencegah mengembangnya sampel. Pada kondisi ini, tekanan pengembangan merupakan tegangan maksimum yang diberikan untuk mempertahankan volume konstan. Pada saat tekanan pengembangan tidak bertambah lagi setelah direndam, sampel tersebut akan terlepas akibat penarikan seluruh aplikasi beban atau beban tambahan. Data hasil pengujian volume konstan diperlihatkan pada Gambar 17.



Keterangan:

- contoh tanah yang terkonsolidasi dibawah tekanan mengembang
- contoh tanah yang mengalami *rebound* pada tekanan mengembang dan kemudian dikonsolidasikan

**Gambar 17 Hasil uji volume konstan**

(Nelson & Miller, 1992)

## 8.6 Perkiraan pengembangan berdasarkan uji hisapan tanah

Respon tanah terhadap perubahan hisapan dapat diperkirakan dengan prosedur yang sama dengan perubahan tegangan efektif tanah jenuh. Hubungan antara angka pori dan hisapan matrik dapat disamakan dengan indeks kompresi atau indeks pengembangan dari uji oedometer. Perkiraan besarnya pengangkatan tanah dilakukan dengan menggunakan persamaan yang serupa dengan persamaan *konsolidasi terbalik* pada metode konsolidasi. Besarnya pengembangan yang diakibatkan oleh perubahan tegangan efektif dan hisapan matrik dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \frac{z_i}{(1+e_0)_i} [C_{mi} \Delta \log(u_a - u_w) + C_{ti} \Delta \log(\sigma - u_a)]_i \quad (12)$$

dengan pengertian:

$\rho$  adalah pengangkatan total (m)

$z_i$  adalah ketebalan lapisan  $i$  (m)

$\Delta e_i$  adalah  $(e_f - e_0)_i = C_{mi} \Delta \log [(u_a - u_w)_f / (u_a - u_w)_0]_i$

$C_{mi}$  adalah indeks hispan matrik untuk lapis  $i$

$C_{ti}$  adalah indeks tegangan efektif untuk lapis  $i$

$\sigma$  adalah tegangan total (kPa)

$u_a$  adalah tekanan udara pori kPa)

$u_w$  adalah tekanan air pori (kPa)

Metode U.S Army Corps of Engineer juga dapat digunakan untuk mengevaluasi hisapan tanah. Pada prinsipnya metode ini mengevaluasi hisapan tanah dan model mekanika untuk mendesain fondasi. Hasil evaluasi memperlihatkan bahwa uji hisapan tanah lebih sederhana, ekonomis dan berkembang dibandingkan dengan uji oedometer.

Indeks hisapan tidak ditentukan langsung melainkan dihitung berdasarkan persamaan berikut :

$$C_m = \alpha G_s / 100 B \quad (13)$$

dengan pengertian:

$C_m$  adalah indeks hisapan

$\alpha$  adalah faktor kompresibilitas

$B$  adalah kemiringan kurva hisapan versus kadar air

$G_s$  adalah berat jenis tanah

Nilai  $\alpha$  dapat diperkirakan sebagai berikut:

- Untuk nilai  $\alpha = 0$ , harga  $PI < 5$
- Untuk nilai  $\alpha = 0,0275 - 0,125$ , maka  $5 \leq PI \leq 40$
- Untuk nilai  $\alpha = 1$ , harga  $PI > 40$

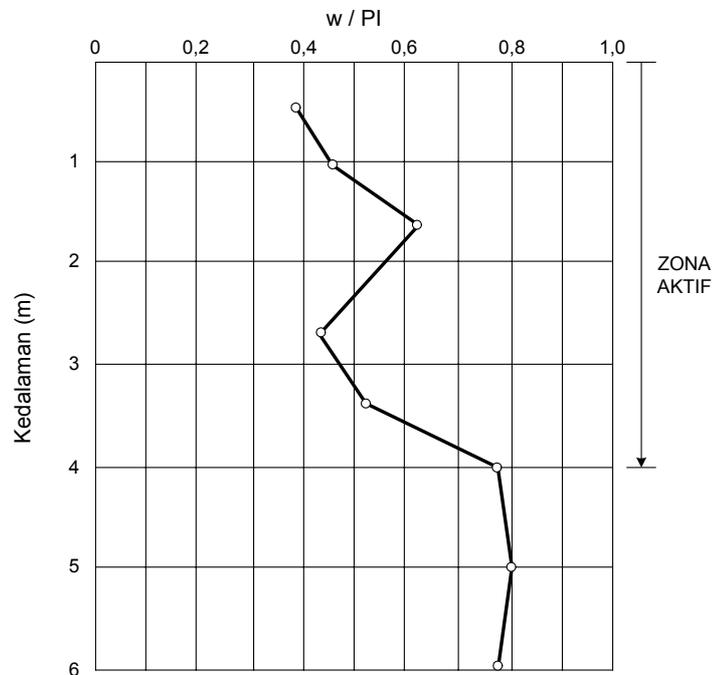
## 9 Desain konstruksi jalan di atas tanah ekspansif

Desain konstruksi jalan di atas tanah ekspansif membutuhkan analisis data hasil penyelidikan tanah di lapangan dan pengujian di laboratorium yang dapat memberikan informasi mengenai prosedur perencanaan atau pemilihan metode penanganan. Faktor-faktor berikut menjadi dasar desain konstruksi jalan di atas tanah ekspansif.

### 9.1 Zona aktif

Zona aktif dapat ditentukan dengan memetakan nilai kadar air ( $w$ ) terhadap kedalaman ( $D$ ) dari contoh tanah yang diambil selama musim basah dan kering. Kedalaman pada saat kadar air hampir konstan adalah batasan zona aktif, atau disebut juga tebal perubahan kadar air musiman.

Penentuan ketebalan zona aktif dapat pula ditentukan berdasarkan nilai kadar air ( $w$ ) yang dibagi dengan nilai indeks plastisitas ( $PI$ ), yang ditulis dalam bentuk persamaan sebagai  $w/PI$ . Selain itu dapat pula ditentukan berdasarkan nilai batas cair ( $LL$ ) yang dikurangi dengan nilai kadar air ( $w$ ), kemudian dibagi dengan nilai indeks plastisitas ( $PI$ ), atau jika ditulis dalam bentuk persamaan menjadi  $(LL-w)/PI$ . Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 18 di bawah ini.



**Gambar 18 Metode penentuan zona aktif dari perubahan kadar air**

(Nelson & Miller, 1992)

## 9.2 Pemadatan tanah

Pada prinsipnya pemadatan tanah merupakan suatu proses dimana partikel tanah saling berdekatan, sehingga rongga udara menjadi lebih kecil akibat tumbukan mekanik. Dengan melakukan pemadatan tanah pada kondisi kadar air yang mendekati optimum, rongga udara dapat dieliminir sehingga perubahan kadar air pun berkurang. Pemadatan yang baik pada timbunan badan jalan akan mengurangi bahkan meniadakan penurunan timbunan. Melalui pemadatan tanah yang baik kuat geser tanah akan meningkat dan tahan terhadap deformasi.

## 9.3 Kuat geser tanah tak jenuh

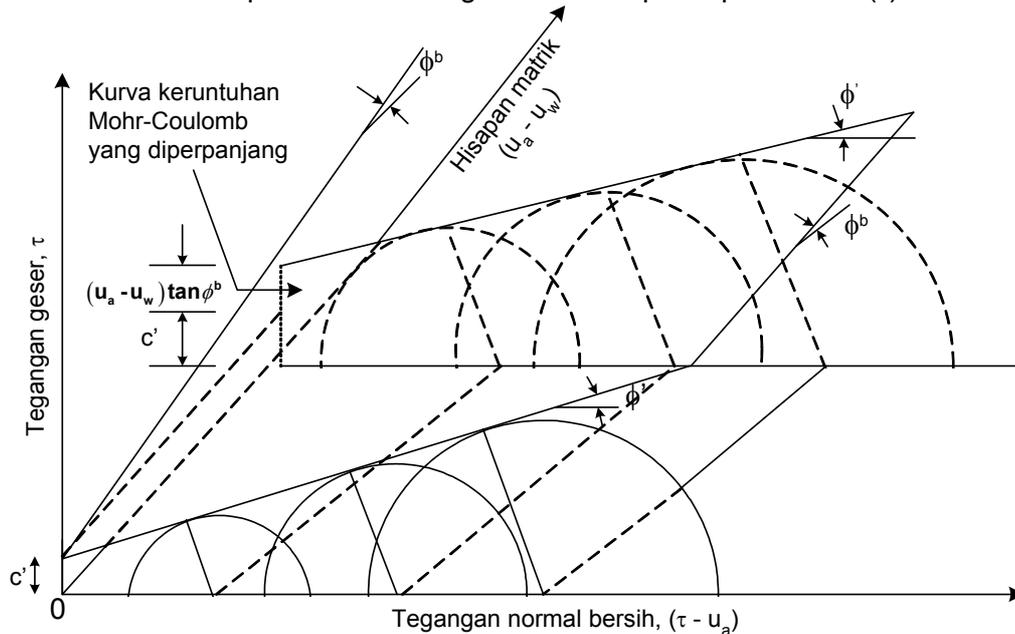
Kuat geser tanah tak jenuh dapat diformulasikan sebagai variabel kondisi tegangan. Ada dua variabel yang dapat dimasukkan ke dalam persamaan kuat geser tanah tak jenuh, yaitu variabel  $(\sigma - u_a)$  dan  $(u_a - u_w)$ . Bila dibandingkan dengan kuat geser tanah jenuh, maka tanah tak jenuh memiliki kuat geser yang lebih tinggi.

Pengukuran kuat geser tanah tak jenuh dapat dilakukan dengan memodifikasi alat geser langsung atau triaksial sehingga dapat mengukur tegangan fase air dan udara serta perubahan volume fase air maupun udara. Gambar 19 menunjukkan kurva keruntuhan tanah tak jenuh yang merupakan hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal. Persamaan yang digunakan dalam menghitung kuat geser tanah tak jenuh adalah sebagai berikut:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_{ff} - u_{af})_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (14)$$

dengan pengertian:

$\tau_{ff}$	adalah kuat geser tanah tak jenuh (kPa)
$c'$	adalah kohesi tanah (kPa)
$\sigma_{ff}$	adalah tegangan normal pada bidang keruntuhan (kPa)
$u_{af}$	adalah tekanan udara pori pada bidang keruntuhan (kPa)
$(\sigma_{ff} - u_{af})_f$	adalah tegangan normal bersih pada bidang keruntuhan (kPa)
$u_w$	adalah tekanan air pori pada bidang keruntuhan (kPa)
$(u_a - u_w)_f$	adalah hisapan matrik pada bidang keruntuhan (kPa)
$\phi'$	adalah sudut geser dalam ( $^\circ$ )
$\phi^b$	adalah sudut perubahan kuat geser terhadap hisapan matrik ( $^\circ$ )



**Gambar 19 Kurva keruntuhan tanah tak jenuh**

(Fredlund & Rahardjo, 1993)

Gambar di atas menunjukkan bahwa garis selubung keruntuhan yang berpotongan dengan aksis tegangan memberikan nilai kohesi  $c'$ . Kemiringan garis selubung dinyatakan dengan besarnya sudut  $\phi'$  dan  $\phi^b$  yang masing-masing mempunyai respek terhadap aksis  $(\sigma - u_a)$  dan  $(u_a - u_w)$ . Kohesi tanah  $c'$  dan sudut kemiringan  $\phi'$  dan  $\phi^b$  merupakan parameter yang digunakan untuk memperoleh hubungan antara kuat geser dengan kondisi tegangan. Kuat geser yang disebabkan oleh bertambahnya tegangan normal digambarkan oleh besarnya sudut geser  $\phi'$ , sedangkan yang disebabkan oleh bertambahnya hisapan matrik digambarkan oleh sudut geser  $\phi^b$ . Besarnya sudut  $\phi^b$  umumnya lebih kecil atau sama dengan sudut geser  $\phi'$ .

#### 9.4 Perilaku kuat geser akibat siklus berulang

Terdapat dua kemungkinan yang terjadi akibat proses berulangnya basah-kering terhadap partikel-partikel tanah, yaitu terjadinya penyatuan butiran sehingga ukuran menjadi lebih besar, dan terjadinya pengurangan butiran sehingga ukuran menjadi lebih kecil. Partikel kuat geser tanah lempung akibat siklus berulang basah-kering akan mengakibatkan terjadinya hal-hal berikut:

- 1) peningkatan kekakuan susunan partikel tanah yang ditandai dengan meningkatnya nilai modulus tangen awal pada siklus tertentu dari berulangnya basah-kering;
- 2) peningkatan kuat geser tanah lempung yang merupakan peningkatan tegangan efektif intrinsik (*intrinsic effective stress*) akibat munculnya ikatan antar partikel;

- 3) peningkatan kohesi tanah seiring dengan meningkatnya siklus berulang basah kering. Hal ini membuktikan bahwa proses selama siklus berulang terjadi ikatan partikel yang dinilai sebagai tegangan efektif intrinsik dalam tanah.

### 9.5 Perilaku mengembang akibat siklus berulang

Perilaku potensi mengembang pada tanah ekspansif akan berkurang akibat bertambahnya siklus berulang basah-kering. Pengurangan tersebut semakin kecil setelah melewati siklus kelima. Permukaan jalan mengalami pergerakan setiap siklus musim hujan hingga empat siklus dan pergerakan menjadi sangat kecil setelah mengalami siklus kelima. Kondisi berulangnya pengembangan tanah akan mengakibatkan kelelahan pengembangan.

### 9.6 Tekanan tanah lateral

Untuk keperluan konstruksi dinding penahan tanah yang ditempatkan di atas tanah ekspansif, maka analisis perhitungan dapat dipertimbangkan terhadap dua kondisi, yaitu:

- 1) untuk tanah timbunan yang berupa tanah ekspansif, analisis perhitungan dipertimbangkan terhadap keadaan remasan (*remolded*).
- 2) untuk tanah galian yang berupa tanah ekspansif, analisis perhitungan dipertimbangkan terhadap keadaan asli.

Dalam mendesain dinding penahan tanah pada tanah ekspansif, dianjurkan agar konstruksi penahan tanah bersifat berat dan tidak dapat bergerak serta diperhitungkan menggunakan tekanan tanah pasif untuk tanah tak jenuh. Salah satu cara untuk mengurangi pengaruh pergerakan lateral atau tekanan horisontal yaitu dengan menggunakan bahan busa yang relatif lunak untuk ditempatkan pada dinding penahan tanah bagian dalam.

Apabila tanah timbunan merupakan tanah ekspansif yang akan dilindungi dari resapan air melalui pemasangan geomembran pada permukaan tanah, maka tekanan tanah aktif yang bekerja pada dinding penahan tanah harus dihitung berdasarkan perilaku tekanan tanah tak jenuh.

