

MAKALAH

ANALISIS KESTABILAN LERENG DI LIMAU MANIS DENGAN METODA PENCAampurAN KAPUR UNTUK PERBAIKAN TANAH

PUSAT PERPUSTAKAAN UNIV. NEGERI PADANG	
DITERIMA TGL.	: 4 - 0 - 2000
SUMBER / JUDUL	: H 1
KOLEKSI	: K
NO. INVENTARIS	: 4306/K/2000-01 (2)
KLASIFIKASI	: 620.1 MA2 - a

DISUSUN OLEH:

DENI IRDA MAZNI, ST., MT.

NIP : 132169925

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI PADANG
JULI 2000

ANALISIS KESTABILANLERENG DI LIMAU MANIS DENGAN METODA PENCAMPURAN KAPUR UNTUK PERBAIKAN TANAH

ABSTRAK

Analisis stabilitas lereng menggunakan PCSTABL5M dilakukan untuk melihat faktor keamanan pada lereng yang terdapat pada sisi jalan menuju Rektorat Unand Limau Manis. Perhitungan faktor keamanan dihitung dengan Metoda Irisan Bishop yang Disederhanakan, untuk bidang longsor lingkaran. Analisis ini dimaksudkan untuk mendapatkan permukaan runtuh yang potensial dan faktor keamanan sesuai yang disyaratkan. Untuk mencapai hal tersebut, salah satu metoda yang sering digunakan adalah dengan menambahkan bahan kapur tembok pada campuran tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menambahkan kapur sebesar 8% dari berat kering tanah (waktu perawatan 7 hari) akan menaikkan tegangan (kuat tekan bebas) dan kohesi tanah. Hal ini menunjukkan meningkatnya faktor keamanan lereng. Simulasi dengan menggunakan PCSTABL5M menunjukkan bahwa dengan menambahkan campuran tanah dan kapur setebal 1 meter pada bahu lereng memberikan faktor keamanan, sesuai yang diharapkan.

1 PENDAHULUAN

Di dalam rekayasa geoteknik telah lama dikenal beberapa cara bagaimana memanfaatkan tanah asli yang tidak memenuhi syarat sebagai material konstruksi, misalnya pada tanah lunak, gambut, dan sebagainya. Hasil dari upaya rekayasa tersebut didapat keadaan tanah dengan daya dukung dan kekuatan yang lebih baik serta sifat-sifat lain yang positif dilihat dari sudut pandang konstruksi.

Untuk hal tersebut di atas telah dikenal rekayasa stabilisasi tanah untuk memperbaiki sifat-sifat tanah yang kurang menguntungkan dari segi konstruksi, sehingga sifat-sifat dan karakteristik tanah tersebut menjadi memadai sebagai material konstruksi. Stabilisasi yang menggunakan kapur telah lama dikenal, misalkan pada pembuatan beberapa jalan di Roma, pembuatan konstruksi Shensi Pyramid di Tibet, serta dimanfaatkannya dinding tanah kalsium hidrat yang disisipkan pada dua buah dinding batu yang berjarak 1 meter di sepanjang Tembok Cina. Kelongsoran lereng dapat saja terjadi setiap saat. Kecepatan gerakan longsoran pada keruntuhan lereng dapat bervariasi dari beberapa milimeter perjam sampai longsoran yang sangat cepat di mana gerakan yang besar berlangsung dalam beberapa detik. Analisis stabilitas lereng perlu dilakukan pada bidang konstruksi bangunan, ekskavasi (penggalian), konstruksi fasilitas transportasi, dan pengembangan

sumber alam, sehingga diperoleh lereng yang stabil dan memenuhi fungsinya dengan faktor keamanan yang dapat diterima dalam jangka waktu tertentu.

Penelitian ini mengambil satu contoh kasus yang terjadi pada lereng yang terdapat pada sisi jalan menuju Rektorat Unand Limau Manis Padang. Pada lokasi tersebut walaupun sudah dibuat dinding penahan (retaining wall), tetapi longsor tetap terjadi pada sebagian lereng dan mendorong dinding penahannya. Hal ini mencerminkan bahwa dengan dinding penahan saja belum memberikan faktor keamanan yang disyaratkan. Sehingga perlu dilakukan kombinasi dengan tindakan stabilisasi yang lain.

Salah satu alternatif pemecahan yang baik dan pada umumnya sesuai dengan kondisi tanah di Indonesia adalah dilakukannya stabilisasi tanah secara kimia. Bahan stabilisator dalam penelitian ini dipakai kapur sebagai alternatif. Jenis bahan ini telah banyak diteliti dan digunakan di berbagai kasus geoteknik oleh beberapa peneliti dengan tujuan meningkatkan kekuatan tanah serta sifat-sifat teknisnya. Jenis kapur yang dipakai pada penelitian ini adalah kapur yang banyak terdapat di pasaran, sehingga jika diterapkan pada pelaksanaannya dapat dengan mudah diperoleh.

Tujuan analisis kestabilan lereng adalah untuk menentukan harga faktor keamanan dan permukaan runtuh yang mungkin. Sifat fisis tanah sering kali dapat diperbaiki secara ekonomis dengan menggunakan bahan campuran, misalnya kapur. Bahan campuran tersebut dapat menaikkan kekuatan lempung, membuat tanah lempung menjadi keras dan tahan air, dan menaikkan kekuatan tanah.

2. DASAR TEORI

Pada beberapa tanah yang tidak horizontal, komponen gravitasi cenderung untuk menggerakkan tanah ke bawah. Jika komponen gravitasi sedemikian besar sehingga perlawanan terhadap geseran yang dapat dikembangkan oleh tanah pada bidang longsornya terlampaui, maka akan terjadi longsor. Analisis stabilitas tanah pada permukaan yang miring ini disebut dengan analisis stabilitas lereng. Analisis ini sering dijumpai pada perancangan-perancangan bangunan seperti jalan kereta api, jalan raya, bandara,

bendungan urugan tanah, saluran, dan lain-lainnya. Umumnya, analisis stabilitas dilakukan untuk mengecek keamanan dari suatu lereng.

Dalam praktek, analisis stabilitas lereng didasarkan pada konsep keseimbangan plastis batas (limit plastic equilibrium). Adapun maksud analisis stabilitas lereng adalah untuk menentukan faktor aman dari bidang longsor yang potensial. Dalam analisis stabilitas lereng, beberapa anggapan telah dibuat, yaitu:

1. Kelongsoran lereng terjadi di sepanjang permukaan bidang longsor tertentu dan dapat dianggap sebagai masalah bidang dua dimensi.
2. Massa tanah yang longsor dianggap berupa benda yang masif.
3. Tahanan geser dari massa tanah pada setiap titik sepanjang bidang longsor tidak tergantung dari orientasi permukaan longsor, atau dengan kata lain kuat geser tanah dianggap isotropis.
4. Faktor aman didefinisikan dengan memperhatikan tegangan geser rata-rata sepanjang bidang longsor yang potensial dan kuat geser tanah rata-rata sepanjang permukaan longsor. Jadi, kuat geser tanah mungkin terlampaui di titik-titik tertentu pada bidang longornya, padahal faktor aman hasil hitungan lebih besar dari 1.

3. BEBERAPA FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KESTABILAN LERENG

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi kestabilan lereng. Faktor-faktor tersebut misalnya, kondisi tanah yang berlapis-lapis, kuat geser tanah yang anisotropis, aliran rembesan air dalam tanah, dan lain-lain. Terzaghi (1950) membagi penyebab longsor lereng terdiri dari akibat pengaruh dalam (internal effect) dan pengaruh luar (external effect). Pengaruh luar, yaitu pengaruh yang menyebabkan bertambahnya gaya geser dengan tanpa adanya perubahan kuat geser dari tanahnya. Contohnya, akibat perbuatan manusia mempertajam kemiringan tebing atau memperdalam galian tanah dan erosi sungai. Pengaruh dalam, yaitu longsor yang terjadi dengan tanpa adanya perubahan kondisi luar (akibat pengaruh air dan gempa bumi).

Pengaruh air cukup besar pada kestabilan lereng. Adanya air menimbulkan tekanan air pori yang mengurangi harga tegangan total, sehingga kekuatan geser tanahpun berkurang. Selain pengaruh air, gempa juga dapat menyebabkan perpindahan massa tanah dan

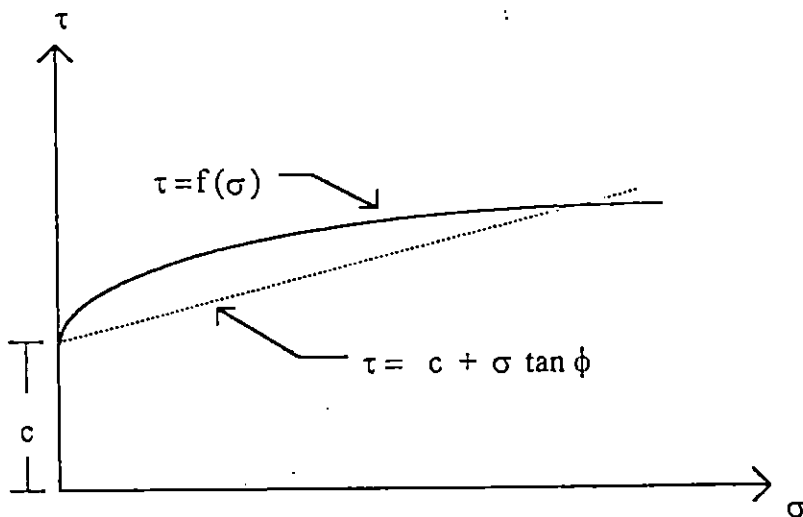
keruntuhan lereng. Gaya gempa dapat mengakibatkan kenaikan tekanan pori secara mendadak, timbulnya retak vertikal yang mengakibatkan pengurangan kekuatan geser pada tanah kohesif.

4. PARAMETER KUAT GESER TANAH

Parameter kuat geser tanah diperlukan untuk analisis-analisis daya dukung tanah, stabilitas lereng, dan tegangan dorong untuk dinding penahan tanah. Mohr (1910) memberikan teori mengenai kondisi keruntuhan suatu bahan. Teorinya adalah bahwa keruntuhan suatu bahan dapat terjadi oleh akibat adanya kombinasi keadaan kritis dari tegangan normal dan tegangan geser. Hubungan fungsi antara tegangan normal dan tegangan geser pada bidang runtuhnya, dinyatakan menurut persamaan:

$$\tau = f(\sigma) \tag{1}$$

dengan τ ialah tegangan geser pada saat terjadinya keruntuhan atau kegagalan, dan σ ialah tegangan normal pada saat kondisi tersebut. Garis keruntuhan yang didefinisikan dalam Pers. (1), adalah kurva yang ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Kriteria keruntuhan Mohr - Coulomb

Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan. Coulomb (1776) mendefinisikan fungsi $f(\sigma)$ sebagai:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \tag{2}$$

dengan:

τ = kuat geser tanah

c = kohesi tanah

ϕ = sudut geser dalam tanah

σ = tegangan normal pada bidang runtuh.

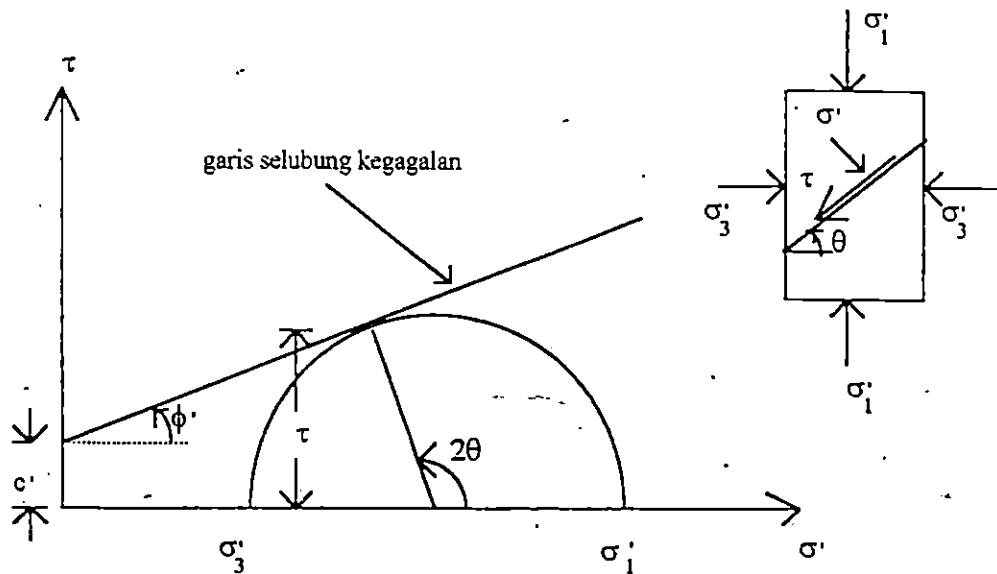
Lingkaran Mohr dalam bentuk lingkaran tegangan, dengan koordinat τ dan σ dilihat dalam Gambar 3. Persamaan tegangan geser dinyatakan oleh:

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin 2\theta \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) \cos 2\theta \quad (4)$$

dengan θ ialah sudut teoritis antara bidang horisontal dengan bidang longsor, yang besarnya:

$$\theta = 45^\circ + \left(\frac{\phi'}{2}\right) \quad (5)$$

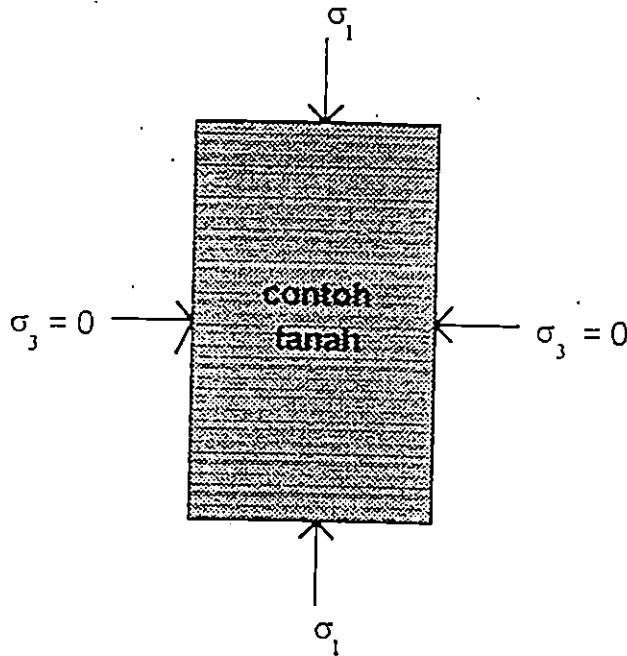


Gambar 2 Lingkaran Mohr

5. PENGUJIAN KUAT GESER TANAH DI LABORATORIUM

Dalam penelitian tugas akhir ini, kami hanya melakukan pengujian kuat tekan bebas (unconfined compression strength test) dimana pengujian ini cocok untuk tanah lempung jenuh (ϕ). Pengujian kuat tekan bebas termasuk hal yang khusus dari pengujian triaxial

unconsolidated-undrained (tanpa terkonsolidasi-tanpa drainase). Gambar skematik dari prinsip pembebanan dalam percobaan ini dapat dilihat pada Gambar 3. Kondisi pembebanannya sama dengan yang terjadi pada pengujian triaxial, hanya tegangan selnya nol (σ).



Gambar 3.. Skema pengujian kuat tekan bebas

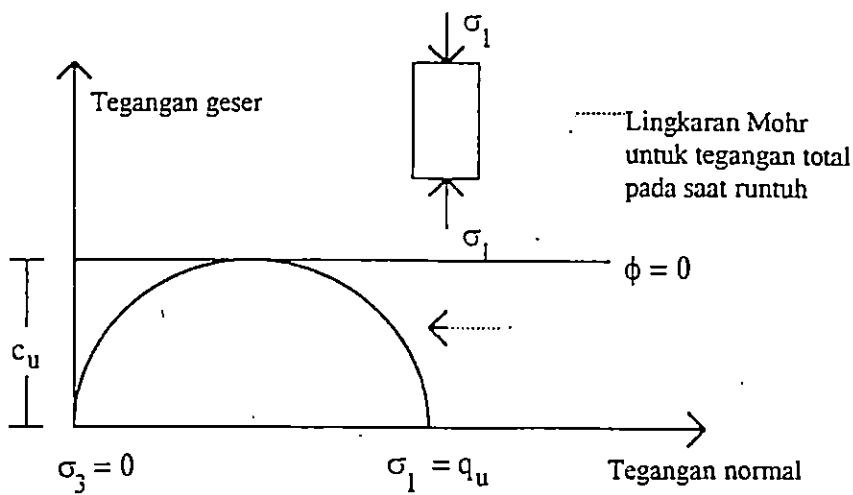
Pada saat benda uji mengalami keruntuhan maka $\sigma_3 = 0$, sehingga:

$$\sigma_1 = \sigma_3 = \Delta\sigma_f = q_u \quad (6)$$

dengan q_u adalah kuat geser tanah pada pengujian kuat tekan bebas.

$$s_u = c_u = q_u / 2 \quad (7)$$

dimana s_u dan c_u adalah kuat geser undrained dari tanahnya. Bentuk selubung kegagalan tegangan total dapat dianggap sebagai garis horisontal (ϕ) seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian kuat tekan bebas pada lempung

6. METODA PERHITUNGAN

Bilamana kestabilan suatu lereng dianalisa kemungkinan longsornya dengan menggunakan anggapan longsor sepanjang bidang longsor lingkaran, maka dasar-dasar perhitungan statika dapat digunakan untuk menentukan keadaan stabil atau tidaknya lereng tersebut. Cara perhitungan yang digunakan untuk mengindikasikan terjadinya suatu longsor adalah dengan membandingkan momen-momen yang menahan longsor dengan yang menyebabkannya. Gaya geser maksimum yang ada pada tanah tersebut digunakan dalam bentuk momen penahan. Kelongsoran mulai akan tampak bila momen-momen yang menyebabkannya melebihi momen penahannya. Faktor keamanan terhadap longsor atau pergerakan dinyatakan:

$$F_s = \frac{\text{Momen penahan longsor}}{\text{Momen penyebab longsor}} \quad (8)$$

harga $F_s = 1$ berarti lereng diambang kelongsoran.