#### 9.6.1 Tekanan tanah aktif

Distribusi tekanan aktif dapat dihitung dengan menggunakan persamaan koefisien tekanan tanah aktif sebagai berikut:

$$K_a = \frac{1}{N_\phi} - \left( \frac{2c'}{(\sigma_v - u_a) \sqrt{N_\phi}} \right) - \left( 2 \frac{(u_a - u_w)}{(\sigma_v - u_a)} \tan \phi^b \frac{1}{\sqrt{N_\phi}} \right) \quad (15)$$

dengan pengertian:

$K_a$  adalah koefisien tanah aktif

$c'$  adalah kohesi tanah (kPa)

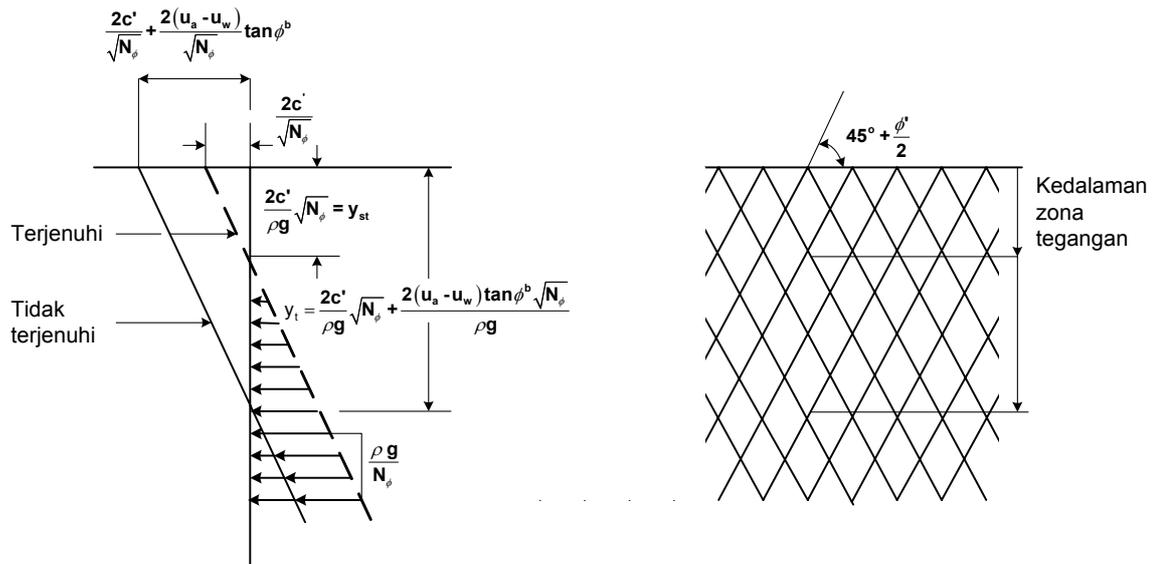
$(\sigma_v - u_a)$  adalah tegangan normal bersih (kPa)

$(u_a - u_w)$  adalah hisapan matrik (kPa)

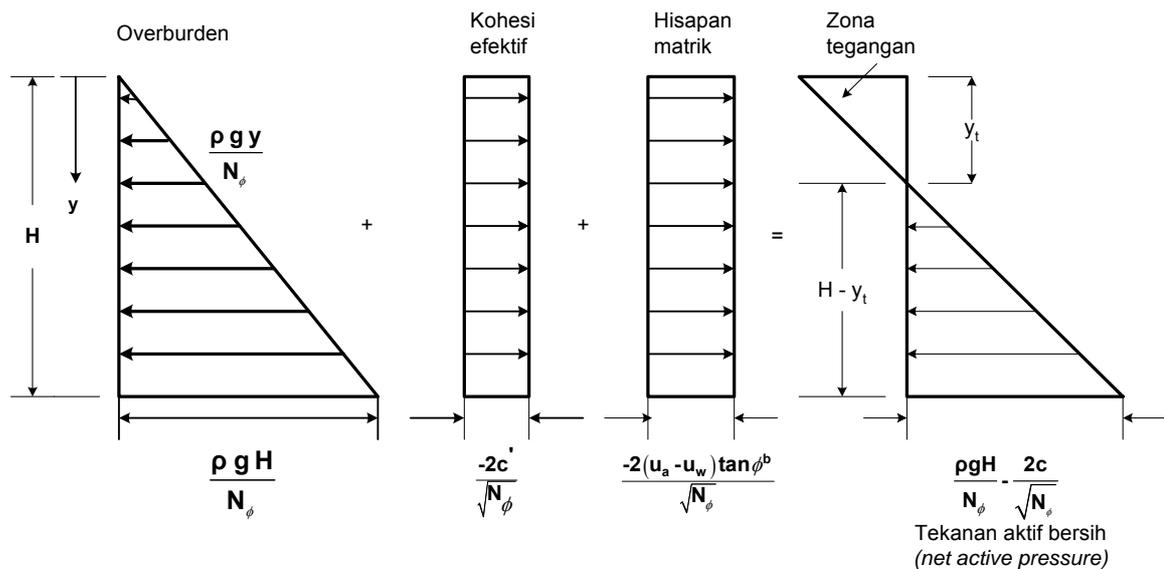
$\phi^b$  adalah sudut perubahan kuat geser terhadap hisapan matrik ( $^\circ$ )

$N_\phi$  adalah faktor daya dukung, diperoleh persamaan  $\frac{1}{N_\phi} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi'}{2} \right)$

Distribusi tekanan tanah dengan asumsi adanya hisapan matrik terhadap kedalaman dapat dilihat pada Gambar 20 dan Gambar 21.



**Gambar 20 Distribusi tekanan tanah aktif Rankine untuk tanah jenuh pada tanah hisapan matrik konstan**  
(Fredlund & Rahardjo, 1993)



**Gambar 21 Komponen distribusi tekanan tanah aktif pada saat hisapan matrik konstan terhadap kedalaman**  
(Fredlund & Rahardjo, 1993)

**9.6.2 Retak tarik**

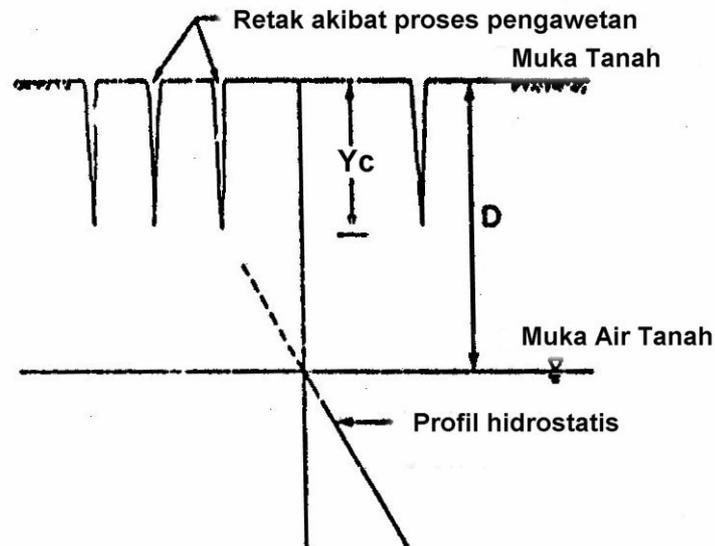
Retak tarik tanah terjadi pada sekitar permukaan sampai kedalaman tertentu. Kedalaman yang akan mengalami retak tarik dapat ditentukan dengan persamaan:

$$y_c = \frac{D}{1 + (\pi \rho H / f_w \rho_w E)} \tag{16}$$

dengan pengertian:

- $Y_c$  adalah kedalaman retak tarik (m)
- $D$  adalah jarak dari muka tanah ke muka air tanah (m)
- $\mu$  adalah poisson's rasio
- $\rho$  adalah kerapatan tanah ( $kN/m^3$ )
- $H$  adalah tebal lapisan tanah lempung (m)

- $f_w$  adalah tekanan air pori  
 $\rho_w$  adalah kerapatan air ( $\text{kN/m}^3$ )  
 $E$  adalah modulus elastisitas (kPa)



**Gambar 22 Penentuan retak tarik**

(Fredlund & Rahardjo, 1993)

### 9.6.3 Tekanan tanah pasif

Koefisien tekanan tanah pasif dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$K_p = N_\phi + \frac{2c'\sqrt{N_\phi}}{(\sigma_v - u_a)} + \frac{2(u_a - u_w)\tan\phi^b\sqrt{N_\phi}}{(\sigma_v - u_a)} \quad (17)$$

dengan pengertian :

$K_p$  adalah koefisien tanah pasif

$N_\phi$  adalah faktor daya dukung

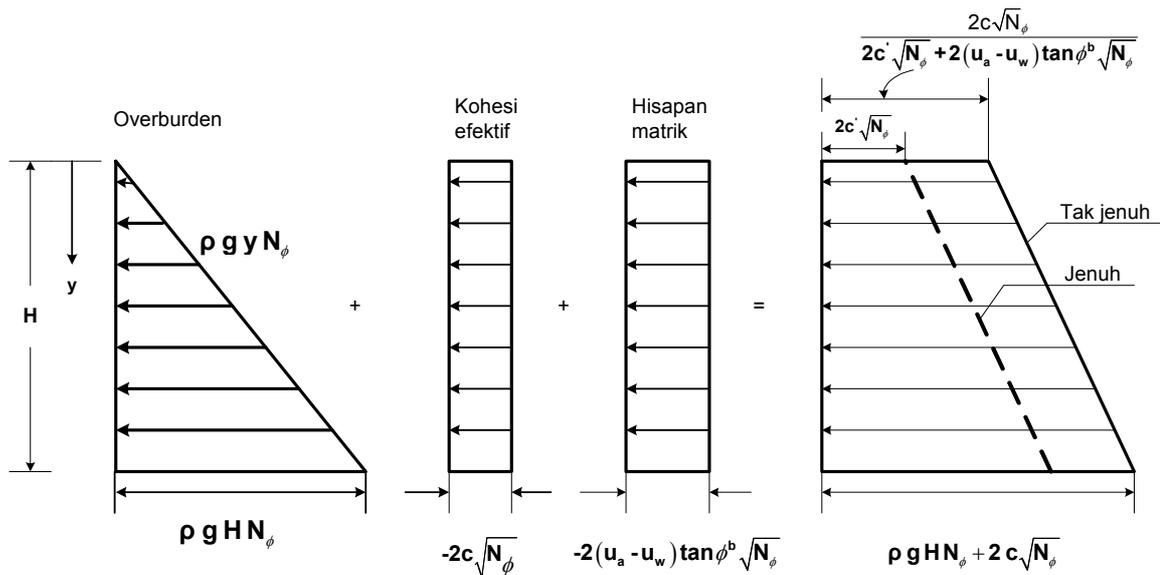
$c'$  adalah kohesi tanah (kPa)

$(\sigma_v - u_a)$  adalah tegangan normal bersih (kPa)

$(u_a - u_w)$  adalah hisapan matrik (kPa)

$\phi^b$  adalah sudut perubahan kuat geser terhadap hisapan matrik ( $^\circ$ )

$N_\phi$  diperoleh dari persamaan  $\frac{1}{N_\phi} = \tan^2\left(45 - \frac{\phi'}{2}\right)$



**Gambar 23** Komponen distribusi tekanan tanah pasif pada saat hisapan matrik konstan terhadap kedalaman

(Fredlund & Rahardjo, 1993)

#### 9.6.4 Daya dukung tanah dan kestabilan lereng

Daya dukung tanah dan kestabilan lereng pada tanah ekspansif harus memperhitungkan kondisi lapisan tanah jenuh dan tak jenuh. Pengujian laboratorium untuk tanah jenuh dilakukan melalui uji coba dalam keadaan terendam, sedangkan untuk tanah tak jenuh dilakukan dengan memperhitungkan pengaruh hisapan matrik.

Analisis yang digunakan dalam perhitungan lapisan tanah jenuh mengacu kepada prosedur standar yang terdapat di dalam buku-buku mekanika tanah, dengan parameter yang berbeda terutama yang berkaitan dengan faktor hisapan matrik. Tanah tak jenuh dipandang sebagai tanah yang memiliki dua kohesi, dimana komponen pertama adalah kohesi efektif ( $c'$ ) sedangkan komponen kedua adalah kohesi hisapan matrik yang dinyatakan dengan  $(u_a - u_w)\tan\phi^b$ .

## 10 Teknik konstruksi di atas tanah ekspansif

Penanganan konstruksi jalan di atas tanah ekspansif pada prinsipnya adalah menjaga agar perubahan kadar air tidak terlalu tinggi atau dengan mengubah sifat tanah lempung ekspansif menjadi tidak ekspansif. Dengan adanya perubahan kadar air yang tidak terlalu tinggi dan perubahan sifat ekspansif tanah pada periode musim hujan dan kemarau, maka tidak terjadi perubahan volume yang berarti.

Metode penanganan tanah ekspansif difokuskan ke dalam dua hal, yaitu perencanaan konstruksi jalan baru dan perbaikan konstruksi jalan lama. Usaha penanganan yang paling penting adalah mengupayakan agar tanah lempung tidak menimbulkan kerusakan pada struktur perkerasan jalan. Oleh karena itu penanganan harus dilakukan dengan beberapa alternatif, untuk mengetahui sifat tanah lempung yang akan dicegah atau diubah sifatnya. Berikut ini merupakan beberapa alternatif metode-metode konstruksi di atas tanah ekspansif.

## 10.1 Penggantian material

Metode penggantian material tanah ekspansif pada prinsipnya merupakan pengurangan seluruh atau sebagian tanah ekspansif sampai pada kedalaman tertentu, sehingga fluktuasi kadar air akan terjadi sekitar ketebalan tanah pengganti. Material tanah pengganti harus terdiri dari tanah yang non ekspansif agar tidak menimbulkan masalah kembang-susut tanah lagi di bawah konstruksi jalan.

Meskipun demikian masalah akan timbul apabila lapisan tanah yang berpotensi ekspansif sangat tebal, sehingga penggantian tanah seluruhnya menjadi tidak ekonomis. Untuk menangani hal tersebut, penentuan kedalaman tanah yang akan diganti perlu dipertimbangkan terhadap besarnya kekuatan mengembang yang berlebihan. Berat sendiri timbunan material pengganti harus cukup mampu menahan gaya angkat tanah ekspansif yang berada di bawah material pengganti, sehingga pengembangan atau penyusutan tidak lagi berpengaruh terhadap material di atasnya. Secara teoritis besarnya pengangkatan tanah dapat dihitung dari hasil uji laboratorium, tetapi pengangkatan tanah di lapangan umumnya kurang lebih sepertiga dari estimasi hasil uji laboratorium. Kedalaman tanah ekspansif yang akan diganti minimal setebal 1,0 meter.

## 10.2 Manajemen air

Desain drainase merupakan faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam manajemen air pada konstruksi jalan di atas tanah ekspansif. Baik buruknya kinerja perkerasan jalan tergantung kepada kondisi drainase permukaan maupun bawah permukaan.

Salah satu faktor yang memicu perubahan volume tanah ekspansif sehingga dapat merusak lapis perkerasan adalah kurang berfungsinya drainase permukaan. Hal tersebut ditandai dengan terjadinya genangan air pada saluran samping, lunaknya tanah pada saluran dan tumbuhnya tanaman atau pepohonan akibat terendamnya lingkungan sekitarnya.

Drainase bawah permukaan berfungsi untuk mencegah aliran air bebas dan menurunkan muka air tanah. Aliran air yang menuju ke arah bawah badan jalan akan terhalangi oleh drainase tersebut, sehingga aliran air akan terputus dan mengalir melalui saluran drainase ke daerah pembuangan air. Dengan tidak masuknya air ke bawah badan jalan, maka pengaruh muka air tanah terhadap lapisan perkerasan akan berkurang, sehingga perubahan kadar air yang besar akan relatif terjaga.

## 10.3 Stabilisasi

Penggunaan metode stabilisasi tanah ekspansif bertujuan untuk menurunkan nilai indeks plastisitas dan potensi mengembang, yaitu dengan mengurangi persentase butiran halus atau kadar lempungnya.

### 10.3.1 Stabilisasi dengan kapur

Stabilisasi jenis ini menggunakan kapur sebagai bahan penstabilisasi. Kapur dapat menimbulkan pertukaran ion lemah sodium oleh ion kalsium yang berada pada permukaan tanah lempung, sehingga persentase partikel halus cenderung menjadi partikel yang lebih kasar. Metode ini pada prinsipnya adalah mencampur tanah lempung dengan kapur di lapangan menggunakan peralatan seperti *disc harrow* atau *small ripper*. Banyaknya bahan kapur yang digunakan untuk keperluan stabilisasi tanah ekspansif berkisar antara 2 – 10% dari berat kering tanah lempung. Tata cara perencanaan dan pelaksanaan sesuai SNI 03-3437 dan SNI 03-3439.

Metode tiang kapur dapat dilakukan dengan menggali lubang sampai kedalaman tertentu, kemudian lubang tersebut diisi dengan kapur encer atau kapur kering. Diameter lubang berkisar antara 15 cm sampai dengan 30 cm dengan jarak antar titik tengah 1,20 meter sampai dengan 1,50 meter. Metode injeksi ini dilakukan dengan memasukkan kapur encer ke dalam tanah lempung dengan menggunakan tekanan, sehingga air kapur dapat bereaksi dengan tanah.

### 10.3.2 Stabilisasi dengan semen

Stabilisasi menggunakan bahan semen dapat meningkatkan butiran tanah menjadi suatu kesatuan yang lebih keras, sehingga akan terjadi pengurangan nilai indeks plastisitas, nilai batas cair (LL), dan potensi perubahan volume serta penambahan nilai batas susut (SL) dan nilai kuat geser tanah. Banyaknya bahan semen yang digunakan untuk keperluan stabilisasi tanah ekspansif berkisar antara 4 - 6 % dari berat kering tanah lempung. Tata cara perencanaan dan pelaksanaan sesuai SNI 03-3438-19 dan SNI 03-3440.



**Gambar 24 Stabilisasi dengan semen**

(Dokumentasi foto stabilisasi timbunan Penjaringan)

## 10.4 Membran

Membran berfungsi untuk mereduksi laju perubahan kadar air di bawah perkerasan jalan, sehingga harus bersifat kedap air serta kuat menahan perubahan kondisi tanah. Membran dapat ditempatkan secara vertikal maupun horisontal tergantung dari bagian tanah ekspansif yang kadar airnya akan dilindungi. Untuk membran yang ditempatkan secara vertikal, umumnya dilakukan penekukan ke arah lateral pada tepi ujung bagian atas sehingga berfungsi sebagai penghalang horisontal.