Cara lain yang dilakukan ialah tahanan geser yang diperlukan disepanjang bidang longsor yang diandaikan dibandingkan dengan kekuatan geser yang dapat ditimbulkan oleh tanah tersebut:

$$F_s = \frac{\text{Gaya geser yang ada}}{\text{Gaya geser tanah yang dibutuhkan}} \quad (9)$$

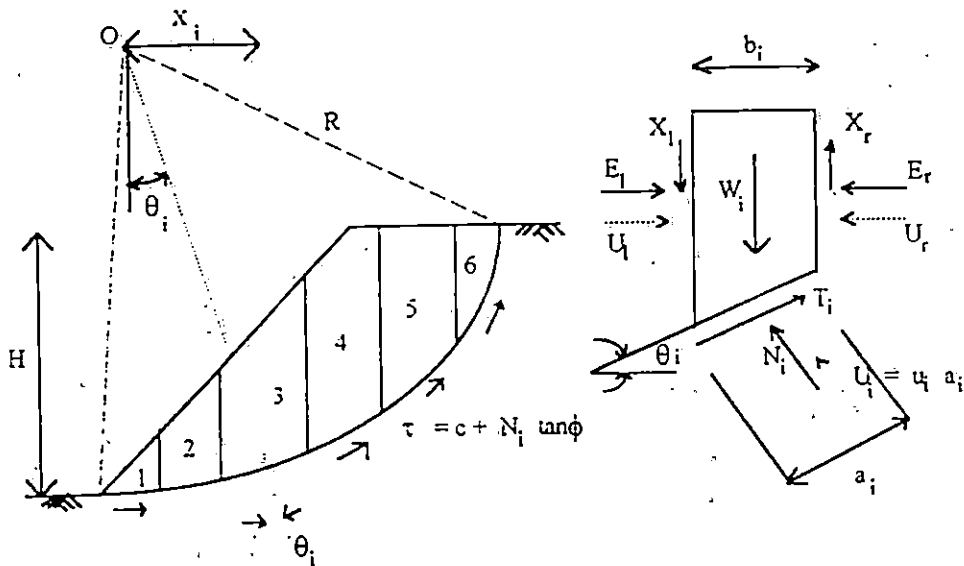
Pada umumnya, prosedur analisis stabilitas lereng dapat dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu:

a. Prosedur massa (mass procedure):

Dalam hal ini, massa tanah yang berada di atas bidang gelincir diambil sebagai suatu kesatuan. Prosedur ini berguna bila tanah yang membentuk lereng dianggap homogen, walaupun hal ini jarang dijumpai pada lereng sesungguhnya yang ada di lapangan.

b. Metoda Irisan (Method of Slices)

Pada prosedur ini, tanah yang berada di atas bidang gelincir dibagi menjadi beberapa irisan-irisan paralel tegak. Stabilitas dari tiap-tiap irisan dihitung secara terpisah. Metoda ini lebih teliti karena tanah yang tidak homogen dan tekanan air pori dapat juga kita masukkan dalam perhitungan. Metoda irisan yang umum diketahui ialah Metoda Fellenius dan Metoda Bishop



Gambar 5. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan

7. METODA IRISAN BISHOP yang DISEDERHANAKAN

Metoda irisan yang disederhanakan diberikan oleh Bishop (1955). Metoda ini menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada sisi-sisi irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal. Persamaan kuat geser dalam tinjauan tegangan efektif yang dapat dikerahkan tanah, hingga tercapainya kondisi keseimbangan batas dengan memperhatikan faktor aman, adalah:

$$\tau = \frac{c'}{F} + (\sigma - u) \frac{\tan \theta'}{F} \quad (10)$$

dimana σ adalah tegangan normal total pada bidang longsor dan u adalah tekanan air pori.

Untuk irisan ke- i , nilai $T_i = \tau a_i$, yaitu nilai gaya geser yang berkembang pada bidang longsor untuk keseimbangan batas. Karena itu:

$$T_i = \frac{c' a_i}{F_s} + (N_i - u_i a_i) \frac{\tan \phi'}{F_s} \quad (11)$$

Kondisi keseimbangan momen terhadap pusat rotasi O antara berat massa tanah yang akan longsor dengan gaya geser total pada dasar bidang longsornya dapat dinyatakan oleh (Gambar 5):

$$\sum W_i x_i = \sum T_i R \quad (12)$$

dengan x_i adalah jarak W_i ke pusat rotasi O. Dari Persamaan (11) dan (12), dapat diperoleh:

$$F = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} [c' a_i + (N_i - u_i a_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \quad (13)$$

Dari kondisi keseimbangan vertikal, jika $X_1 = X_i$ dan $X_r = X_{i+1}$:

$$\begin{aligned} N_i \cos \theta_i + T_i \sin \theta_i &= W_i + X_i - X_{i+1} \\ N_i &= \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - T_i \sin \theta_i}{\cos \theta_i} \end{aligned} \quad (14)$$

Dengan $N_i' = N_i - u_i a_i$, substitusi Persamaan (14) ke Persamaan (12), diperoleh:

$$F_s = \frac{R \sum_{i=1}^{i=n} (c' a_i + \tan \phi' \frac{W_i + X_i - X_{i+1} - u_i a_i \cos \theta_i - c' a_i \sin \theta_i}{F_s})}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i x_i} \quad (15)$$

Untuk penyederhanaan dianggap $X_i - X_{i+1} = 0$ dan dengan mengambil:

$$x_i = R \sin \theta_i \quad (16)$$

$$b_i = a_i \cos \theta_i \quad (17)$$

Substitusi Persamaan (16) dan (17) ke Persamaan (15), diperoleh persamaan faktor aman:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi' \left(\frac{1}{\cos \theta_i (1 + \tan \theta_i \tan \phi' / F_s)} \right)]}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i} \quad (18)$$

dimana:

F_s = faktor aman

c' = kohesi tanah efektif

ϕ' = sudut geser dalam tanah efektif

b_i = lebar irisan ke-i

W_i = berat irisan tanah ke-i

θ_i = sudut yang didefinisikan dalam Gambar 5.

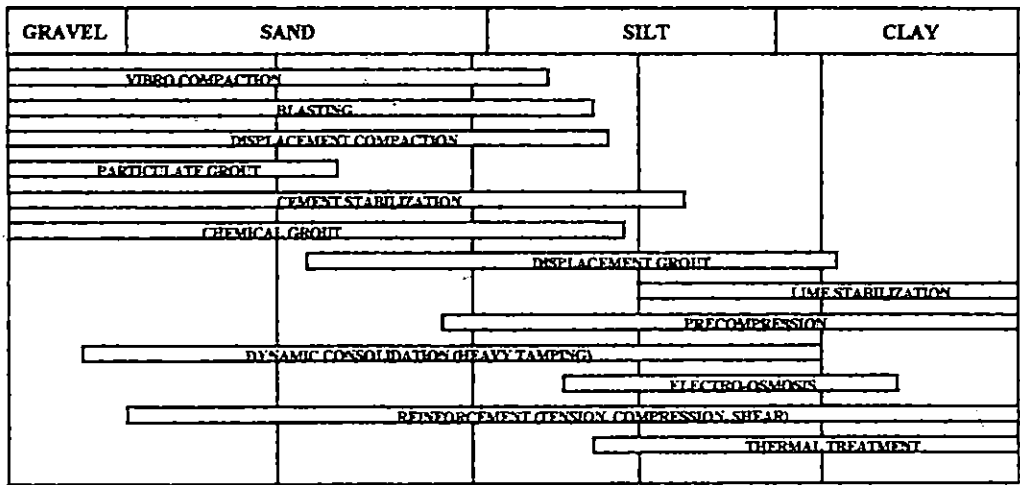
u_i = tekanan air pori pada irisan ke-i

Persamaan faktor aman Bishop ini lebih sulit pemakaiannya dibandingkan dengan metoda Fellinius. Lagi pula membutuhkan cara coba-coba (trial and error), karena nilai faktor aman F_s nampak dikedua sisi persamaannya. Akan tetapi, cara ini telah terbukti memberikan nilai faktor aman yang mendekati nilai faktor aman dari hitungannya yang dilakukan dengan cara yang lebih teliti (Whitman and Baily, 1967). Lokasi lingkaran longsor kritis dari metoda Bishop (1955), biasanya mendekati dengan hasil pengamatan di lapangan. Karena itu, walaupun metoda Fellinius lebih mudah, metoda Bishop (1955) lebih disukai karena menghasilkan penyelesaian yang lebih teliti.

8. STABILISASI DENGAN KAPUR

Menurut Mitchell (1976) beberapa metoda stabilisasi yang dapat dilakukan berdasarkan jenis serta komposisi tanah yang didapat (seperti pada Tabel 1), maka tanah lempung atau lempung kelanauan sangat cocok jika distabilisasi dengan kapur. Sedangkan pada Tabel 2 suatu ikhtisar yang mempunyai tujuan yang sama (Holtz, Robert, D et al 1981)

memberikan rekomendasi yang sama (lempung atau lempung kelanauan) sangat efektif pula jika distabilisasi dengan kapur.



Tabel 1. Ikhtisar metode stabilisasi (Mitchell, 1976)

DESIGNATION	FINE CLAYS	COARSE CLAYS	FINE SILT	COARSE SILT	FINE SAND	COARSE SAND
SOIL PARTICLE SIZE (mm)	<0.0005	0.002-0.01	0.06-0.4			
SOIL VOLUME STABILITY	Very Poor	Fair	Fair	Good	Very Good	Very Good
TYPE OF STABILITATION APPLICABLE:						
- LIME	#####					
- CEMENT	////////////////////////////////////					
- BITUMENT						
- POLYMERIC ORGANIC	#####					
- MECHANICAL	////////////////////////////////////					
- THERMAL	#####					
	##### Range Of Max. Efficiency			//////////////////////////////////// Effective, quality control may difficult		

Tabel2. Aplikasi metode stabilisasi (Holtz, Robert, D et al)

Pengaruh kapur akan tidak terlalu besar terhadap tanah yang mengandung zat-zat kimia tinggi dan juga pada tanah yang sedikit atau tidak sama sekali kandungan lempung di dalamnya.