### 10.4.1 Membran geosintetik

Membran geosintetik dapat dibuat dari bahan polyethylene, polyvinyl chlorida (PVC), polypropylene dan geosintetik lainnya yang kedap air. Geomembran yang ditempatkan di atas tanah dasar harus cukup tebal agar tidak mudah terkoyak atau terkena benda tajam pada saat penghamparan. Ketebalan membran yang digunakan minimal 0,25 mm atau 10 mil, dimana mil adalah satuan tebal geosintetik.

Penggunaan membran dengan ketebalan yang kurang dari 0,25 mm memerlukan perhatian khusus untuk menghindari tertusuknya membran pada saat pemasangannya. Dalam hal ini, sifat ketahanan terhadap reaksi kimia dan oksidasi harus diperhatikan dalam pemilihan bahan membran yang akan digunakan.



**Gambar 25 Membran geosintetik**

(Dokumentasi foto penanganan jalan Ngawi-Caruban)

#### 10.4.2 Pelat beton

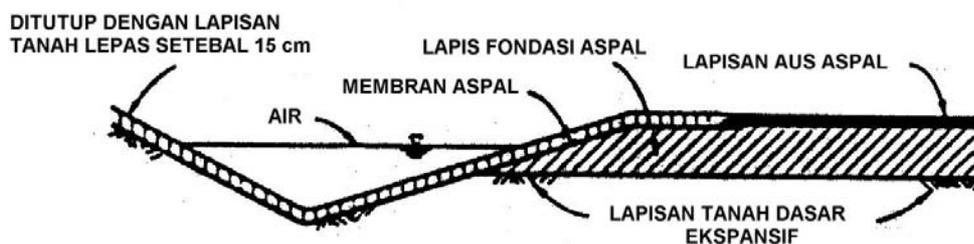
Pelat beton dapat juga digunakan sebagai membran untuk menjaga perubahan kadar air yang berlebihan. Penggunaan pelat beton memiliki keunggulan dibandingkan dengan membran sintetik karena sifat beton yang lebih kaku. Pelat beton memiliki fungsi ganda, yaitu di samping berfungsi untuk mengurangi perubahan kadar air, dapat juga berfungsi sebagai penahan gaya angkat ke atas dari pengembangan tanah ekspansif. Pelat beton yang digunakan untuk konstruksi bahu jalan atau trotoar harus dilengkapi dengan tulangan yang saling mengikat agar pelat tidak mudah lepas.

#### 10.4.3 Aspal

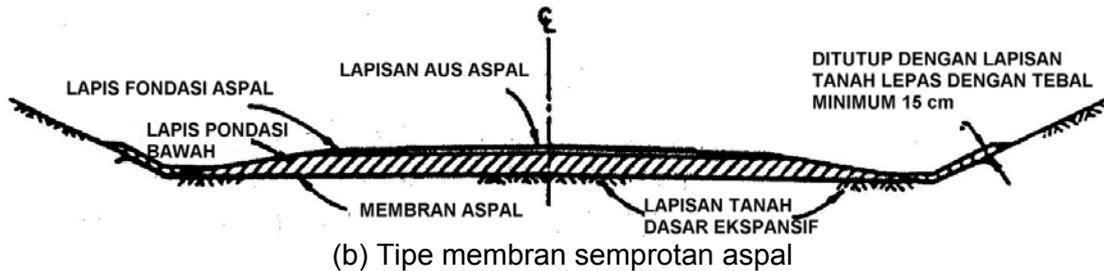
Aspal juga dapat berfungsi sebagai membran, terutama dari jenis *catalytically blown*, aspal emulsi dan aspal karet. Secara tidak langsung perkerasan beraspal dapat berfungsi sebagai membran. Penggunaan campuran aspal–semen yang direkomendasikan untuk digunakan sebagai membran adalah sebanyak 5,9 liter/m<sup>2</sup>. Lembaran aspal yang dibuat di pabrik dengan tebal kurang dari 12 mm juga dapat digunakan sebagai membran. Aspal dengan penetrasi 50-60 digunakan sebagai membran pembungkus timbunan badan jalan dengan maksud menjaga kadar air agar tetap konstan sehingga perubahan volume material timbunan dapat berkurang.

#### 10.4.4 Membran horisontal

Membran horisontal ditempatkan di atas permukaan tanah sedemikian rupa sehingga lebar membran lebih panjang dari lebar jalan yang dilindungi. Kelebihan membran yang berada di antara lebar membran yang dipasang dengan lebar jalan yang dilindungi disebut jarak samping. Pada jarak samping ini perubahan kadar air dapat menimbulkan pengembangan tanah. Jarak samping berkisar antara 0,60 meter sampai dengan 1,50 meter, atau dapat diambil sebesar kedalaman zona aktif. Cara pemasangan membran horisontal pada konstruksi jalan diperlihatkan pada Gambar 26.



(a) Perkerasan beraspal



**Gambar 26 Membran horizontal pada konstruksi jalan**

(Snethen, 1979)

#### 10.4.5 Membran vertikal

Membran vertikal ditempatkan pada kedua sisi jalan yang akan dilindungi dalam posisi tegak hingga mencapai kedalaman tertentu. Membran ini berfungsi sebagai penghalang aliran air tanah pada arah horizontal atau menjaga penguapan ke samping dari tanah yang berada di bawah badan jalan.

Kedalaman membran harus dipasang minimal dua pertiga dari kedalaman zona aktif, dan kedalaman minimal pemasangan membran adalah 1,5 meter. Umumnya membran vertikal lebih efektif dibandingkan dengan membran horizontal. Meskipun demikian, ditinjau dari segi kepraktisan masing-masing membran memiliki kesulitan yang sama dalam menentukan jarak samping dan penggalian yang lebih dalam. Cara pemasangan membran vertikal diperlihatkan pada Gambar 27.



Keterangan gambar:

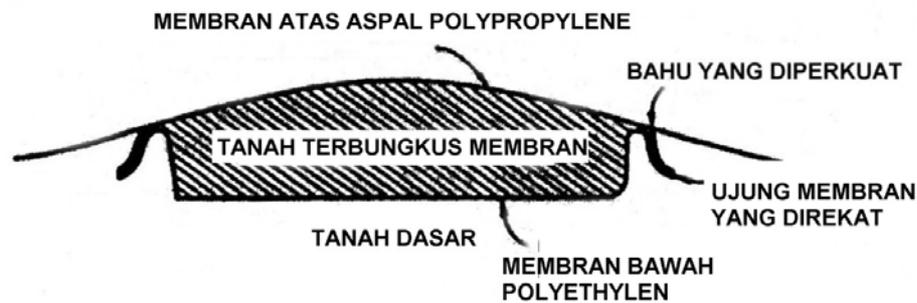
Kedalaman potongan melintang membran harus diperdalam hingga kedalaman zona aktif. Meskipun demikian, jika kondisi tanah, kepraktisan serta keekonomisan usaha pemasangan ini tidak memberikan keuntungan yang berarti, maka kedalaman membran harus dikurangi untuk mempermudah pemasangan.

**Gambar 27 Membran vertikal pada konstruksi jalan**

(Snethen, 1979)

#### 10.4.6 Membran pembungkus lapisan tanah

Membran pembungkus lapisan tanah (*Membranes Encapsulated Soil Layer, MESL*) berfungsi sebagai pembungkus tanah dasar yang dipadatkan. Pada metode ini tanah yang berada di dalam selubung membran akan memiliki kadar air yang relatif tetap, akibat kurangnya pengaruh dari perubahan kadar air yang terjadi di luar membran. Detail membran pembungkus lapisan tanah ditunjukkan pada Gambar 28.



**Gambar 28 Membran pembungkus lapisan tanah pada konstruksi jalan**

(Hammit dan Ahlvin, 1973)

### 10.5 Pembebanan

Pengembangan tanah ekspansif dapat dicegah melalui pemberian beban yang cukup besar untuk menahan tekanan mengembang. Cara ini hanya dapat dilakukan untuk tanah lempung yang memiliki tingkat ekspansif yang rendah sampai dengan sedang. Pengujian lapangan dan laboratorium harus dilakukan untuk menentukan karakteristik pengembangan tanah. Kondisi lapangan harus betul-betul dipelajari selama pengujian berlangsung.

Apabila tetap terjadi peningkatan tegangan mengembang, maka penggunaan pembebanan tidak efisien karena tidak linearnya hubungan antara tegangan dan besarnya pengembangan. Tekanan mengembang sekitar 25 kPa dapat dijaga pengembangannya dengan tinggi timbunan 1,3 meter dan fondasi beton. Pada sistem pembebanan ini diperlukan pembuatan drainase untuk menurunkan muka air tanah agar tanah tidak bersifat lunak sewaktu pemberian beban berlangsung.

Informasi-informasi tambahan mengenai hal-hal penting yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan metode konstruksi serta belum tercantum di dalam sub-sub pasal di atas dirangkum pada Tabel 10 di bawah ini:

**Tabel 10 Hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan metode konstruksi**

No.	Metode Konstruksi	Hal-hal yang perlu dipertimbangkan
1.	Penggantian material	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material pengganti yang digunakan harus bersifat non ekspansif serta tidak lolos air</li> <li>- Tanah tersebut harus dipadatkan melebihi kepadatan tanah ekspansif untuk mendapatkan daya dukung yang tinggi.</li> <li>- Jika menggunakan material granular, maka perlu dilakukan kontrol pengaliran air dari timbunan agar tidak berkumpul pada material ini.</li> <li>- Penggalian harus mencapai kedalaman yang dianggap stabil serta dilindungi dengan menggunakan membran.</li> </ul>
2.	Stabilisasi dengan kapur	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Persentase kapur yang diberikan sebesar 2 – 10 % umumnya dapat digunakan</li> <li>- Harus dilakukan pengujian awal terhadap tanah yang akan distabilisasi untuk menentukan reaksi kapur dan persentase kapur yang dibutuhkan.</li> <li>- Kedalaman pencampuran terbatas antara 30 – 45 cm, tergantung pada peralatan pencampurnya.</li> <li>- Kapur dapat digunakan dalam bentuk kering maupun encer (<i>slurry</i>), tetapi penambahan air harus tetap dilakukan.</li> <li>- Pengawasan kualitas sangat penting dilakukan selama penggemburan, pencampuran dan pemadatan.</li> <li>- Stabilisasi dengan kapur harus dilindungi dari air permukaan dan air tanah karena air tersebut dapat mengeluarkan kapur dari dalam campuran sehingga tanah akan kehilangan kekuatan akibat jenuh air.</li> </ul>

**Tabel 10 Hal-hal penting yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan metode konstruksi (lanjutan)**

No.	Metode Konstruksi	Hal-hal yang perlu dipertimbangkan
3.	Stabilisasi dengan semen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipe semen yang digunakan adalah semen Portland dengan persentase 4 – 6%, dengan tujuan mengurangi potensi perubahan volume.</li> <li>- Pelaksanaan stabilisasi dengan semen sama dengan yang dilakukan pada stabilisasi dengan kapur.</li> <li>- Penggunaan stabilisasi dengan semen tidak seefektif stabilisasi dengan kapur untuk tanah lempung berplastisitas tinggi.</li> </ul>
4.	Pelat beton	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trotoar yang terbuat dari pelat beton sebaiknya diberikan tulangan.</li> <li>- Sambungan lentur harus dapat menghubungkan trotoar dengan fondasinya.</li> <li>- Harus sering dilakukan pemeriksaan terhadap retak dan kebocoran</li> </ul>
5.	Aspal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membran menerus harus ditempatkan di sepanjang tanah dasar dan saluran samping apabila aspal digunakan pada konstruksi jalan raya.</li> </ul>
6.	Membran horisontal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membran horisontal harus diperpanjang hingga cukup jauh dari perkerasan jalan atau fondasi untuk mencegah pergerakan air secara horisontal ke dalam tanah fondasi.</li> <li>- Dibutuhkan kehati-hatian pada saat memasang membran di atas fondasi, merekatkan sambungan, serta memiringkan membran hingga berada di bawah dan jauh dari struktur.</li> <li>- Bahan membran harus tahan lama dan terbuat dari bahan yang tidak mudah terdegradasi.</li> <li>- Sambungan yang menghubungkan membran dengan struktur harus kuat dan tidak tembus air</li> <li>- Dibutuhkan kemiringan yang cukup untuk mengalirkan drainase permukaan langsung dari ujung-ujung membran</li> </ul>
7.	Membran vertikal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Membran harus dipasang sedalam mungkin sesuai dengan peralatan yang digunakan.</li> <li>- Kedalaman pemasangan minimum yang digunakan adalah setengah dari kedalaman zona aktif</li> <li>- Tanah timbunan yang digunakan untuk mengisi parit harus kedap air.</li> </ul>
8.	Membran pembungkus lapisan tanah	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Setiap sambungan harus tertutup rapat.</li> <li>- Material yang digunakan harus tahan lama dan kuat terhadap urugan pasir.</li> <li>- Penempatan lapisan pertama di atas membran bawah harus diawasi untuk mencegah kerusakan</li> </ul>
9.	Pembebanan	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apabila tekanan mengembang relatif rendah serta deformasinya masih dapat ditolerir, maka penggunaan metode pembebanan ini cukup efektif.</li> <li>- Diperlukan pengujian tanah untuk menentukan kedalaman zona aktif dan besarnya tekanan mengembang maksimum yang akan dibebani.</li> <li>- Pengawasan drainase sangat diperlukan selama pembebanan berlangsung untuk mencegah pengaliran air baik pada arah vertikal maupun horisontal.</li> </ul>

## 11 Struktur perkerasan jalan di atas tanah ekspansif

### 11.1 Desain perkerasan lentur

#### 11.1.1 Pengangkatan mengembang tanah di bawah jalan

Pengangkatan mengembang pada tanah di bawah jalan merupakan hal yang penting dalam pertimbangan lingkungan, karena berpotensi mempengaruhi laju kehilangan tingkat pelayanan. Pengembangan tanah menunjukkan adanya perubahan volume setempat yang terjadi pada tanah ekspansif di bawah jalan akibat terdapat penyerapan kadar air.

#### 11.1.2 Tahapan desain perkerasan lentur

Tahapan desain perkerasan lentur adalah sebagai berikut:

##### Langkah 1

Pilih angka Indeks Tebal Perkerasan (ITP) atau disebut juga *Structure Number* (SN) yang sesuai untuk desain perkerasan awal. Disarankan agar diambil nilai ITP maksimum sehingga diperoleh asumsi dalam keadaan tidak terjadi pengangkatan mengembang. Sebagai contoh, tingkat pelayanan awal desain (PSI permulaan) diharapkan sebesar 4,4 dan akhir desain adalah 2,5 serta waktu untuk lapis tambah 15 tahun (untuk 5 juta lalu lintas ekivalen sumbu tunggal seberat 8,16 ton).

Pada desain perkerasan awal Gambar 29. Nilai ITP yang lebih kecil dari 4,4 mungkin saja dapat cocok, sepanjang nilai tersebut tidak bertentangan dengan waktu untuk lapis tambah minimum.

##### Langkah 2

Pilih perkiraan waktu untuk lapis tambah yang diinginkan pada kondisi pengangkatan mengembang yang diantisipasi dan masukkan ke dalam Kolom 2.

Angka ini harus lebih kecil daripada waktu untuk lapis tambah maksimum, sesuai dengan angka struktur perkerasan awal yang dipilih. Umumnya angka ini lebih besar dari kehilangan lingkungan dan lebih kecil dari waktu untuk lapis tambah.

##### Langkah 3

Perkirakan kehilangan tingkat pelayanan lingkungan total yang diakibatkan oleh pengangkatan mengembang ( $\Delta PSI_{SW}$ ) dengan menggunakan grafik hubungan antara kehilangan tingkat pelayanan lingkungan kumulatif dengan perkembangan waktu (Gambar 30 digunakan sebagai contoh).

Perkiraan waktu untuk lapis tambah diperoleh dari Langkah 2 dengan cara coba-coba. Masukkan nilai ( $\Delta PSI_{SW}$ ) yang diperoleh ke Kolom 3.

##### Langkah 4

Kurangkan nilai kehilangan tingkat pelayanan total yang diinginkan dengan nilai kehilangan tingkat pelayanan lingkungan untuk menetapkan kehilangan tingkat pelayanan lalu lintas yang sesuai (lihat Langkah 3).

$$\Delta PSI_{TR} = \Delta PSI - \Delta PSI_{SW} \quad (18)$$

Contoh:  $4,4 - 2,5 = 1,9$ . Masukkan hasilnya ke Kolom 4

##### Langkah 5

Gunakan Gambar 29 untuk mengestimasi nilai kumulatif lalu lintas ekivalen sumbu tunggal seberat 8,16 ton yang diijinkan sesuai dengan kehilangan tingkat pelayanan lalu lintas, yang didapat dari Langkah 4. Masukkan hasilnya ke Kolom 5.

Hal yang penting adalah gunakan tingkat kepercayaan yang sama, modulus efektif reaksi tanah dasar (*modulus of subgrade reaction*) dan lainnya, jika menggunakan nomograf pada Gambar 29.

**Langkah 6**

Perkirakan tahun yang sesuai dengan kumulatif lalu lintas ekivalen sumbu tunggal seberat 8,16 ton yang akan dicapai (ditentukan dari Langkah 5). Masukkan hasilnya ke Kolom 6. Nilai tersebut harus disertai dengan penambahan dari hubungan lalu lintas kumulatif terhadap perkembangan waktu ( Gambar 31 digunakan sebagai contoh).

**Langkah 7**

Bandingkan perkiraan waktu untuk lapis tambah dengan hasil perhitungan pada Langkah 6. Jika perbedaannya lebih besar dari 1 tahun, maka hitunglah nilai rata-rata dari dua angka tersebut dan gunakan sebagai nilai coba-coba untuk memulai pengulangan berikutnya (kembali ke Langkah 2).

Jika perbedaannya kurang dari 1 tahun, maka perhitungan memuaskan sehingga hasil ini menjadi waktu untuk lapis tambah yang diperkirakan untuk struktur perkerasan awal sesuai dengan angka SN yang dipilih. Pada contoh ini, kepuasan tercapai setelah tiga kali pengulangan dan waktu untuk lapis tambah yang diperkirakan sekitar 9 tahun.

**Tabel 11 Contoh proses untuk memperkirakan waktu untuk lapis tambah pada struktur perkerasan permulaan dengan mempertimbangkan pengangkatan mengembang**

PSI permulaan: 4,4 Kemungkinan waktu untuk lapis tambah maksimum: 15 tahun Kehilangan tingkat pelayanan desain: $\Delta PSI = P_o - P_t = 4,4 - 2,5 = 1,9$					
Pengulangan	Perkiraan waktu untuk lapis tambah	Kehilangan pelayanan total akibat pengangkatan mengembang	Kesesuaian kehilangan pelayanan total akibat lalu lintas	Lalu lintas kumulatif yang diijinkan	Waktu untuk lapis tambah yang sesuai
(No)	(tahun)	( $\Delta PSI_{SW}$ )	( $\Delta PSI_{TR}$ )	(8,16 ton ESAL)	(tahun)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	13,0	0,30	1,60	$2,94 \times 10^6$	8,8
2	11,0	0,28	1,62	$3,00 \times 10^6$	9,0
3	9,0	0,24	1,66	$3,13 \times 10^6$	9,4

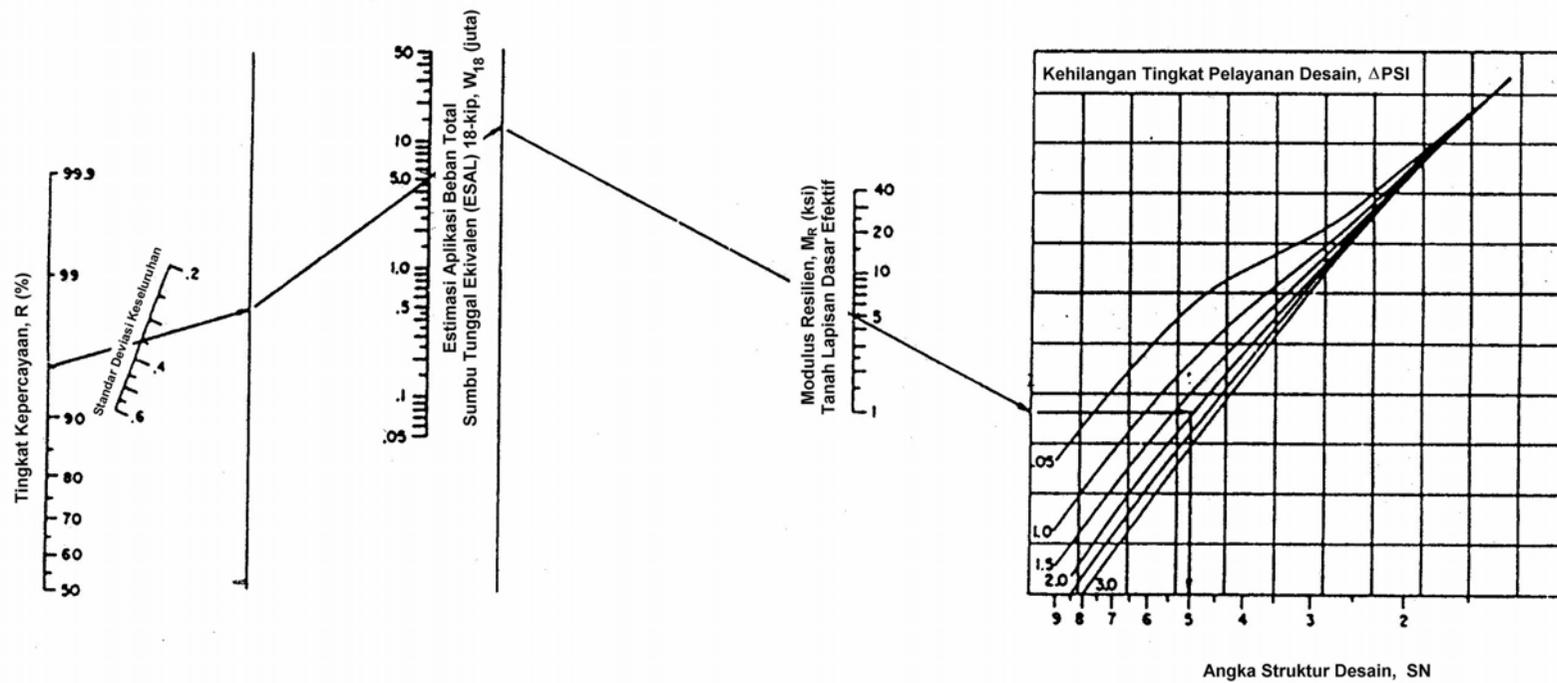
**Keterangan tabel:**

Nomor Kolom	Deskripsi Prosedur
2	Diestimasi oleh perencana ( Langkah 2)
3	Gunakan nilai estimasi dari Kolom 2 dengan Gambar 30. Tentukan kehilangan tingkat pelayanan total akibat pengangkatan mengembang (Langkah 3)
4	Kurangkan desain total dengan kehilangan tingkat pelayanan lingkungan (Kolom 3)
5	Ditentukan dari Gambar 29, usahakan seluruh input adalah konstan (kecuali untuk kehilangan tingkat pelayanan lalu lintas, gunakan dari Kolom 4) dan gunakan nomograf secara kebalikannya (Langkah 5)
6	Gunakan lalu lintas dari Kolom 5, estimasi waktu untuk lapis tambah dari Gambar 31 (Langkah 6)

(AASHTO, 1993)

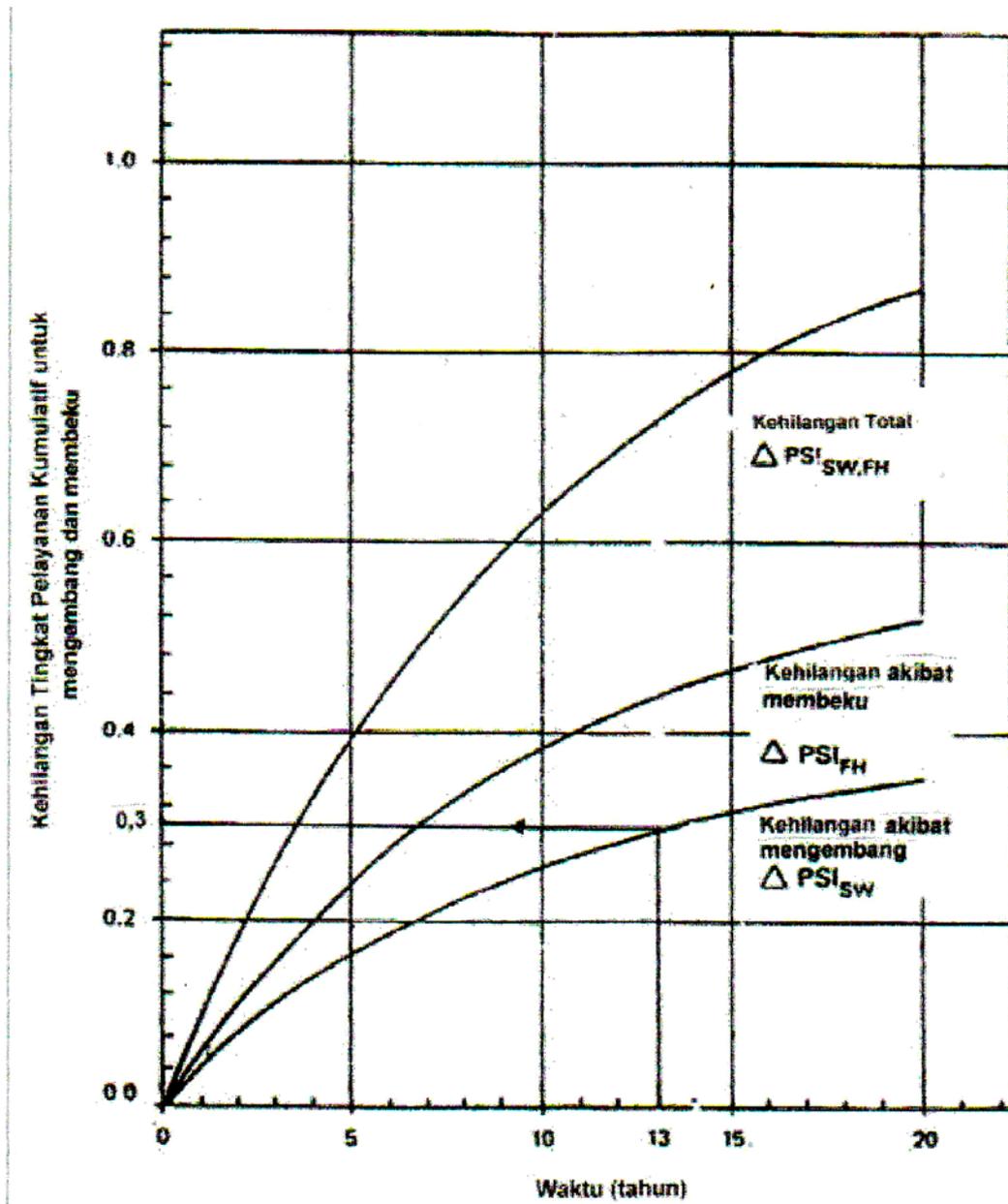
PERSAMAAN NOMOGRAF :

$$\log_{10} W_{18} = z_R * s_o + 9,36 * \log_{10} (SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 * \log_{10} M_R - 8,07$$



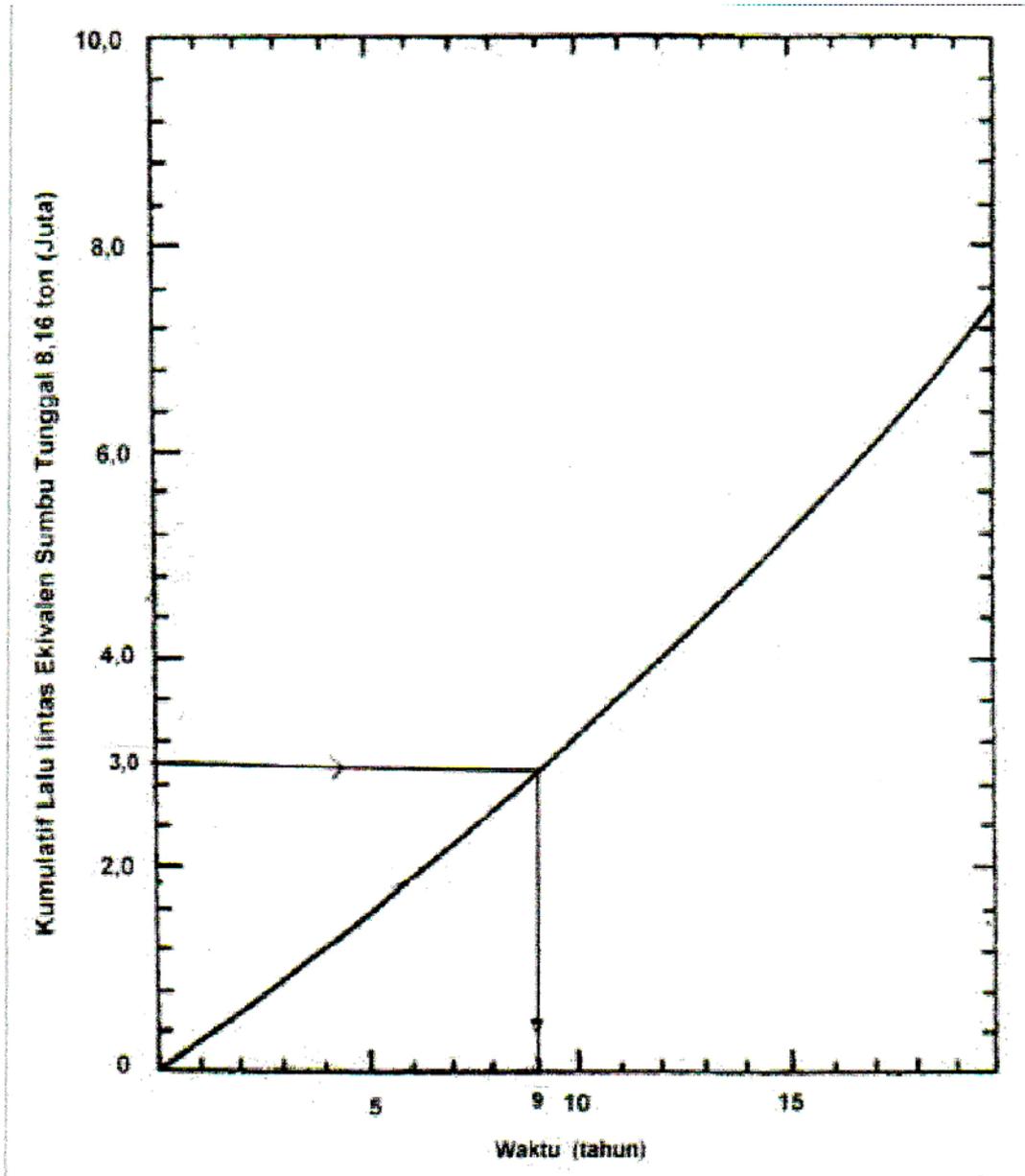
Contoh:  
 $W_{18} = 5 \times 10^6$   
 $R = 95\%$   
 $s_o = 0,35$   
 $M_R = 5000 \text{ psi}$   
 $\Delta PSI = 1,9$   
 Penyelesaian :  $SN = 5,0$

Gambar 29 Grafik desain untuk perkerasan lentur berdasarkan penggunaan nilai rata-rata untuk tiap inputnya (AASHTO, 1993)



Gambar 30 Contoh konseptual grafik hubungan kehilangan tingkat pelayanan dengan perkembangan waktu untuk lokasi tertentu

(AASHTO, 1993)



Gambar 31 Contoh pengeplotan kumulatif lalu lintas ekuivalen sumbu tunggal 8,16 ton terhadap waktu

(AASHTO, 1993)

## 11.2 Desain perkerasan kaku

### 11.2.1 Pengangkatan mengembang tanah di bawah jalan

Cara pendekatan terhadap pengaruh pengembangan tanah pada desain perkerasan kaku, adalah hampir sama dengan desain perkerasan lentur.

Jika pengangkatan mengembang dijadikan suatu pertimbangan yang dapat berpengaruh terhadap kehilangan tingkat pelayanan dan memerlukan pelapisan tambah pada masa mendatang, maka dapat menggunakan prosedur di bawah ini.

### 11.2.2 Tahapan desain perkerasan kaku

#### Langkah 1

Pilih ketebalan slab yang sesuai untuk desain perkerasan awal. Mengacu pada contoh masalah yang disajikan pada Gambar 32a dan Gambar 32b, ketebalan maksimum slab adalah 28,0 cm. Dalam prakteknya ada kalanya ketebalan slab yang kurang dari nilai tersebut, dapat cocok untuk menahan pengangkatan mengembang, sepanjang itu tidak bertentangan dengan waktu untuk lapis tambah minimum.

#### Langkah 2

Pilih perkiraan waktu untuk lapis tambah yang diinginkan pada kondisi pengangkatan mengembang yang diantisipasi dan masukan ke dalam Kolom 2. Angka ini harus kurang dari waktu untuk lapis tambah maksimum yang sesuai dengan ketebalan slab permulaan yang dipilih. Umumnya angka ini lebih besar dari kehilangan lingkungan dan lebih kecil dari waktu lapis tambah.