9. LEMPUNG

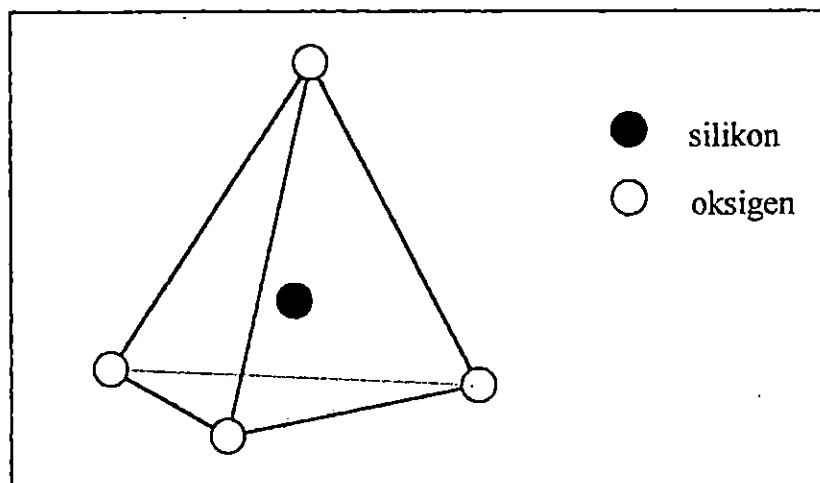
Apabila mempelajari mengenai lempung maka perlu dibedakan penggunaan istilah, yaitu:

1. **Penggunaan istilah ukuran lempung**, dimana ukuran lempung lebih dihubungkan dengan komposisi dari ukuran partikel, yang biasanya berukuran $< 2 \mu\text{m}$.
2. **Penggunaan istilah mineral lempung**, dimana lebih dihubungkan dengan komposisi ukuran mineral. Ukuran mineral ini lebih spesifik dalam arti adakalanya ukuran mineral ini $< 2 \mu\text{m}$ dan dapat pula $> 2 \mu\text{m}$, meskipun pada umumnya $< 2 \mu\text{m}$.

Mineral lempung adalah kristal yang sangat kecil yang terbentuk dari proses wheatering/pelapukan dari batuan. Dua jenis kristal fundamental dari lempung ialah :

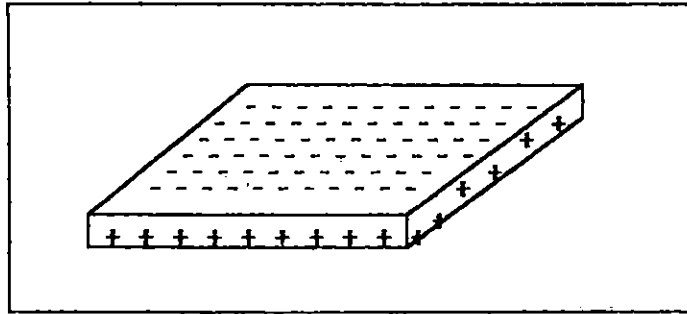
1. Silika tetrahedra
2. Aluminium oktahedra

Silika Tetrahedra



Gambar 6. Mineral silika tetrahedra (Lambe, 1953)

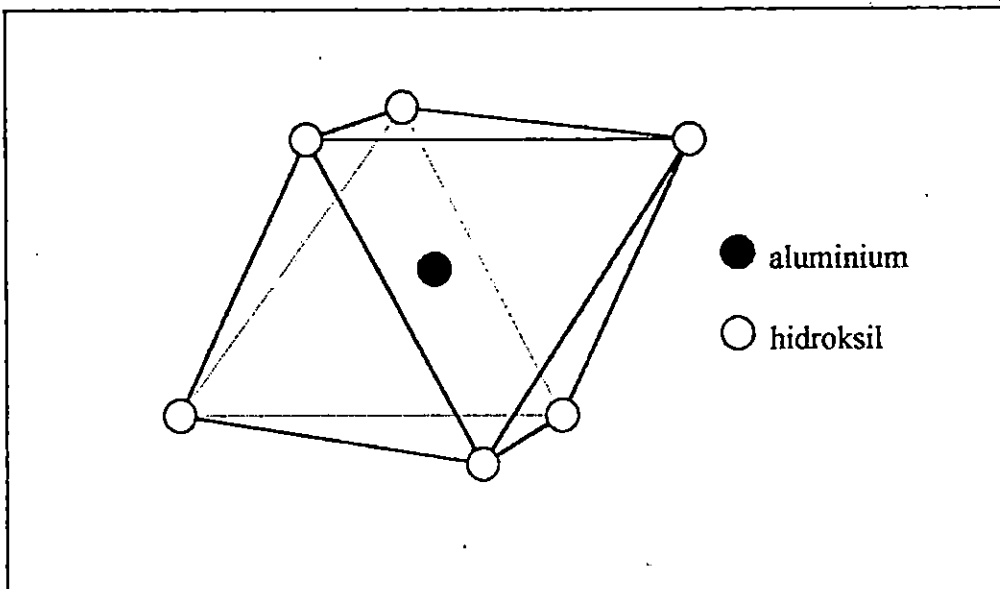
Rangkaian kristal Silika Tetrahedra terdiri dari 1Si^{++++} dan 4O^- dimana terjadi kelebihan muatan negatif (-) yang dapat dikurangi dengan cara pemakaian bersama atom oksigen oleh kristal tetrahedra membentuk struktur lempengan. Permukaan butiran lempung akan bermuatan negatif seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Permukaan butiran lempung

Makin netral kristalnya, akan makin sedikit muatan negatifnya, akan makin sulit pula bereaksi dengan muatan positif (+) atau kation.

Aluminium Oktahedra



Gambar 8. Mineral aluminium oktahedra (Lambe, 1953)

Rangkaian kristal aluminium oktahedra terdiri dari 1Al^{+++} dan 6OH^- .

Al^{+++} pada lempeng oktahedra dapat digantikan oleh kation lain yang ukurannya hampir sama yang dinamakan dengan peristiwa substitusi isomorf. Contohnya, apabila Al^{+++} digantikan dengan Mg^{++} maka dinamakan dengan Brucite. Mineral lempung terdiri atas 2 jenis tumpukan lempeng kristal di atas (silika tetrahedra dan aluminium oktahedra). Penumpukan lempeng-lempeng kristal tersebut bervariasi.

Diantara bermacam variasi yang umum diketahui antara lain:

a. *Kaolinite* : $(OH)_8Al_4Si_4O_{10}$

b. *Halloysite* : $(OH)_8Al_4Si_4O_{10} \cdot 4H_2O$

c. *Montmorillonite* : $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$

d. *Illite* : Hampir sama dengan montmorillonite, akan tetapi diantara lapisannya terdapat/diikat oleh ikatan lemah ion-ion kalsium yang terdapat diantara lembaran-lembarannya. Ikatan-ikatan dengan ion kalium (K^+) lebih lemah dari pada ikatan hidrogen yang mengikat satuan kristal kaolinite, tapi sangat lebih kuat dari pada ikatan ionik yang membentuk kristal montmorillonite.

Sifat-sifat fisik dari tanah lempung dapat kita lihat pada uraian berikut ini:

a. Berat Jenis (G_s)

Mineral	Berat Jenis
Kaolinite	2,60
Illite	2,80
Montmorillonite	2,65 - 2,80
Halloysite	2,00 - 2,55
Chlorite	2,60 - 2,90

Tabel 3. Berat jenis mineral-mineral penting (Braja M Das, 1941)

b. Batas Atterberg untuk mineral lempung:

Batasan mengenai indeks plastis, sifat, macam tanah, dan kohesinya diberikan oleh Atterberg terdapat dalam Tabel (4)

IP	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Nonplastis	Pasir	Nonkohesif
<7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif
7 - 17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	sebagian
>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Tabel 4. Nilai indeks plastisitas dan macam tanah (Atterberg).

Menurut Mitchell (1976) angka-angka Atterberg untuk bermacam-macam mineral lempung diberikan dalam Tabel 3.5.

Mineral	Batas Cair (LL)	Batas Plastis (PL)
Montmorillonite	100 - 900	50 - 100
Illite	60 - 120	35 - 60
Kaolinite	30 - 110	25 - 40
Halloysite terhidrasi	50 - 70	47 - 60
Halloysite	35 - 55	30 - 45
Chlorite	44 - 47	36 - 40

Tabel 5. Harga-harga batas Atterberg untuk mineral lempung (Mitchell, 1976).

c. Permeabilitas

Permeabilitas didefinisikan sebagai sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran rembesan dari cairan yang berupa air atau minyak mengalir lewat rongga porinya. Pori-pori tanah saling berhubungan antara satu dengan yang lainnya. Sehingga air

dapat mengalir dari titik yang mempunyai tinggi energi lebih tinggi, ke titik yang mempunyai tinggi energi lebih rendah.

Besarnya permeabilitas tergantung pada jenis tanah, ukuran butiran, bentuk butiran, rapat massa, serta bentuk geometri rongga porinya. Untuk tanah lempung besarnya permeabilitas (nilai koefisien permeabilitas) berkisar antara 10^{-6} - 10^{-9} cm/dt (Braja M Das, 1941).

d. Aktivitas (Activity)

Berdasarkan pengujian laboratorium pada beberapa tanah (Skempton, 1953), diperoleh bahwa indeks plastisitas berbanding langsung dengan persen fraksi ukuran lempungnya (yaitu persen dari berat yang lebih kecil dari ukuran 0,002 mm). Dari hasil pengamatan ini, Skempton (1953) mendefinisikan parameter A yang disebut aktivitas sebagai:

- $A = \frac{PI}{C}$

dengan C adalah persentase berat dari fraksi ukuran lempung. Aktivitas digunakan sebagai indeks untuk mengidentifikasi kemampuan mengembang dari suatu tanah lempung. Harga dari aktivitas untuk berbagai mineral lempung diberikan dalam Tabel 6.