#### Langkah 3

Dengan menggunakan grafik hubungan antara kehilangan tingkat pelayanan lingkungan kumulatif dengan perkembangan waktu (Gambar 30 digunakan sebagai contoh), perkirakan kehilangan tingkat pelayanan lingkungan total yang diakibatkan oleh pengangkatan mengembang ( $\Delta PSI_{sw}$ ) yang dapat diharapkan untuk perkiraan waktu lapis tambah dari Langkah 2 dan masukan dalam Kolom 3.

#### Langkah 4

Kurangkan nilai kehilangan tingkat pelayanan total yang diinginkan dengan nilai kehilangan tingkat pelayanan lingkungan (Langkah 3) yaitu ( $4,2 - 2,5 = 1,7$ , diambil dari contoh), untuk menetapkan kehilangan tingkat pelayanan lalu lintas yang sesuai. Masukan ke dalam Kolom 4

$$\Delta PSI_{TR} = \Delta PSI - \Delta PSI_{sw} \quad (\text{Persamaan 22})$$

#### Langkah 5

Gunakan Gambar 32a dan Gambar 32b, untuk mengestimasi nilai kumulatif yang diperbolehkan lalu lintas pada ekivalen sumbu tunggal seberat 8,16 ton sesuai dengan kehilangan tingkat pelayanan lalu lintas yang didapat dari Langkah 4, dan masukan ke dalam Kolom 5. Hal yang penting adalah gunakan tingkat kepercayaan yang sama, modulus efektif reaksi tanah dasar dan lainnya, bila menggunakan nomograf desain perkerasan kaku untuk mengestimasi lalu lintas yang diijinkan.

#### Langkah 6

Perkirakan tahun yang sesuai dengan kumulatif lalu lintas pada ekivalen sumbu tunggal seberat 8,16 ton yang akan dicapai (ditentukan dari Tahap 5) dan masukkan ke dalam Kolom 6. Nilai ini harus disertai dengan tambahan dari hubungan lalu lintas kumulatif terhadap perkembangan waktu (Gambar 31 digunakan sebagai contoh).

**Langkah 7**

Bandingkan perkiraan waktu untuk lapis tambah dengan hasil perhitungan pada Tahap 6. Jika perbedaannya lebih besar dari 1 tahun, maka hitunglah nilai rata-rata dari dua angka tersebut dan gunakan ini sebagai nilai coba-coba untuk memulai pengulangan berikutnya (kembali ke Langkah 2).

Jika perbedaannya kurang dari 1 tahun, maka perhitungan memuaskan, sehingga hasil ini menjadi waktu untuk lapis tambah yang diperkirakan untuk struktur perkerasan permulaan sesuai dengan desain ketebalan slab yang dipilih. Dalam contoh ini, kepuasan dapat dicapai setelah tiga kali pengulangan dan waktu untuk lapis tambah yang diperkirakan sekitar 10 tahun.

**Tabel 12 Contoh proses untuk memperkirakan waktu untuk lapis tambah struktur perkerasan kaku permulaan dengan mempertimbangkan pengangkatan mengembang**

Ketebalan slab 28 cm Waktu untuk lapis tambah maksimum : 20 tahun Kehilangan tingkat pelayanan desain : $\Delta PSI = P_o - P_t = 4,2 - 2,5 = 1,7$					
Pengulangan	Perkiraan waktu untuk lapis tambah	Kehilangan pelayanan total akibat pengangkatan mengembang	Kesesuaian kehilangan pelayanan total akibat lalu lintas	Lalu lintas kumulatif yang diijinkan	Waktu untuk lapis tambah yang sesuai
(No)	(tahun)	( $\Delta PSI_{SW}$ )	( $\Delta PSI_{TR}$ )	(8,16 ton ESAL)	(tahun)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	15,0	0,31	1,39	$3,05 \times 10^6$	9,05
2	12,0	0,29	1,41	$3,16 \times 10^6$	9,30
3	10,0	0,26	1,44	$3,33 \times 10^6$	10,20

Keterangan tabel:

<u>Nomor Kolom</u>	<u>Deskripsi Prosedur</u>
2	Diestimasi oleh perencana ( Langkah 2)
3	Gunakan nilai estimasi dari Kolom 2 dengan Gambar 30, tentukan kehilangan tingkat pelayanan total akibat pengangkatan mengembang (Langkah 3)
4	Kurangkan desain total dengan kehilangan tingkat pelayanan lingkungan (Kolom 3)
5	Tentukan dari Gambar 32a dan Gambar 32b, usahakan seluruh masukan adalah konstan (kecuali untuk kehilangan tingkat pelayanan lalu lintas, gunakan dari Kolom 4) dan gunakan nomograf secara kebalikan (Langkah 5)
6	Gunakan lalu lintas dari Kolom 5, estimasi waktu untuk lapis tambah dari Gambar 31 (Langkah 6)

(AASHTO, 1993)

Tabel berikut memperlihatkan tingkat kepercayaan yang direkomendasikan untuk klasifikasi jalan berdasarkan fungsinya. Tingkat kepercayaan tertinggi ditujukan untuk jalan dengan penggunaan terbanyak, sedangkan tingkat kepercayaan terendah yaitu 50% ditujukan untuk jalan-jalan lokal. Nilai tingkat kepercayaan ini digunakan dalam desain dengan bantuan nomograf pada Gambar 29 untuk perkerasan lentur dan Gambar 32 untuk perkerasan kaku.

**Tabel 13 Tingkat kepercayaan yang direkomendasikan untuk klasifikasi jalan berdasarkan fungsinya**

Klasifikasi jalan berdasarkan fungsinya	Tingkat kepercayaan yang direkomendasikan (%)	
	Perkotaan	Antar Kota
Jalan Antar Kota dan Jalan raya (lintas) lainnya	85 – 99,9	80 – 99,9
Jalan Arteri	80 – 99	75 – 95
Jalan Kolektor	80 – 95	75 – 95
Jalan Lokal	50 – 80	50 – 80

(AASHTO, 1993)

**Berdasarkan tingkat kepercayaan yang diperoleh dari**

Tabel 13, standar penyimpangan normal (Zn) dapat ditentukan dari tabel berikut.

**Tabel 14 Standar penyimpangan normal berdasarkan tingkat kepercayaan**

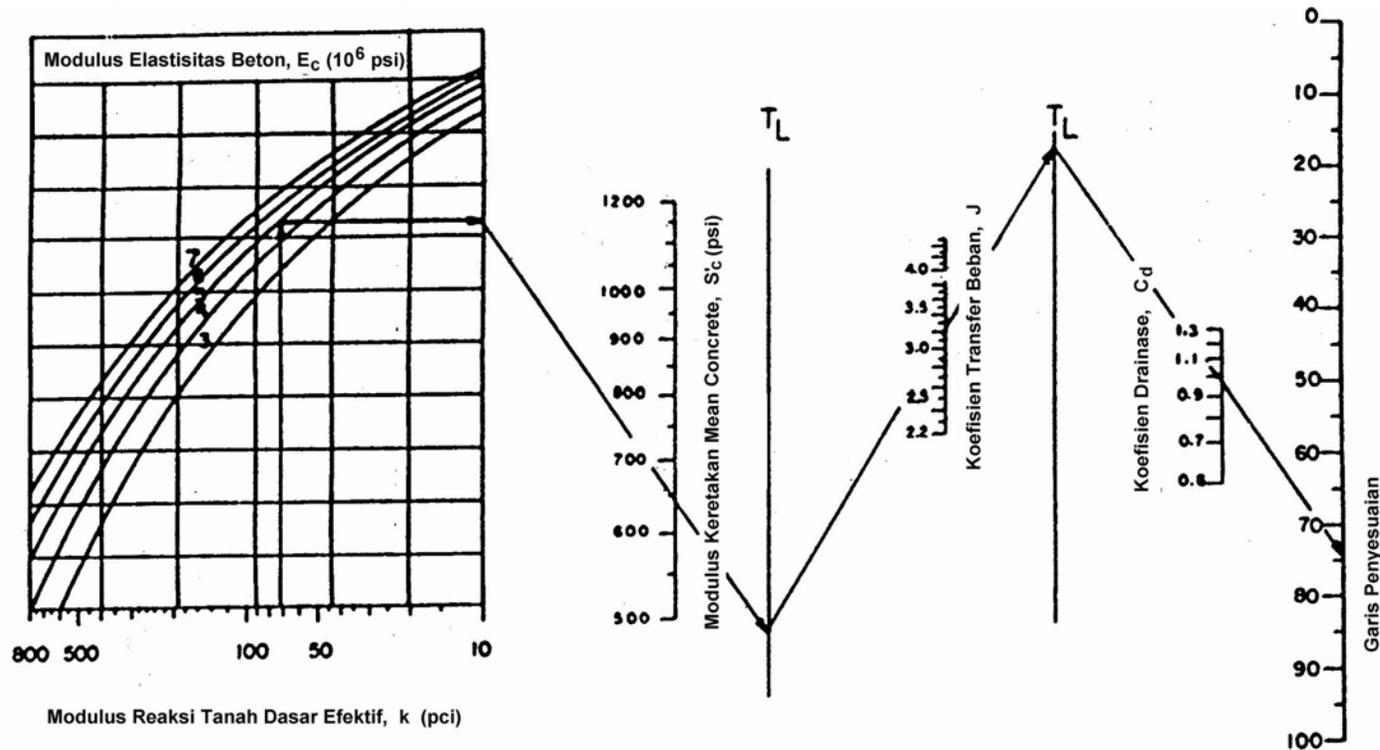
Tingkat kepercayaan, R (%)	Standar penyimpangan normal, Zn
50	- 0,000
60	- 0,253
70	- 0,524
75	- 0,674
80	- 0,841
85	- 1,037
90	- 1,282
91	- 1,340
92	- 1,405
93	- 1,476
94	- 1,555
95	- 1,645
96	- 1,751
97	- 1,881
98	- 2,054
99	- 2,327
99,9	- 3,090
99,99	- 3,750

(AASHTO, 1993)

PERSAMAAN NOMOGRAF :

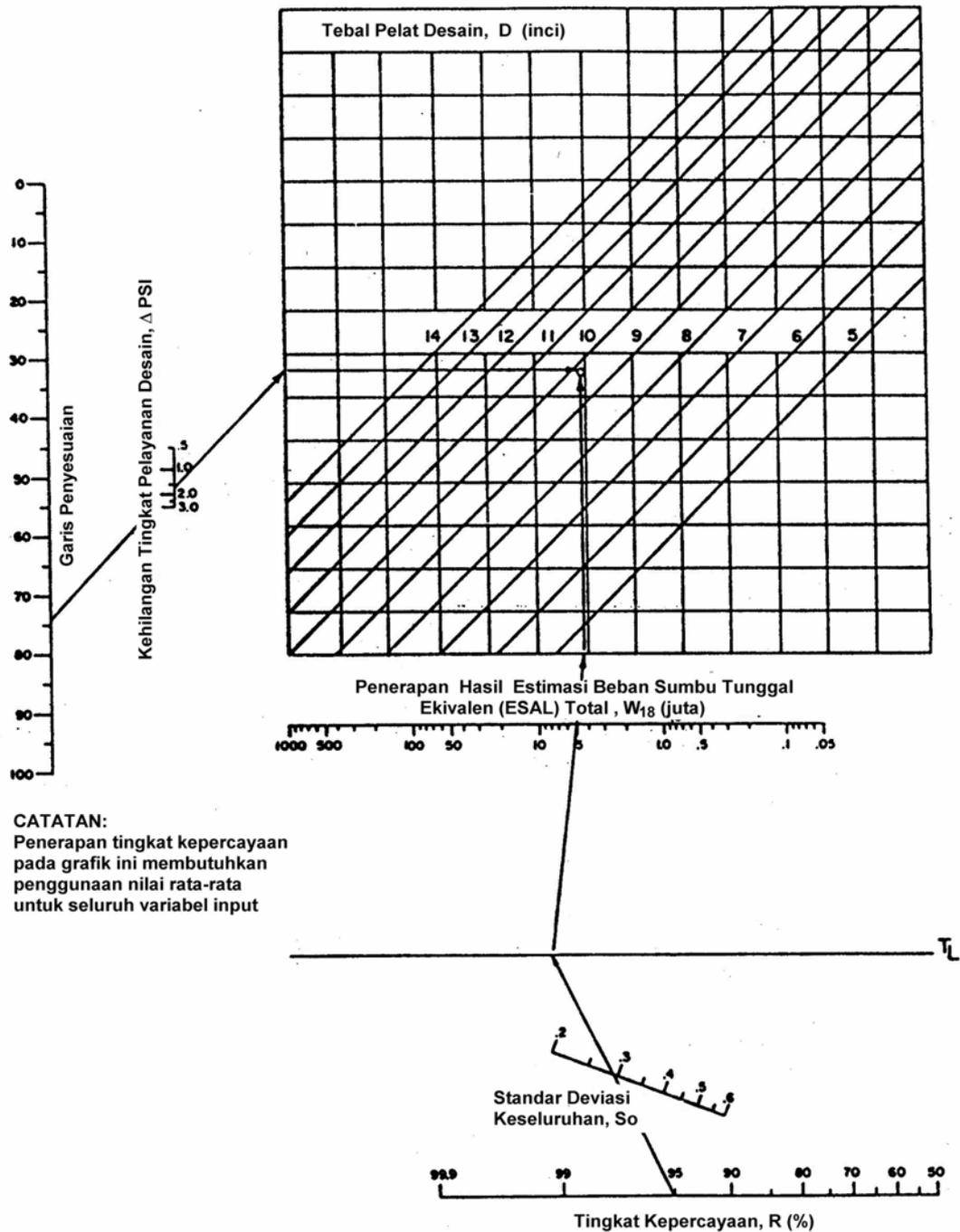
$$\log_{10} W_{18} = z_R * s_o + 7,35 * \log_{10} (D + 1) - 0,06 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4,5 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1,624 * 10^7}{(D + 1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32 p_t) * \log_{10} \left[ \frac{s'_c * c_d \left[ D^{0,75} - 1,132 \right]}{215,63 * J \left[ D^{0,75} - \frac{18,42}{(E_c/k)^{0,25}} \right]} \right]$$

(Catatan : D dalam satuan inci)



(a) Segmen 1

Gambar 32 Grafik desain untuk perkerasan kaku berdasarkan penggunaan nilai rata-rata untuk tiap variabel input (AASHTO, 1993)



Catatan :  $W_{18}$  ESAL =  $W_{8,16}$  ton ESAL

Contoh:  
 $K = 72$  pci  
 $E_c = 5 \times 10^6$  psi  
 $S'_c = 650$  psi  
 $J = 3,2$   
 $C_d = 1,0$   
 $S_o = 0,29$   
 $R = 95\%$  ( $z_n = -1,645$ ), didapat dari Tabel 14  
 $\Delta PSI = 4,2 - 2,5 = 1,7$   
 $W_{18} = 5,1 \times 10^6$  (18 kip ESAL)  
 Penyelesaian:  $D = 10.0$  inci

(b) Segmen 2 – Lanjutan Segmen 1

**Gambar 32 Grafik desain untuk perkerasan kaku berdasarkan penggunaan nilai rata-rata untuk tiap variabel input (lanjutan)**  
 (AASHTO, 1993)

## Lampiran A

### (informatif)

#### Contoh penentuan pengembangan tanah ekspansif

Di bawah ini diberikan suatu contoh untuk menentukan besarnya potensi pengembangan vertikal pada tanah ekspansif.

#### I. Pengangkatan mengembang

##### 1.1 Laju pengembangan konstan

Laju pengembangan konstan adalah suatu faktor yang digunakan untuk memperkirakan kecepatan pengembangan tanah yang akan ditangani. Pengembangan konstan ini dapat terjadi dimana pun dengan nilai antara 0,04 dan 0,20. Nilai yang lebih tinggi dapat digunakan bila tanah terekspos dengan kadar air yang cukup besar akibat hujan deras, daerah yang kurang drainase atau sumber-sumber air lainnya. Nilai yang lebih rendah harus digunakan bila tanah di bawah jalan mempunyai kadar air yang kurang. Gambar A.1 merupakan suatu nomograf untuk memperkirakan laju pengembangan tanah di bawah jalan, dengan mempertimbangkan sumber kadar air dari tanah. Suatu pengamatan yang akurat dalam penentuan nilai faktor ini akan menjadikan para praktisi lebih mengenal dengan aplikasinya dan dapat mencocokkannya dengan hasil kenyataan lapangan.