Mineral	Aktivitas
Smectities	1 - 7
Illite	0,5 - 1
Koalinite	0,5
Halloysite (2H ₂ O)	0,5
Halloysite (4H ₂ O)	0,1
Attapulgite	0,5 - 1,2
Allophane	0,5 - 1,2

Tabel 6. Aktivitas mineral (Mitchell, 1976)

10. STABILISASI KAPUR

Stabilisasi dengan kapur didefinisikan sebagai mencampur lime (kapur) dengan tanah (yang sudah dihancurkan). Kapur terdiri dari dua macam, yaitu:

1. Kalsium oksida (CaO) yang disebut dengan quick lime (frebble lime)
2. Kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang disebut dengan hydrated lime (slaked lime)

Reaksi antara tanah dengan kapur terdiri dari dua termen, yaitu:

1. Termen pendek:

Pada termen ini terjadi proses hidrasi (untuk quick lime) dan flokulasi (pertukaran kation).

2. Termen panjang:

Di sini terjadi proses sementasi dan karbonasi

Hidrasi (Hydration)

Proses hidrasi adalah suatu proses dimana quick lime segera bereaksi dengan air dalam tanah. Efek pengeringan ini sangat berguna sekali pada tanah lempung basah.

Flokulasi (Flocculation)

Bila kapur dicampurkan dengan lempung, sodium (Na^+) dan beberapa kation pada permukaan mineral lempung akan digantikan oleh Ca^{++} dari kapur. Pertukaran kation ini menyebabkan efek yang kompleks dimana komponen struktur dari mineral lempung menjadi saling berhubungan. Kapur menyebabkan terjadinya flokulasi. Selanjutnya indeks plastisitas tanah lempung akan menjadi berkurang.

Sementasi (Cementation)

Tahap kedua dari reaksi lempung-kapur adalah membentuk sementasi (kalsium silikat). Cementation adalah penyumbang utama terhadap kenaikan kekuatan pada stabilisasi tanah. Sementasi dibatasi oleh jumlah silika yang tersedia sehingga jumlah kapur tidak bisa melebihi jumlah silika.

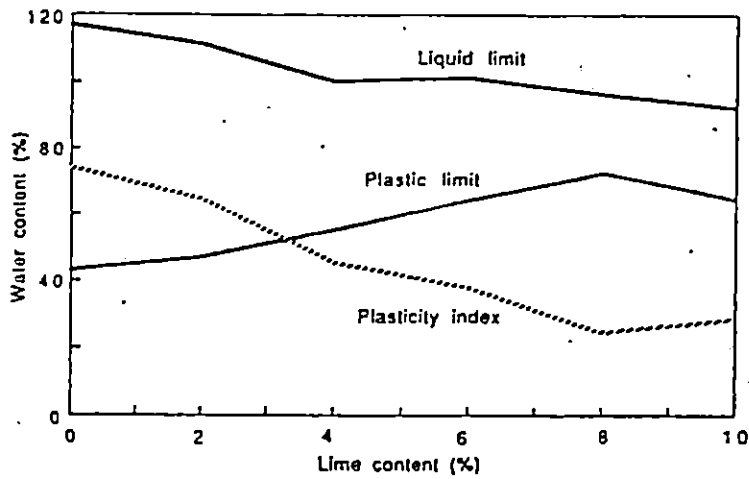
Karbonasi (Carbonation)

Adalah reaksi antara kapur dengan CO_2 di udara terbuka atau pori tanah yang membentuk cementing agent yang relatif lemah

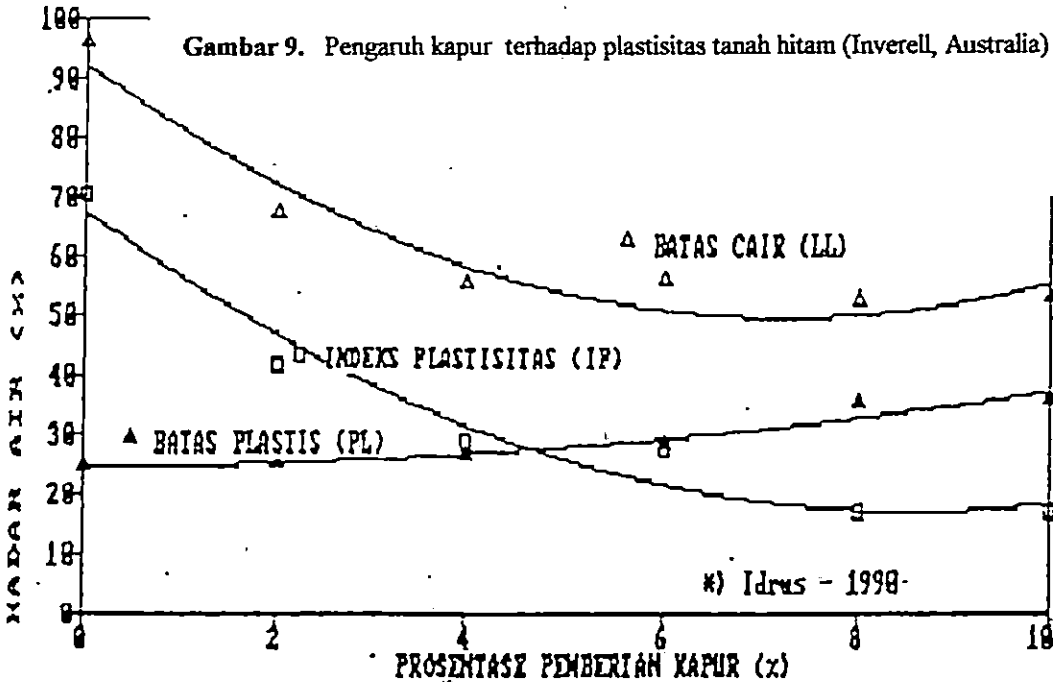
Manfaat utama dari stabilisasi tanah lempung dengan kapur ini ialah memperbaiki tanah (improved workability), menaikkan tegangan, dan menstabilkan volume (volume stability).

Beberapa hal yang menyangkut improved workability diuraikan di bawah ini:

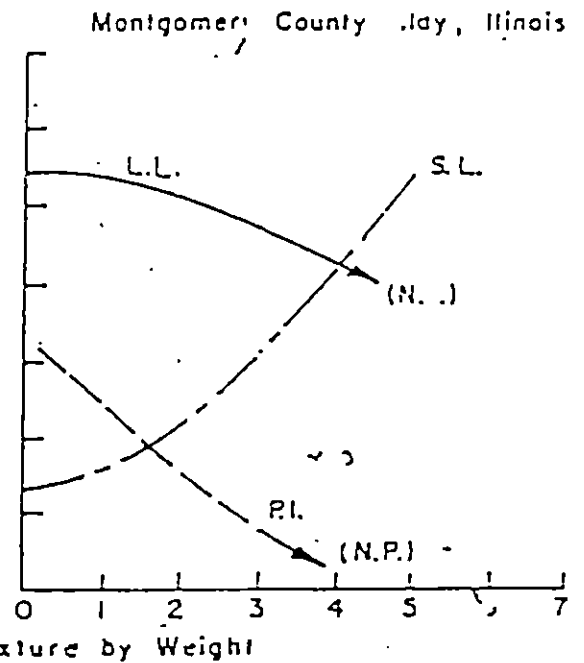
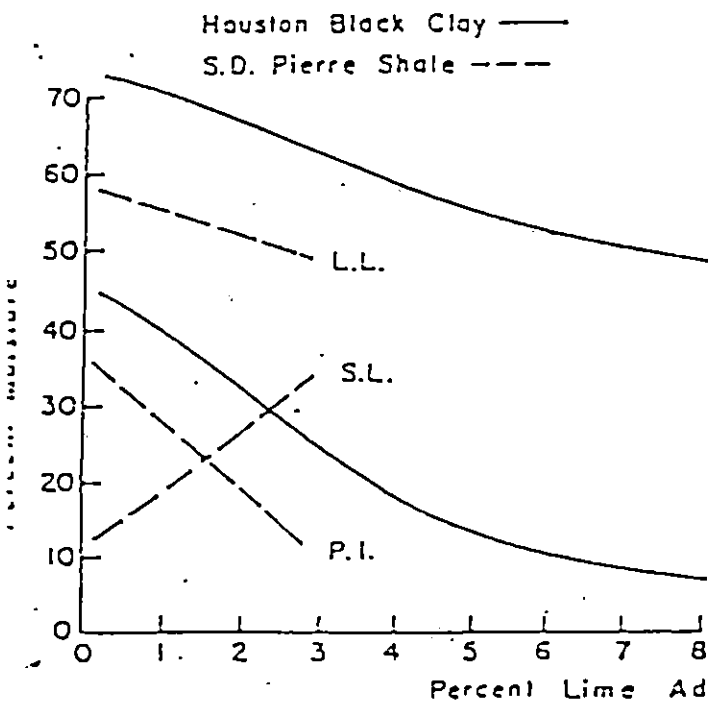
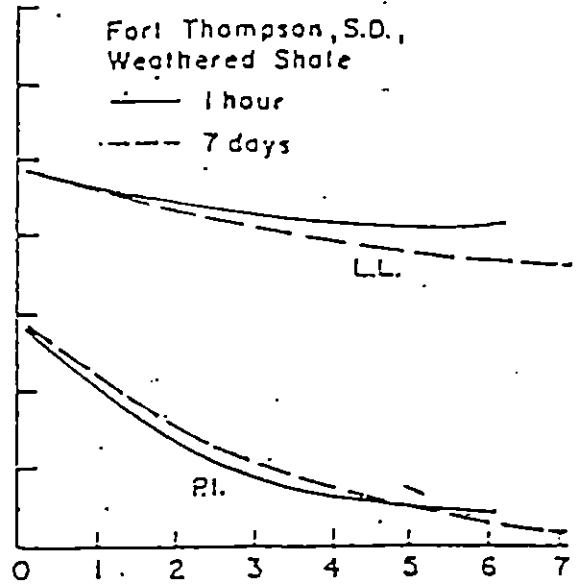
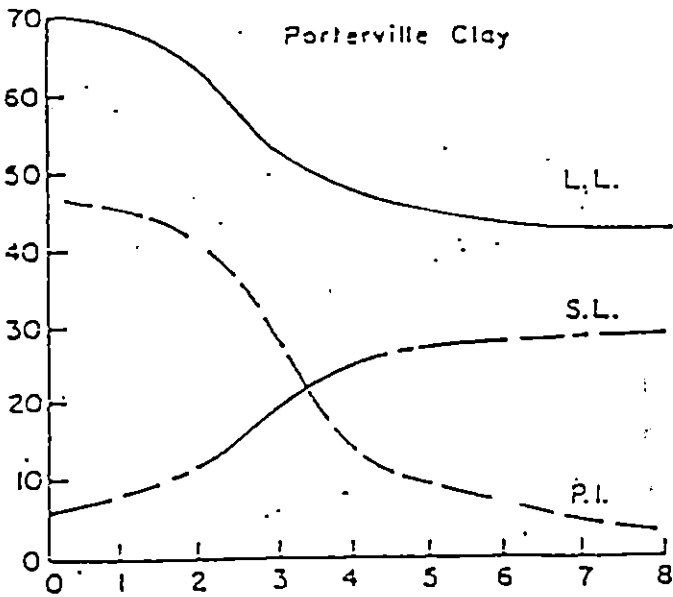
- Karena flokulasi, lempung menjadi lebih friable (mudah diolah dan dicampur).
- Akibat kenaikan batas plastis maka indeks plastisitas akan berkurang (Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11)



Gambar 9. Pengaruh kapur terhadap plastisitas tanah hitam (Inverell, Australia)

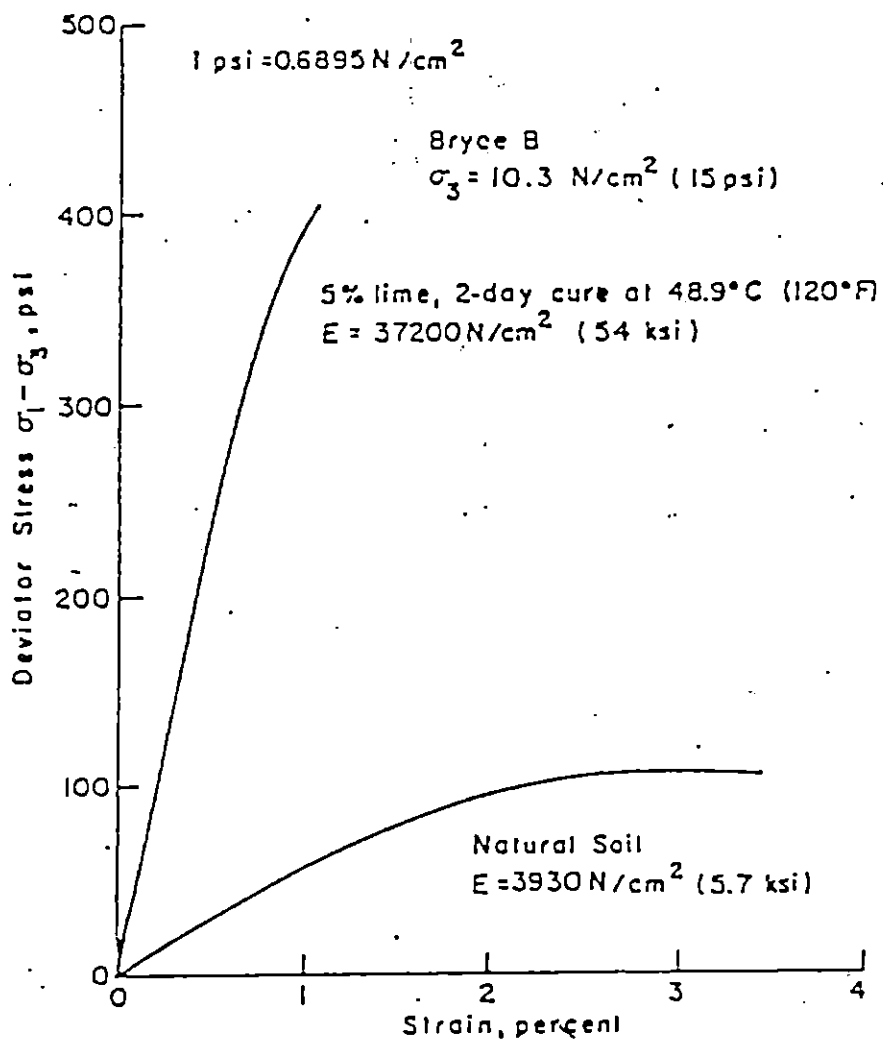


Gambar 10. Pengaruh penambahan kapur pada hasil pengujian batas-batas Atterberg (Idrus, 1991)



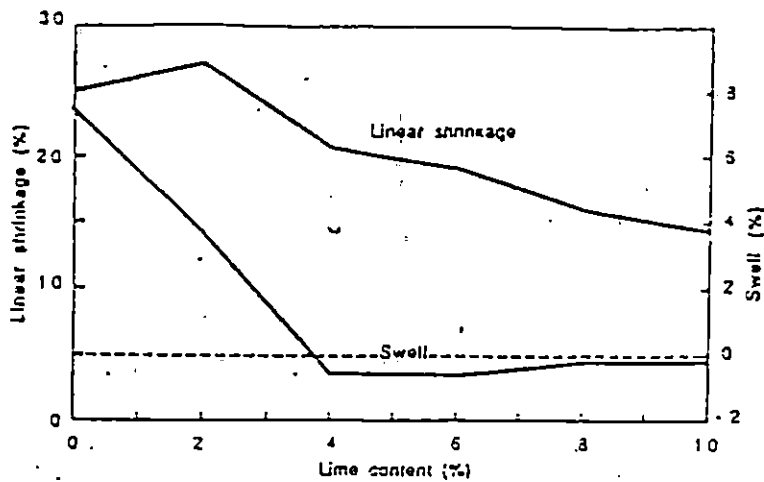
Gambar 11. Pengaruh kapur terhadap indeks plastisitas (Idrus, 1991)

- Pencampuran kapur juga dapat segera menaikkan kekuatan lempung (Gambar 12). Hal ini menguntungkan bagi trafficability tanah lunak.



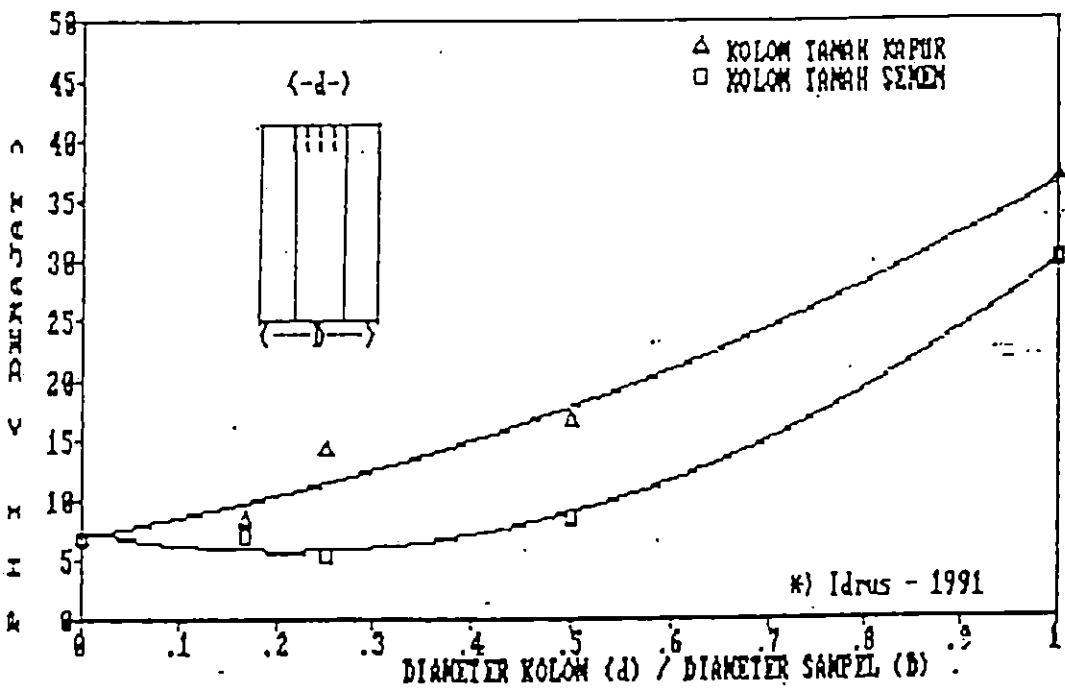
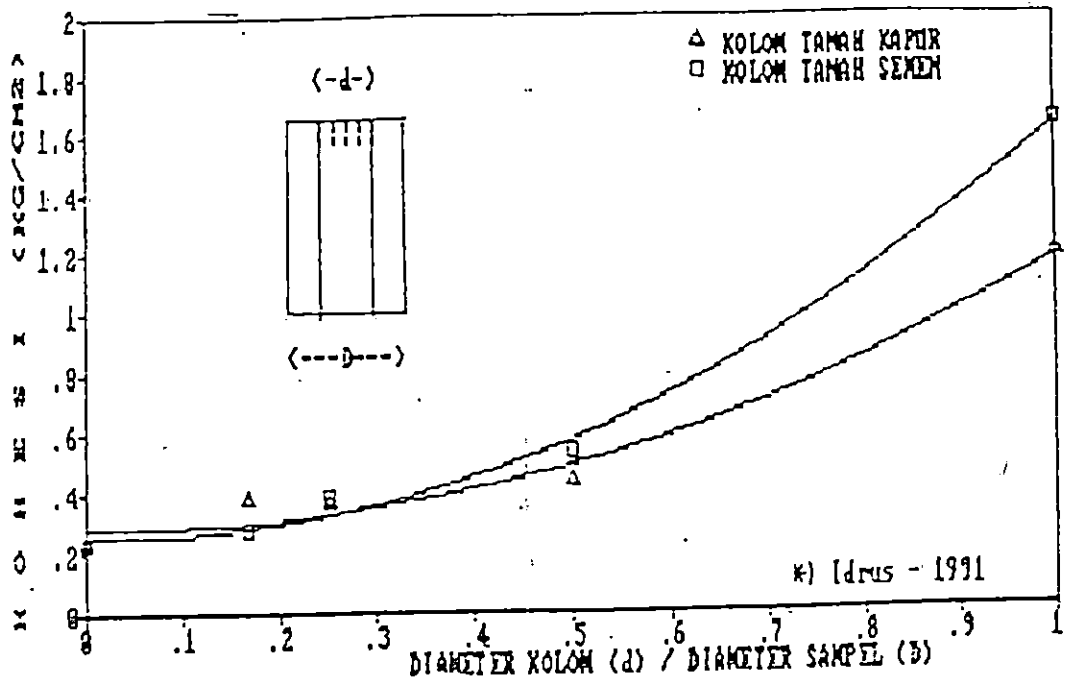
Gambar 12. Kenaikkan tegangan-regangan akibat pencampuran kapur (Masyur Irsyam, Diktat FTB)