##### 1.2 Potensi pengangkatan vertikal

Potensi pengangkatan vertikal merupakan gambaran terhadap sejumlah pengangkatan vertikal yang dapat terjadi pada tanah di bawah jalan dalam. Perencana harus mendapatkan nilai pengangkatan vertikal ( $V_R$ ) berdasarkan hasil uji laboratorium, prosedur empirik atau dari pengalaman. Gambar A.2 memperlihatkan sebuah grafik yang dapat digunakan untuk memperkirakan potensi pengangkatan vertikal, khususnya pada lokasi lapisan tanah yang mempunyai indeks plastisitas, kondisi kadar air dari seluruh tebal lapisan. Kondisi kadar air tanah harus diperoleh berdasarkan estimasi jumlah kadar air tanah terdekat selama pelaksanaan.

##### 1.3 Kemungkinan mengembang

Kemungkinan tanah untuk mengembang menggambarkan jumlah proporsi, yang dinyatakan dalam persen, pada suatu panjang proyek dimana tanahnya mengalami pengembangan. Kemungkinan untuk mengembang pada satu lokasi diperhitungkan menjadi 100 persen, jika tanah di bawah jalan mempunyai indeks plastisitas lebih besar dari 30 persen dengan ketebalan lapisan lebih besar dari 60 cm atau jika  $V_R$  lebih besar dari 0,50 cm. Kemungkinan untuk mengembang dapat diestimasi dari hasil pengeboran tanah dan uji laboratorium. Laju pengembangan konstan di lapangan dapat diestimasi dari Gambar A.2. Sedangkan Gambar A3 dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya kehilangan pelayanan akibat pengembangan tanah yang berada di bawah badan jalan.

## II. Potensi pengembangan vertikal (PVR) tanah ekspansif

### 2.1 Pengembangan tanah

Besarnya pengembangan tanah dapat ditentukan oleh salah satu cara yang dikemukakan di bawah ini dengan menggunakan Gambar A4. Cara 1 adalah dengan menentukan besarnya angka pori ( $e_f$ ) lapangan yaitu:

$$e_f = \frac{\text{kadar air lapangan (\%)} \times \text{berat jenis}}{\text{tingkat kejenuhan (\%)}} \quad (1)$$

Cara 2 adalah dapat digunakan setelah serangkaian uji cara 1 dilakukan. Dengan menggunakan perhitungan, maka besarnya pengembangan ( $S$ ) setiap tebal lapisan tanah ( $H$ ) ditentukan dengan persamaan

$$S = \frac{eH}{1 + e_f} \quad (2)$$

dengan pengertian  $e$  adalah angka pori awal, sedangkan  $e_f$  adalah angka pori lapangan.

### 2.2 Prosedur penentuan potensi pengembangan vertikal

- 1) Prosedur ini diperlukan untuk mengetahui besarnya kadar air dari masing-masing contoh tiap lapisan. Hal ini lebih baik jika pemeriksaan kadar air dilakukan pada waktu pengambilan contoh di lapangan. Kadar air dapat diambil dari tabung yang telah di disegel;
- 2) Tentukan kepadatan basah dengan memotong tanah dari dalam tabung. Ukuran butiran tanah ini memiliki tinggi dan diameter sekitar 0,25 mm dan beratnya diperkirakan 0,50 gram. Jika pemotongan hanya dilakukan pada waktu pengambilan contoh, gunakan kepadatan basah 20 kN/m<sup>3</sup> karena umumnya sering digunakan;
- 3) Dari sisa-sisa potongan tanah, tentukan nilai batas cair (LL), indeks plastisitas (PI) dan persentase tanah tertahan saringan nomor 40. Catat hasil ini dan masukkan kedalam Tabel A.1 sesuai dengan masing-masing lapisan tanah;

**Tabel A.1 Korelasi tingkat pengembangan dengan batas cair, indeks plastisitas dan hisapan tanah**

Tingkat pengembangan	Batas cair (LL)	Indeks plastisitas (PI)	Hisapan tanah ( $\tau_a$ )
Tinggi	> 60	> 35	> 183 kPa
Sedang	50 – 60	25 – 35	144 – 183 kPa
Rendah	<50	<25	<144 kPa

- 4) Dimulai dari lapisan atas permukaan tanah pada lubang bor (Gambar A.8), lakukan kompilasi terhadap Gambar A.8. Tentukan kondisi tiap lapisan tanah, yaitu basah, kering atau rata-rata;

Berdasarkan pengalaman diperoleh bahwa dalam kondisi kering potensi pengembangan vertikal (selanjutnya disebut sebagai PVR) dapat ditentukan dari garis 0,22 LL+9 yang mempunyai penyusutan yang kecil, tetapi potensi pengembangan volume terbesar. Biasanya terjadi pada tanah lempung mengembang dengan kadar air yang minimum. Untuk kondisi basah PVR dapat ditentukan dari garis 0,47LL+2, dan menggambarkan penyerapan kapiler maksimum yaitu pada uji laboratorium dimana benda uji dalam cetakan dengan kadar air optimum pada pembebanan 7 kPa. Hal ini juga analog terhadap kadar air yang terdapat di bawah perkerasan jalan dan struktur ringan lainnya. Hal tersebut merupakan kondisi minimum.

- 5) Dengan menggunakan Gambar A.5 pada kondisi kadar air basah, kering atau rata-rata, tentukan nilai indeks plastisitas PI tanah pada lapisan pertama pada absis. Tarik ke arah vertikal untuk mendapatkan kurva pengembangan yang sesuai yaitu pada kondisi kering, basah atau rata-rata dan baca persentase perubahan volume pada ordinat. Besarnya perubahan volume ini ditentukan pada tekanan 7 kPa;

Dalam Gambar A.6 dan Gambar A.7, kurva hubungan antara potensi pengembangan vertikal dengan beban, ditujukan bagi kembang bebas tanah lempung tanpa beban dan didasarkan pada nilai kepadatan basah tanah sebesar  $20 \text{ kN/m}^3$ .

Agar kurva pada Gambar A.6 dan Gambar A.7 dapat digunakan, kurva harus ditetapkan berada pada kondisi kembang bebas dengan persentase pengembangan volume pada beban 7 kPa seperti yang diperlihatkan dalam Gambar A.5. Hubungannya adalah sebagai berikut :

Persentase pengembangan volume tanpa beban = persentase pengembangan volume pada beban 7 kPa  $\times 1,07 + 2,6$

Contoh: Dari Gambar A.5, persentase pengembangan volume pada 7 kPa sebesar 10, sehingga persentase pengembangan volume tanpa beban atau kembang bebas adalah  $10 \times (1,07) + 2,6 = 13,3$ . Kurva ini harus ditulis di dalam Gambar A.6 dan Gambar A.7 untuk keakuratan pembacaan.

- 6) Perhitungan PVR sebaiknya menggunakan tebal lapisan 0,6 meter yang dilengkapi dengan kadar air dan profil lubang bor. Penggunaan tebal lapisan dan asumsi kepadatan basah  $20 \text{ kN/m}^3$  pada umumnya sering digunakan sehingga dapat dibuat suatu tabulasi sederhana;

Modifikasi yang disebabkan oleh penggunaan kepadatan  $20 \text{ kN/m}^3$  lebih baik dari  $23 \text{ kN/m}^3$  untuk 7 kPa per meter yang telah disatukan ke dalam kurva pada Gambar A.6 dan Gambar A.7. Nilai kepadatan basah bervariasi dari  $20 \text{ kN/m}^3$  sampai lebih besar sesuai yang diinginkan. Faktor pengubah harus diterapkan pada lapisan yang ekuivalen dengan  $20 \text{ kN/m}^3$  dibagi oleh kepadatan basah aktual.

Beban rata-rata lapisan 0,60 meter pada permukaan tanah adalah 7 kPa, sedangkan pada lapisan antara 0,60 sampai dengan 1,20 meter adalah 14 kPa. Beban pada lapisan antara 0,60 sampai dengan 1,20 meter adalah beban lapisan bagian atas 0,60 meter ditambah beban rata-rata antara lapisan 0,60 meter sampai 1,20 meter, sehingga beban total 21 kPa. Faktor koreksi yang digunakan telah dijelaskan sebelumnya.

- 7) Dengan menggunakan persentase kurang dari 0,425 mm saringan No 40, maka nilai PVR dapat ditentukan sebagai berikut:
- gunakan pengembangan nol di mana persentase kurang dari 0,425 mm adalah lebih kecil dari 25 persen;
  - kalikan pengembangan yang didapat pada lapisan oleh persen kurang dari 0,425 mm bila persentase melebihi 25 persen
- 8) Kemudian gunakan Gambar A.5, tentukan persentase pengembangan volume pada lapisan pertama (antara 0,00 meter sampai dengan 0,60 meter). Mulai dari sini pengembangan ditentukan dengan menggunakan beban 7 kPa dan beban ini harus diubah untuk mendapatkan pengembangan bebas atau tanpa beban. Gunakan Gambar A.6 dan Gambar A.7 dan tentukan persentase kembang bebas untuk memulai kompilasi pengembangan tiap lapisan;
- pada lapisan 0,00 meter sampai dengan 0,60 meter, baca ordinat (PVR) pada beban 7 kPa dari kurva pengembangan dan masukkan ke dalam Tabel A.2 sebagai lapisan bawah.
  - dari kurva ini, baca beban lapisan atas, dalam hal ini adalah nol dan masukkan ke dalam Tabel A.2.

- c) perbedaan dua pembacaan ini adalah harga PVR pada lapisan pertama 0,60 meter, yang diperlukan untuk mengubah koreksi kepadatan dan butiran tanah (kurang dari 0,425 mm).
- 9) Ambil lapisan antara 0,60 meter sampai dengan 1,20 meter dan tentukan persentase pengembangan volume dengan mengubah nilai yang telah ditetapkan dari Gambar A.5.. Pada kurva pengembangan volume atau dibuat garis bila tidak jelas dalam Gambar A.6 dan Gambar A.7, baca nilai PVR pada ordinat yang menggambarkan beban 21 kPa (lapisan bawah) dan masukkan ke dalam Tabel A.2. Baca ordinat yang menggambarkan beban 7 kPa (lapisan atas) pada kurva yang sama.

Perbedaan dua pembacaan ini adalah pengembangan pada lapisan 0,60 meter sampai dengan 1,20 meter, dimaksudkan adanya modifikasi pada setiap kepadatan dan butiran tanah (kurang dari 0,425 mm)

- 10) Lanjutkan pembacaan nilai PVR setiap lapisan 0,60 meter sampai pengembangan lapisan dapat ditentukan sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar A.6 dan Gambar A.7. Dalam kenyataannya pengembangan dapat diabaikan atau bernilai nol pada setiap tempat bila berada di luar kedua kurva tersebut. Ketebalan lapisan yang lebih besar dapat digunakan dalam perhitungan ini, asalkan tanahnya seragam dan mempunyai nilai plastisitas dan kadar air yang sama.
- 11) Periksa setiap lapisan untuk faktor pengubah kepadatan dan butiran tanah.
- 12) Jumlahkan nilai PVR dari seluruh lapisan untuk mendapatkan PVR total lapangan

Dalam Tabel A.2 telah diperhitungkan untuk tidak ada beban akibat struktur. Bila diketahui ada beban akibat struktur, maka tambahkan ke dalamnya beban rata-rata dan tambahkan ke dalam kolom beban struktur tersebut, tapi perlu dicatat bahwa pengembangan akan dikoreksi dikarenakan adanya beban tambahan.

- 13) Untuk laporan hasil pengujian, serahkan satu lembar Tabel A.2 sesuai dengan pekerjaannya beserta identifikasi lapangan.

Dalam desain sering diperlukan estimasi nilai PVR tanpa mengetahui kadar air yang diantisipasi pada waktu pelaksanaan. Dalam kasus semacam ini desain dan perencanaan harus jeli terhadap pemilihan garis dalam penggunaan Gambar A.5.

Jika kondisi proyek dalam musim kering sampai agak kering, sedangkan perencanaan dan spesifikasi tidak dilengkapi dengan pemeriksaan kadar air - kepadatan atau pemeliharaan kadar air, maka disarankan untuk menggunakan garis (0,22 LL + 9). Jika dalam perencanaan dan spesifikasi membutuhkan pemeriksaan kadar air - kepadatan dan pemeliharaan kadar air, maka dapat menggunakan garis rata-rata.

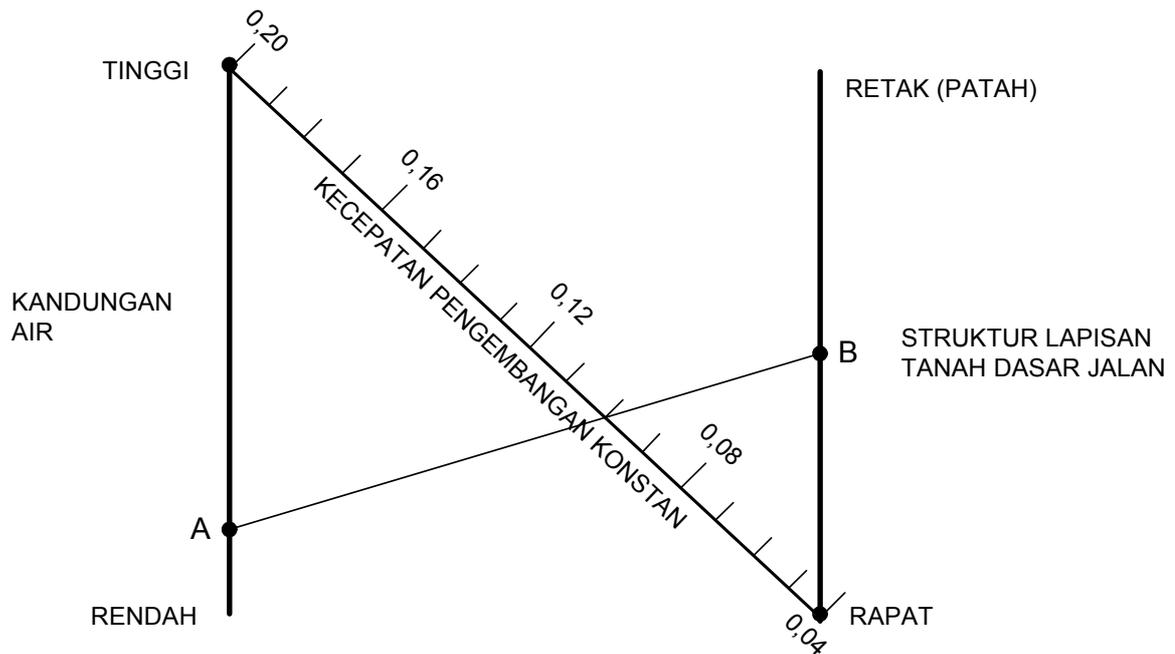
Untuk daerah yang curah hujannya tinggi, maka dapat menggunakan garis rata-rata dengan dilengkapi pemeliharaan kadar air, tetapi jika dilengkapi dengan pemeriksaan kadar air - kepadatan dan pemeliharaan kadar air, maka dapat menggunakan garis yang lebih rendah (0,47 LL + 2) pada Gambar A.4. Pemeliharaan kadar air dapat dilakukan dengan menggunakan lapis penutup, seperti bahu jalan yang lebar terdiri dari material granular, tanah yang distabilisasi atau membran aspal, dapat diterapkan untuk tujuan ini.