- Kapur juga membuat tanah lempung menjadi lebih keras dan tahan air sehingga dapat menurunkan potensi pengembangan dan tekanan pengembangan pada tanah lempung (Gambar 13)



Gambar 13. Pengaruh kapur terhadap tekanan pengembangan (Inverell, Australia)

- Pencampuran kapur dengan lempung akan membuat kohesi dan sudut geser dalam akan meningkat (Gambar 14). Kenaikan kohesi disebabkan terjadinya ikatan antar partikel yang lebih kuat (reaksi sementasi) akibat penarikan unsur kalsium pada permukaan partikel. Sedangkan meningkatnya sudut geser dalam lebih diakibatkan oleh peristiwa penggumpalan (flocculation) antar partikel yang mengakibatkan terbentuknya partikel yang lebih besar.



Gambar 14. Pengaruh kapur terhadap kenaikan kohesi dan sudut geser (Idrus, 1991)

11. UJI PROPERTIES

Pada bagian ini akan dilakukan pengujian laboratorium mekanika tanah tentang tanah asli untuk mengetahui sifat-sifat tanah asli tersebut. Hasil pengujian laboratorium tersebut dapat menentukan jenis stabilisator yang tepat untuk tanah yang dimaksud. Tes labor yang dilakukan di sini adalah untuk mengetahui:

1. kadar air
2. berat volume
3. berat jenis
4. batas cair
5. batas plastis
6. indeks plastisitas
7. kadar lempung

Pengambilan contoh tanah, baik tanah terganggu maupun tanah tidak terganggu dilakukan pada tiga titik (dalam satu lereng). Sifat fisik tanah lereng pada jalan Limau Manis Unand dapat dilihat pada Tabel (7)

No.	Uji Properties	Titik 1	Titik 2	Titik 3
1	Kadar air (ω)	50.39 %	59.5 %	49.42 %
2	Berat volume (γ)	1.55 gr/cm ³	1.46 gr/cm ³	1.49 gr/cm ³
3	Berat volume jenuh (γ_{sat})	1.59 gr/cm ³	1.56 gr/cm ³	1.60 gr/cm ³
4	Berat jenis (Gs)	2.54	2.55	2.5
5	Batas cair (LL)	51.70 %	53.80 %	49.70 %
6	Batas plastis (PL)	43.57 %	44.29 %	41.62 %
7	Indek plastisitas (PI)	8.13 %	9.51 %	8.08 %
8	Kadar lempung	77.28 %	85.82 %	81.06 %

Tabel 7. Hasil uji propertis tanah lereng pada jalan Unand Limau Manis

Nilai permeabilitas dari tanah lereng tersebut adalah $8,001 \times 10^{-7}$ cm/dt dan nilai-nilai aktivitasnya dapat dilihat pada Tabel 8, sehingga dari hasil-hasil uji properties tersebut dapat disimpulkan bahwa tanah lereng pada jalan Limau Manis Unand adalah **Lempung**.

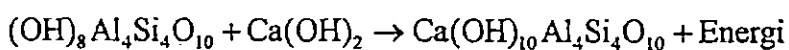
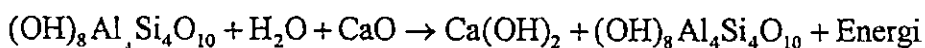
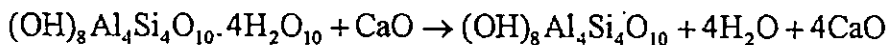
Lokasi	Aktivitas
Titik 1	$8,13\% / 77,28\% = 0,1$
Titik 2	$9,51\% / 85,82\% = 0,1$
Titik 3	$8,08\% / 81,06\% = 0,1$

Tabel 8. Nilai aktivitas tanah lereng Limau Manis Unand

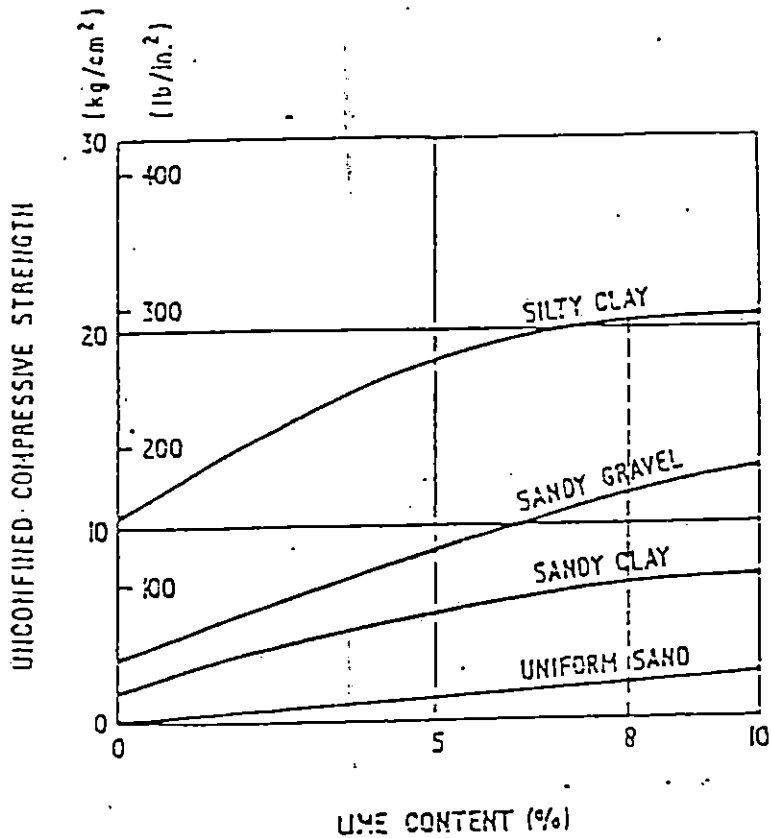
Kalau dilihat dari nilai-nilai Atterberg dimana batas cair berada antara nilai 35% dan 50% dan batas plastis antara 30% sampai 45% serta nilai-nilai berat jenisnya berkisar antara 2 sampai 2,55 dan nilai-nilai aktivitasnya sebesar 0,1 maka lempung diatas dapat dikategorikan ke dalam **Lempung Halloysite**

12. PELAKSANAAN CAMPURAN

Proses yang terjadi dalam pencampuran lempung halloysite dengan lempung dapat dijabarkan di bawah ini:



Dari penjabaran reaksi di atas, diperoleh hasil akhir berupa campuran yang membentuk sementasi (kalsium silikat). Pengujian contoh tanah lempung dengan kapur hanya dilakukan pada test Unconfined Compression Strength. Dari sekian banyak peneliti, Metcalf (1959) telah membuktikan bahwa kuat tekan bebas akan naik dengan bertambahnya prosentase pemakaian kapur (Gambar 15.).



Gambar 15. Pengaruh dari kapur terhadap kekuatan dari berbagai jenis tanah setelah perawatan 7 hari (Metcalf, 1959)

Dari gambar di atas maka kami menetapkan pengambilan kapur sebesar 8% dengan perawatan contoh selama 7 hari. Prosentase pemakaian kapur yang dipakai adalah sebesar 8% dari berat keringnya. Oleh sebab itu sejumlah tanah yang akan dicampur dengan kapur terlebih dahulu diperiksa kadar airnya. Kemudian dengan persamaan di bawah ini dapat dihitung berat isi kering dari tanah yang akan dicampur.

$$W_k = \frac{W_t}{1 + W_a}$$

dimana:

W_k = berat kering (gram)

W_t = berat tanah asli (gram)

W_a = kadar air tanah asli (%)

Kemudian berat kapur yang akan dicampurkan adalah sebesar prosentase yang akan dicampur terhadap berat kering tersebut dan dilakukan perawatan contoh selama 7 hari.

Setelah melalui perawatan contoh, maka pengujian kuat tekan bebas (unconfined compression strength test) dapat dilakukan.