Tabel A.2 Hasil pengujian tanah

Kedalaman	Beban rata-rata	Batas cair (LL)	Kering 0,22LL+9	Basah 0,47LL+2	Kadar air	Kering Rata-rata Basah	Persen – 0,425 mm	PI	Pengembangan volume	Kembang bebas	PVR Lapisan atas	PVR Lapisan bawah	Perbedaan PVR	Faktor pengubah –0,425 mm	Faktor Kepala datan	PVR Tiap lapisan
(m)	(kPa)	-	-	-	(%)	-	-	(%)	(%)	(%)	(mm)	(mm)	(mm)	-	-	(mm)
0,60	7	21	-	-	3,1	Kering	100	4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,00
0,6-1,2	21	60	21,0	30,2	29,7	Basah	100	38	5,5	8,5	10,4	22,3	11,9	1,0	1,0	11,9
1,2-1,8	34	60	21,0	30,2	20,9	Kering	100	38	11,0	14,5	39,4	55,9	16,5	1,0	1,0	16,5
1,8-2,4	48	75	24,0	37,3	24,4	Kering	100	45	13,5	17,0	71,4	86,6	15,2	1,0	1,0	15,2
2,4-3,0	62	75	24,0	37,3	36,5	Basah	100	45	7,0	10,0	42,9	47,0	4,1	1,0	1,0	4,1
3,0-3,6	76	65	22,0	32,6	8,5	Basah	15	40	Kurang dari 25 persen		-0,425	mm	1,0	1,0	0,0	
3,6-4,2	90	65	22,0	32,6	8,5	Basah	15	40	Kurang dari 25 persen		-0,425	mm	1,0	1,0	0,0	
4,2-4,8	103	65	22,0	32,6	8,5	Basah	15	40	Kurang dari 25 persen		-0,425	mm	1,0	1,0	0,0	
4,8-5,4	117	65	22,0	32,6	8,5	Basah	15	40	Kurang dari 25 persen		-0,425	mm	1,0	1,0	0,0	
5,4-6,0	131	85	26,0	42,0	41,5	Basah	100	60	10,2	13,5	89,9	91,9	2,0	1,0	1,0	2,0
6,0-6,6	145	80	25,0	39,6	33,9	Rata <sup>2</sup>	100	60	12,6	16,0	123,9	127,0	3,1	1,0	1,0	3,1
6,6-7,2	159	80	25,0	39,6	33,9	Rata <sup>2</sup>	100	54	12,6	16,0	127,0	129,8	2,8	1,0	1,0	2,8
7,2-7,8	172	80	25,0	39,6	33,9	Rata <sup>2</sup>	100	54	12,6	16,0	129,8	132,1	2,3	1,0	1,0	2,3
7,8-8,4	186	80	25,0	39,6	33,9	Rata <sup>2</sup>	100	54	12,6	16,0	132,1	133,9	1,8	1,0	1,0	1,8
8,4-9,0	200	80	25,0	39,6	33,9	Rata <sup>2</sup>	100	54	12,6	16,0	133,9	135,4	1,5	1,0	1,0	1,5
9,0-9,6	214	80	25,0	39,6	33,9	Rata <sup>2</sup>	100	54	12,6	16,0	135,4	135,6	0,2	1,0	1,0	0,2
														Total	PVR	= 61,4
6,0-9,6	131 s/d214	80	25,0	39,6	33,9	Rata <sup>2</sup>	100	54	12,6	16,0	123,9	135,6	11,7	1,0	1,0	11,7

**Keterangan tabel:**

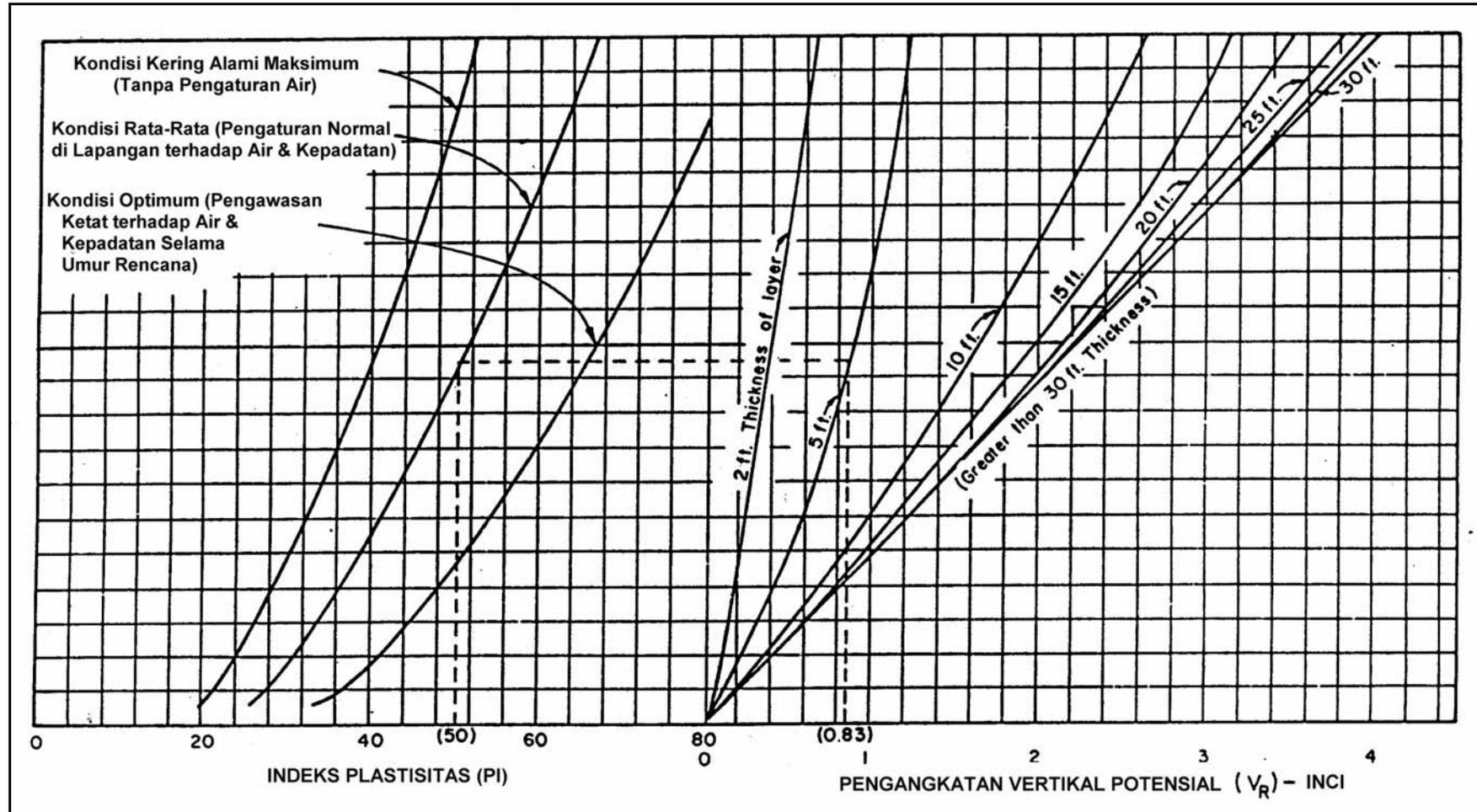
1. Diasumsikan bahwa semua lapisan mempunyai kepadatan tanah basah 20 kN/m<sup>3</sup>. Bila diinginkan nilai yang lebih besar, gunakan angka (20 dibagi kepadatan basah aktual) sebagai faktor pengubah.
2. Lapisan tanah dari kedalaman 6,0 meter sampai dengan 9,6 meter atau setebal 3,6 meter merupakan lapisan yang seragam, nilai PVR harus ditentukan dalam satu pembacaan dengan menggunakan lapisan bagian atas pada beban 131 kPa (sebagaimana tebal lapisan 0,6 meter) dan pembacaan lapisan bawahnya pada beban 214 kPa pada lapisan 9,0 meter sampai dengan 9,6 meter. Masing-masing pembacaan 123,9 mm dan 135,6 mm, atau perbedaan 11,7 mm, akan diperoleh yang merupakan dapat penyajian dari peningkatan atau perbedaan seperti diperlihatkan di atas untuk lapisan bawah kedalaman 3,6 meter.
3. Bila lapisan lempung ekspansif kurang dari 0,60 meter, sebagai contoh lapisan 1,20 meter sampai dengan 1,40 meter, sebaiknya masukkan ke dalam absis kurva pengembangan tersendiri pada masing-masing kedalaman 1,20 meter dan 1,40 meter, dan gunakan perbedaan pada masing-masing pembacaan ordinat sebagai pengembangan tak berubah pada tebal lapisan 0,20 meter



**Keterangan grafik:**

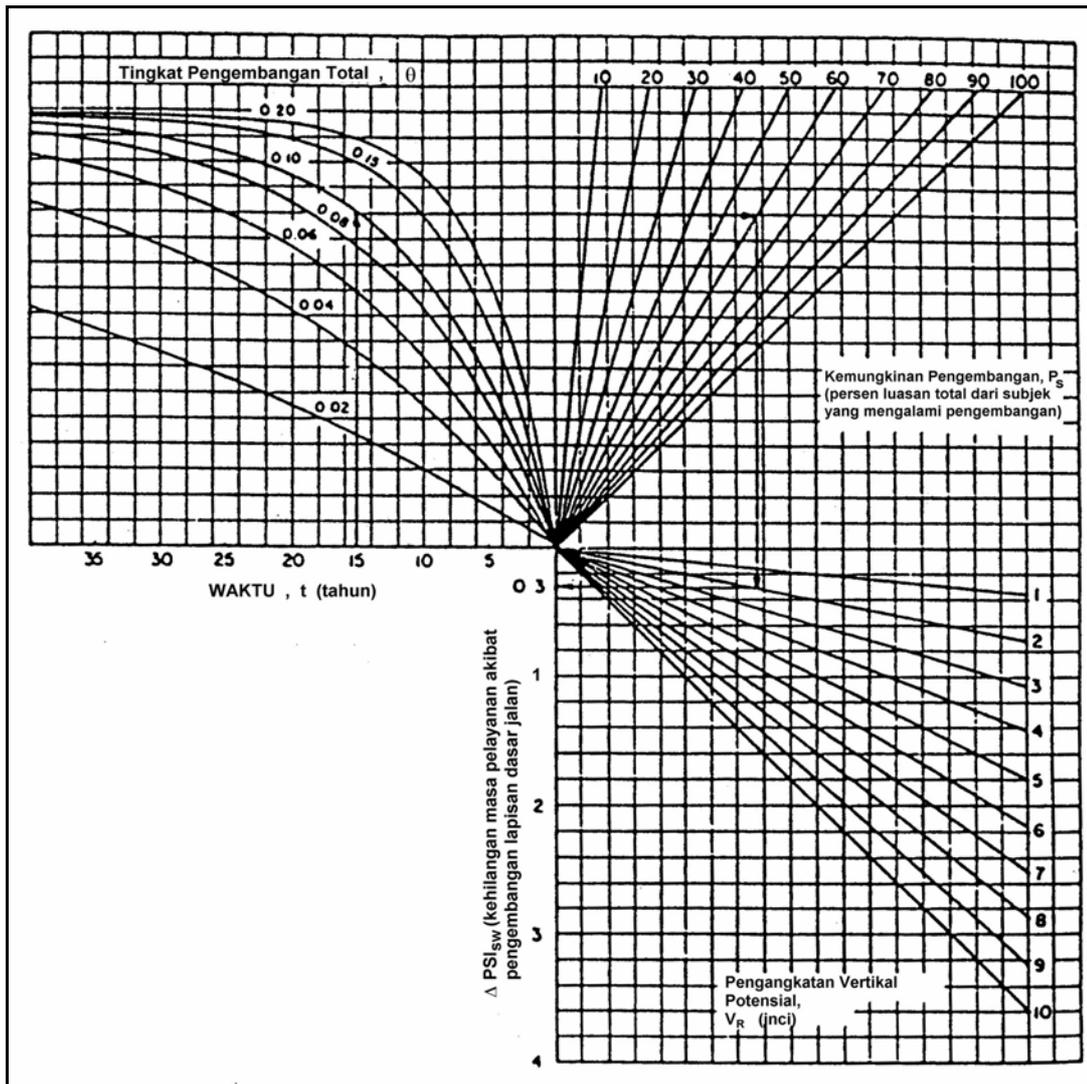
1. Kandungan air rendah, artinya:
  - Curah hujan rendah
  - Drainase baik
2. Kandungan air tinggi, artinya:
  - Curah hujan tinggi
  - Drainase buruk
 Terdapat gorong-gorong, abutmen jembatan dan saluran masuk
3. Contoh penggunaan nomograf:
  - a. Tentukan lokasi titik kandungan air yang sesuai, kemungkinan berada di antara kondisi tinggi dan rendah (seperti titik A)
  - b. Tentukan lokasi titik struktur tanah yang sesuai (seperti titik B)
  - c. Gambar garis lurus di antara titik terpilih (menghubungkan titik A dan B)
  - d. Baca kecepatan pengembangan konstan dari sumbu diagonal (dibaca 0,10)

**Gambar A.1 Nomograf untuk memperkirakan besarnya kecepatan pengembangan konstan**  
(AASHTO, 1993)



Gambar A.2 Grafik untuk memperkirakan besarnya potensial pengangkatan vertikal tanah alami

(AASHTO, 1993)

**Keterangan gambar:**

Persamaan Nomograf

$$\Delta PSI_{sw} = 0,00335 \times V_R \times P_s \times (1 - e^{-ef})$$

Contoh:

$$t = 15 \text{ tahun}$$

$$e = 0,10$$

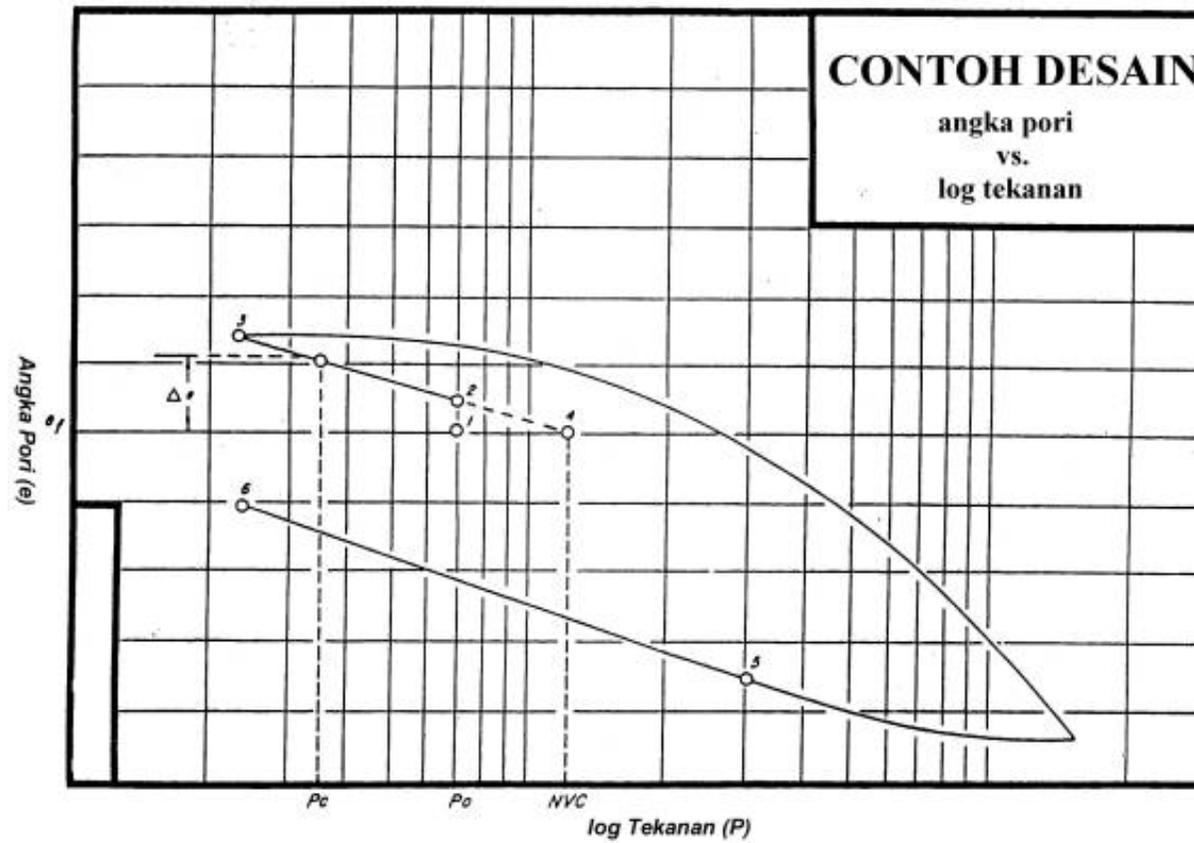
$$P_s = 60\%$$

$$V_R = 2 \text{ inci}$$

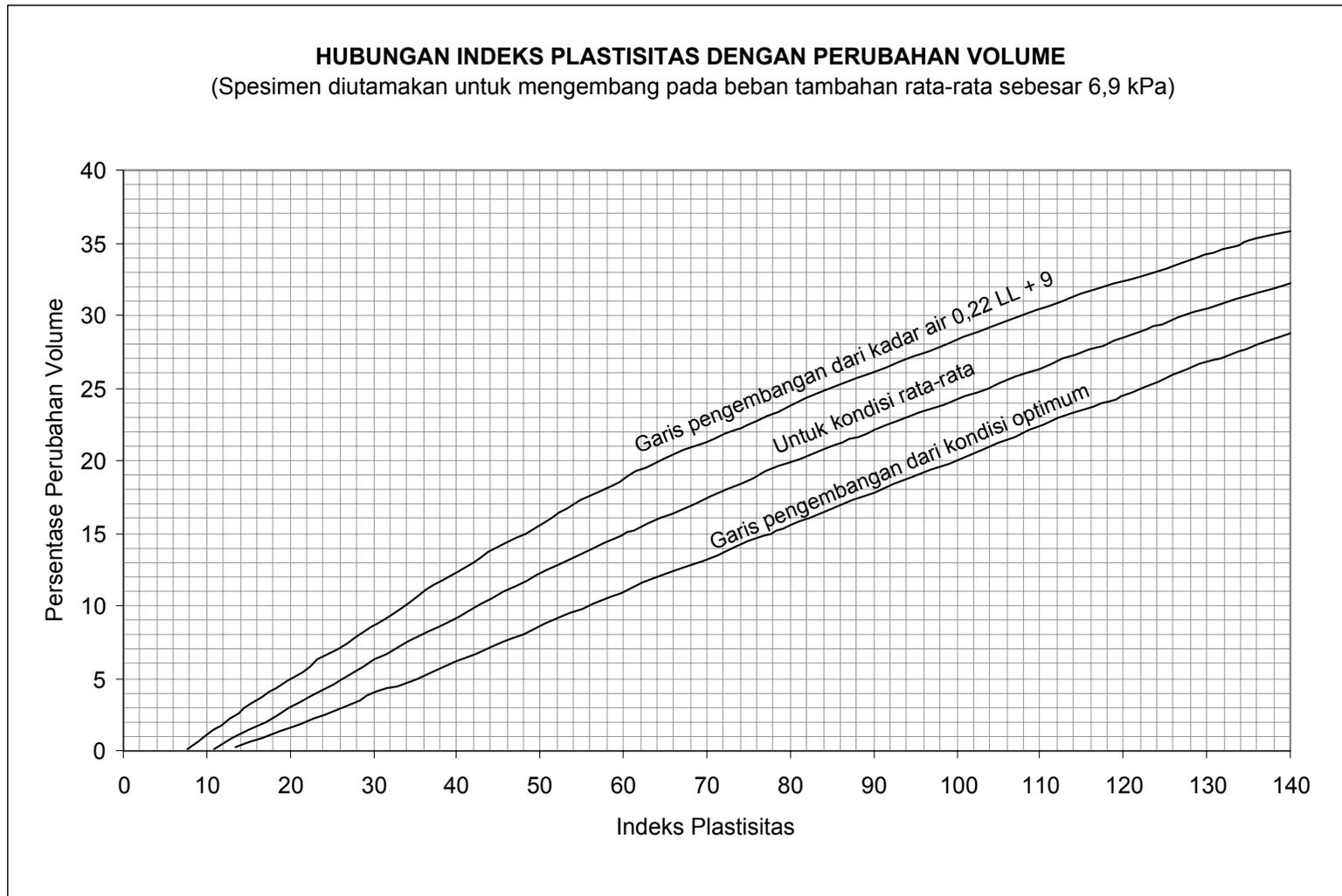
Penyelesaian:  $\Delta PSI_{sw} = 0,3$

**Gambar A.3** Grafik untuk memperkirakan besarnya kehilangan masa pelayanan akibat pengembangan lapisan dasar jalan

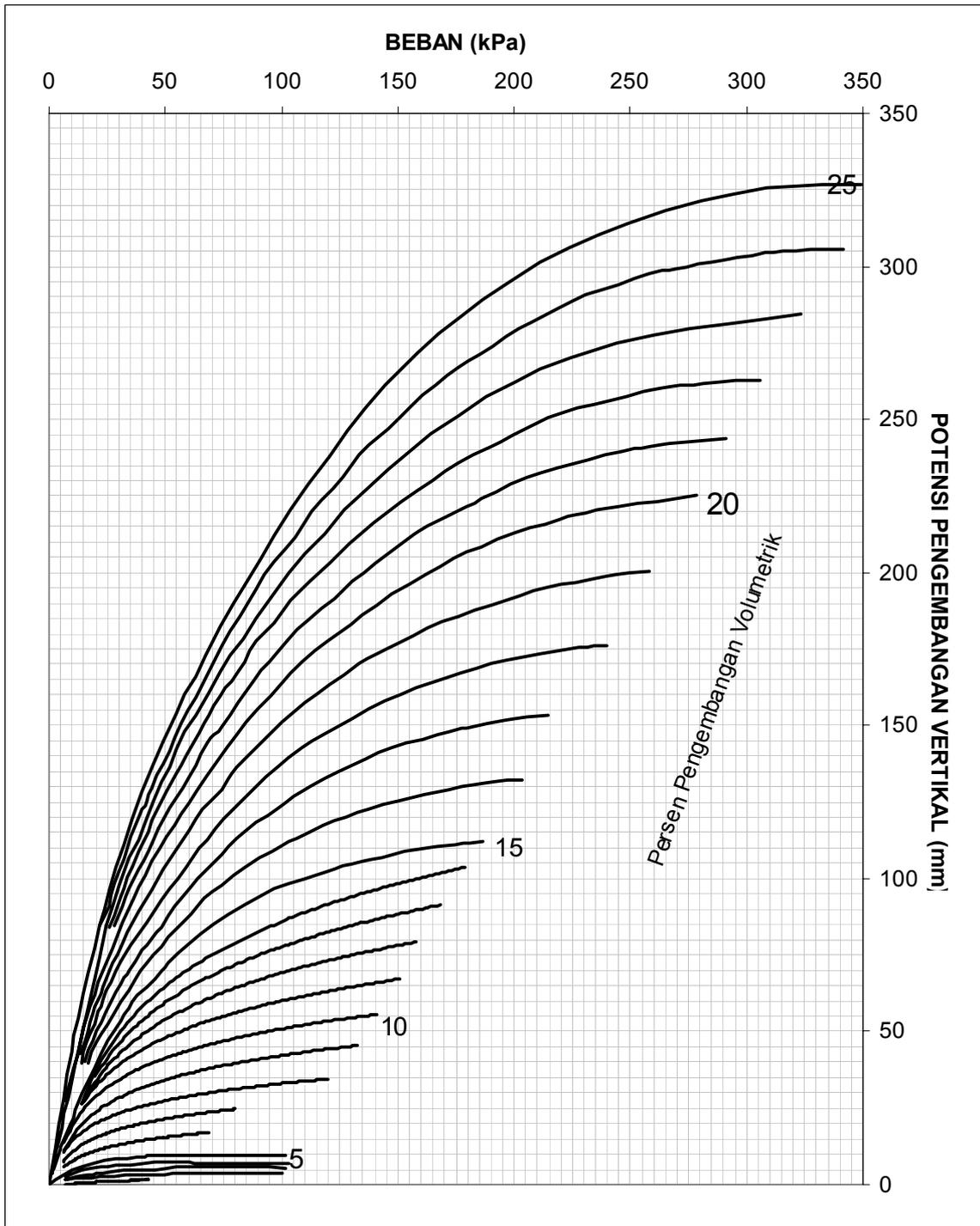
(AASHTO, 1993)



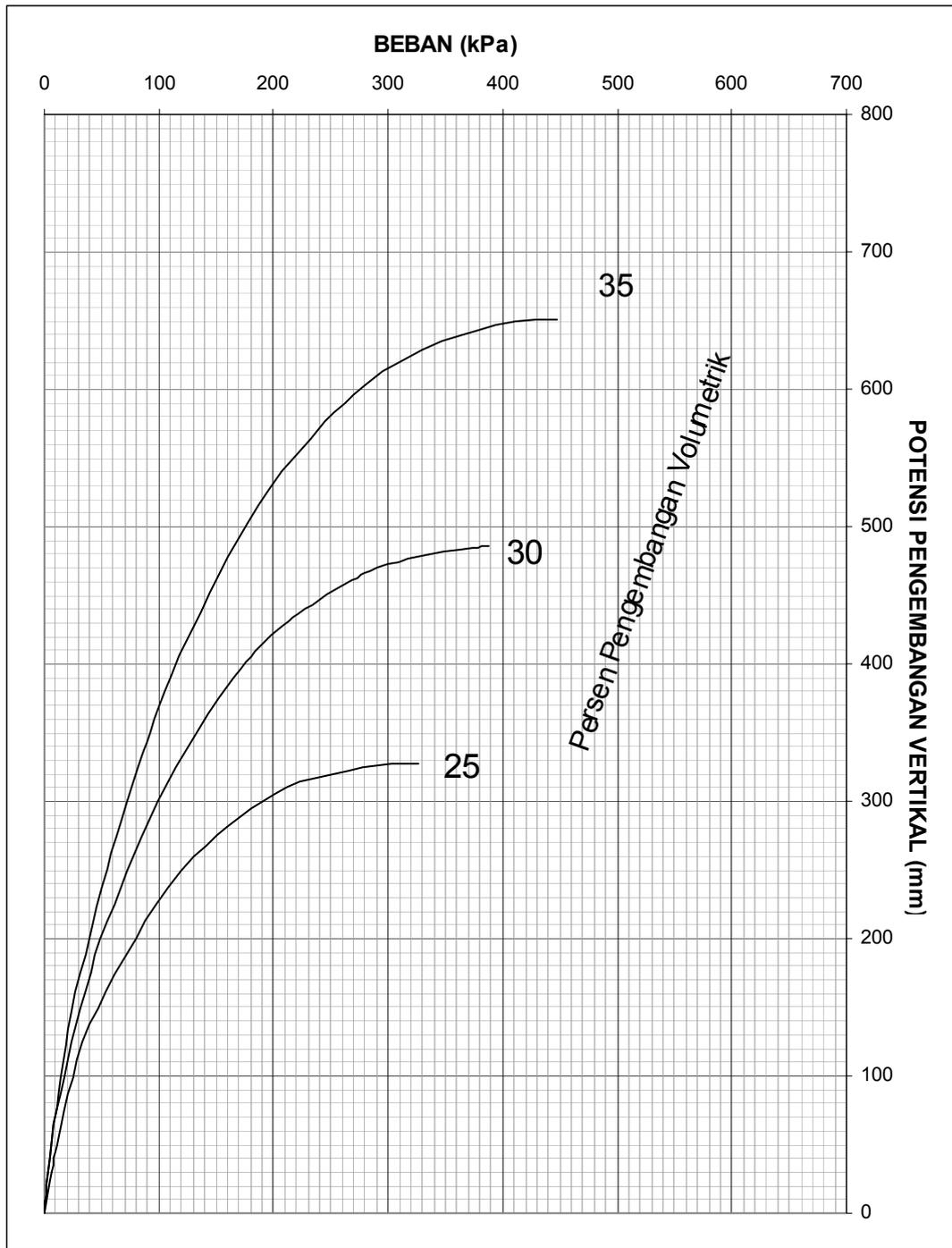
Gambar A.4 Contoh desain angka pori terhadap log tekanan  
(AASHTO, T-258, 1981)



**Gambar A.5 Grafik hubungan indeks plastisitas dengan perubahan volume**  
(AASHTO, T-258, 1981)



Gambar A.6 Kurva hubungan antara potensi pengembangan vertikal dengan beban (AASHTO, T-258, 1981)



Gambar A.7 Kurva hubungan antara potensi pengembangan vertikal dengan beban (AASHTO, T-258, 1981)

BORLOG						
Lokasi : _____		Struktur : _____		Tanggal Pengujian : _____		
Nama Jalan : _____		No. lubang : _____		Elevasi Muka Tanah : _____		
Titik acuan : _____		Lokasi dari centerline : _____		Elevasi Muka Air Tanah : _____		
Elevasi (m)	PROFIL BOR	Jumlah Tumbukan pada Percobaan Penetrasi		DESKRIPSI MATERIAL	METODE PEMBORAN	*
		1 150 mm	2 150 mm			
0				Pasir, warna coklat, lepas	0	D. Bbl
				Lempung, warna coklat tua, basah		P. Bbl
				Lempung, warna coklat tua, keras		P. Bbl
				Lempung, warna merah dan kuning, keras		P. Bbl
5				Lempung, warna merah dan kuning, lunak, basah	5	P. Bbl
			Kerikil, kasar sampai halus, sebagian lempung kuning basah		*	
10			Lempung, kuning, halus	10	P. Bbl	
			Lempung, kuning, keras		P. Bbl	
15				15		
20			P. Bbl. Push Barrel	20		
25			* Tidak diperoleh pemboran yang baik akibat persentase kerikil yang besar	25		
30				30		
35				35		
* KETERANGAN:						
Juru Bor _____		Pencatat data _____			Jabatan _____	

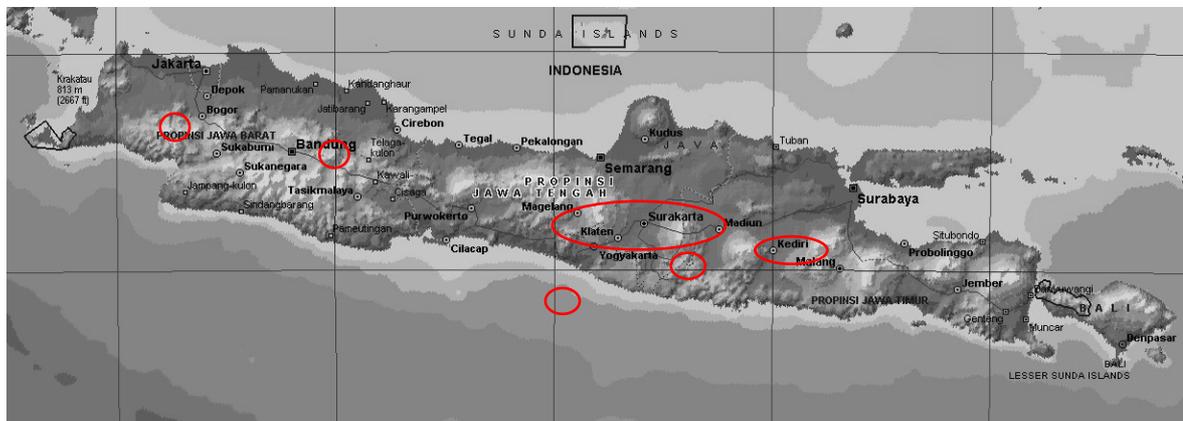
**Gambar A.8 Contoh borlog pengambilan sampel tanah ekspansif**  
(AASHTO, T-258, 1981)

## Lampiran B

(informatif)

### Penyebaran tanah ekspansif di Pulau Jawa

Tanah ekspansif di Pulau Jawa menempati dataran rendah sampai daerah perbukitan bergelombang rendah yang dapat berupa endapan alluvium atau endapan vulkanik, meliputi formasi aluvium (Qa), formasi Notopuro (Qpnv) dan endapan gunung api (Qav). Tanah ekspansif ini didominasi oleh jenis tanah lempung lanauan atau lanau lempungan berwarna abu-abu sampai hitam. Mineral lempung tanah ekspansif pada umumnya terdiri dari montmorillonite, illite, kaolinite. Lokasi penyebaran tanah ekspansif di Pulau Jawa ditunjukkan pada Gambar di bawah ini.



**Gambar B.1 Daerah yang diketahui memiliki masalah lempung mengembang di pulau Jawa**

Ruas jalan yang melewati tanah ekspansif antara lain adalah:

- 1) ruas jalan Tol Jakarta-Cikampek, propinsi Jawa Barat;
- 2) ruas jalan Jatibarang-Karangampel, propinsi Jawa Barat;
- 3) ruas jalan Semarang-Kudus, Demak-Godong, propinsi Jawa Tengah;
- 4) ruas jalan Semarang –Purwodadi, propinsi Jawa Tengah;
- 5) ruas jalan Wirosari–Cepu, propinsi Jawa Tengah;
- 6) ruas jalan Yogyakarta-Wates, propinsi Yogyakarta;
- 7) ruas jalan Bojonegoro-Babat-Lamongan-Gresik-Surabaya, propinsi Jawa Timur;
- 8) ruas jalan Ngawi-Caruban, propinsi Jawa Timur.

Informasi mengenai penyebaran tanah ekspansif di luar pulau Jawa masih membutuhkan penyelidikan lebih lanjut sehingga belum tercakup di dalam pedoman ini.

**Lampiran C**  
**(informatif)**  
**Nama dan lembaga**

**1) Pemrakarsa**

Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Badan Penelitian dan Pengembangan ex. Departemen Kimpraswil.

**2) Penyusun**

Nama	Instansi
Drs. M. Suherman	Puslitbang Prasarana Transportasi

## Bibliografi

AASHTO (1993), *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA.

AASHTO (1998), *Standard Specification for Transportation Materials and Method of Sampling and Testing, Nineteenth Edition, Part II, Tests*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA.

Bowles, J.E., (1977), *Foundation Analysis and Design, Second Edition*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo, Japan.

Chen, F.H., (1975) *Foundations on Expansive Soils, Developments in Geotechnical Engineering 12*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.

Fredlund, D.G., Rahardjo, H., (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, Inc., USA.

Nelson, J.D., Miller, D.J., (1992) *Expansive Soils, Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., USA.

Snethen, D.R., Townsend, F.C., Johnson, L.D., Patrick, D.M. dan 'Vedros, P.H. (1975) *A Review of Engineering Experiences with Expansive Soils in Highway Subgrades, Report No. FHWA/RD-75/48*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington D.C., USA.