Selain dilakukan percobaan kuat tekan bebas terhadap campuran tanah dan kapur, juga dilakukan percobaan permeabilitas terhadap campuran tersebut. Dari hasil percobaan permeabilitas (campuran tanah dengan kapur) didapatkan nilai permeabilitasnya sebesar $9,566 \times 10^{-6}$ cm/dt. Nilai permeabilitas campuran tanah dengan kapur lebih besar dibandingkan nilai permeabilitas tanah asli ($8,001 \times 10^{-7}$). Hal ini disebabkan karena adanya proses flokulasi apabila tanah dicampur dengan kapur. Akibat terjadinya flokulasi maka ruang pori akan menjadi lebih besar (Idrus, 1991). Braja M Das (1941) telah meneliti bahwa untuk tanah lempung yang mempunyai struktur terflokulasi akan mempunyai angka pori yang sangat besar. Sehingga tanah yang mempunyai struktur terflokulasi akan mempunyai angka permeabilitas yang tinggi. Kadar air dan berat volume campuran (tanah + kapur) dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10.

	Kadar Air
Titik 1	41.29%
Titik 2	45.61%
Titik 3	39.65%

Tabel 9. Kadar air campuran

	Berat Volume Campuran
Titik 1	1.46
Titik 2	1.62
Titik 3	1.51

Tabel 10. Berat volume campuran

13. UNCONFINED COMPRESSION STRENGTH TEST

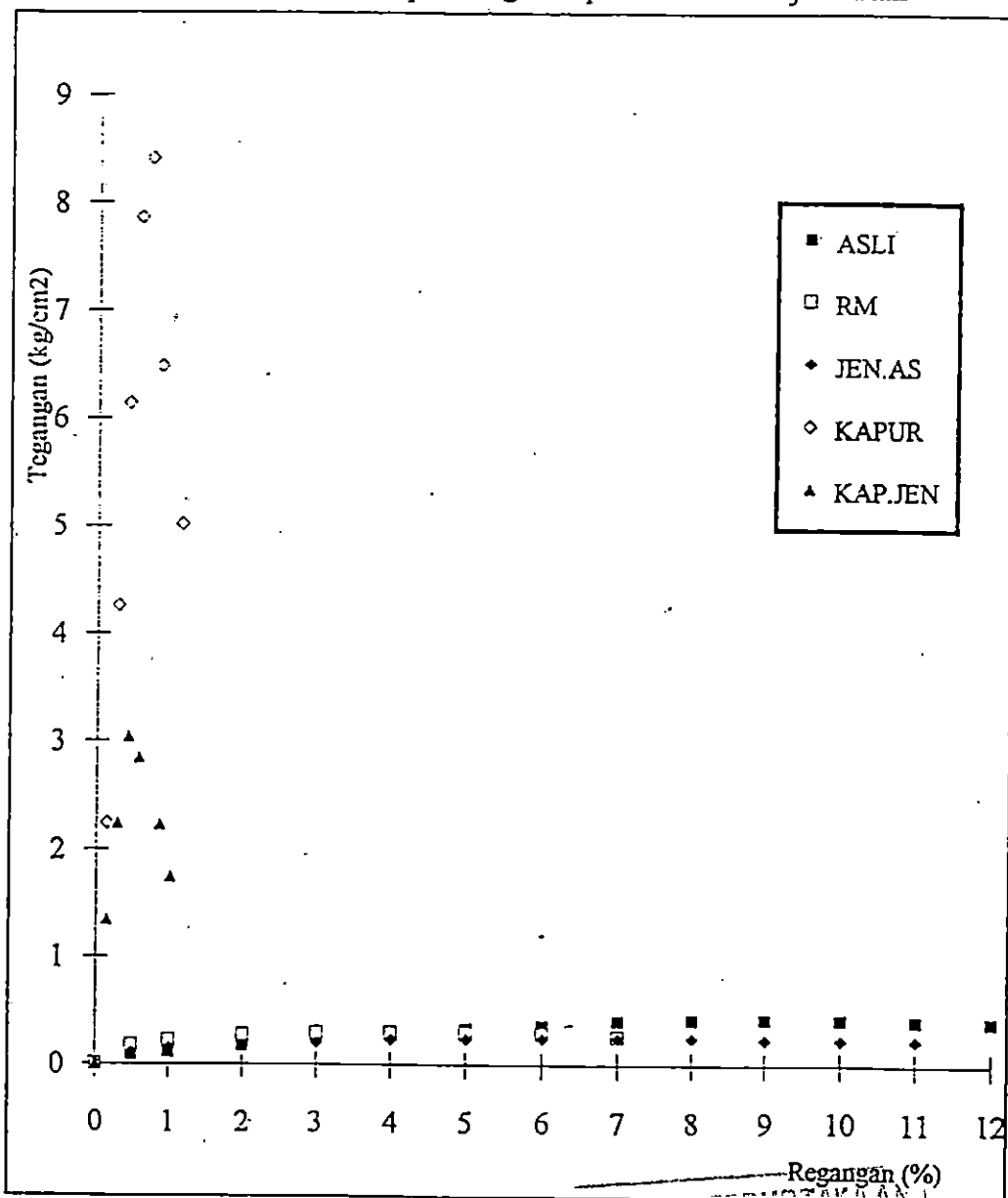
Percobaan Unconfined Compression Strength dilakukan pada tanah asli, remolded, tanah asli yang telah dijenuhkan, dan tanah yang dicampur dengan kapur baik dalam kondisi

biasa maupun yang telah dijenuhkan. Hasil pengujian dari berbagai kondisi di atas dan nilai kohesinya dapat dilihat pada gambar-gambar dan tabel di bawah ini.

Gambar 16 memperlihatkan hasil tes kuat tekan bebas pada tipe tanah 3 dengan penambahan kapur sebanyak 8% dari berat keringnya dengan perawatan contoh selama 7 hari.

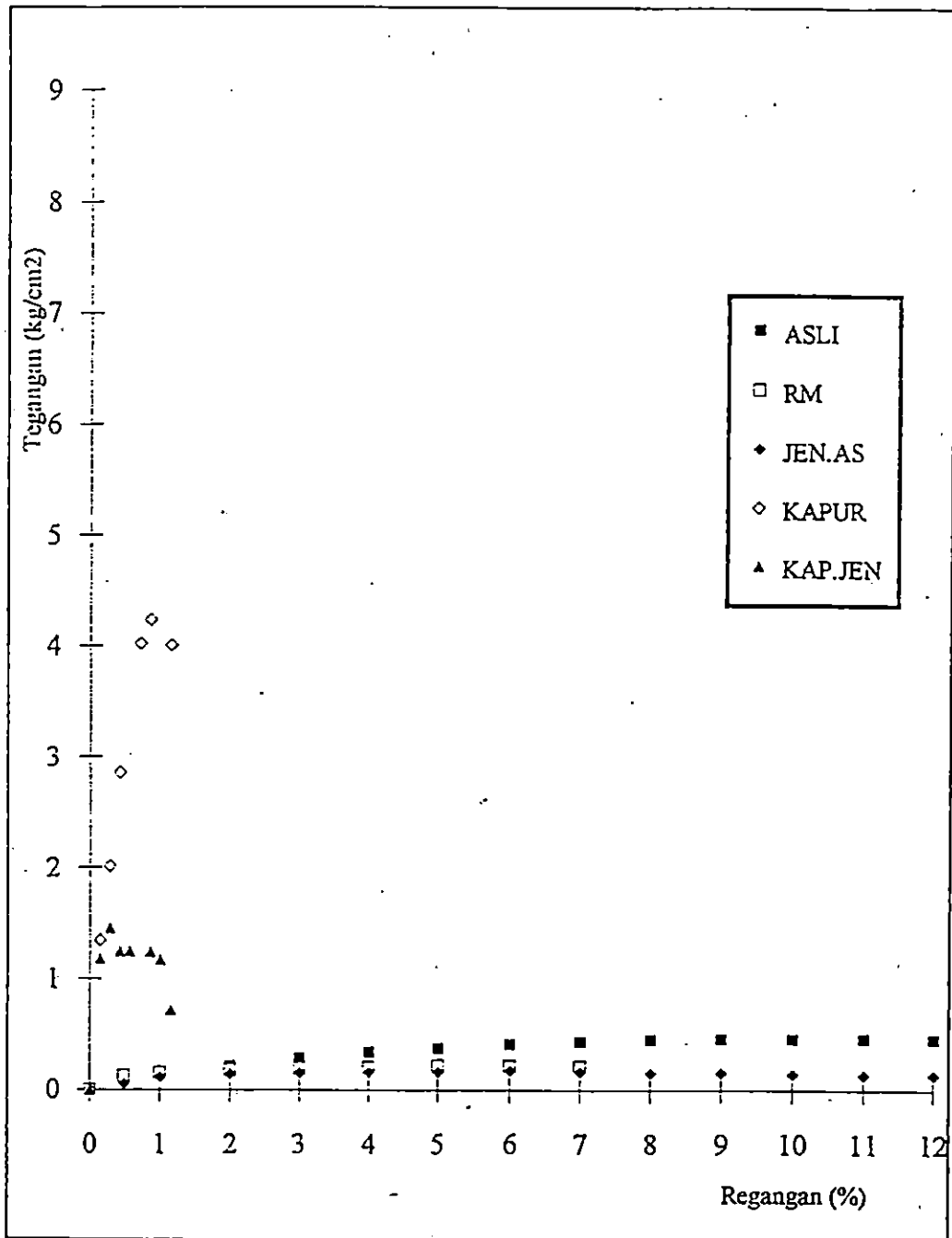
Catatan:

- Asli : tanah asli (tidak terganggu/tanpa kapur)
- RM : tanah terganggu (tanpa kapur)
- ◆ Jen. As : tanah asli yang dijenuhkan (tanpa kapur)
- ◇ Kapur : tanah yang telah dicampur dengan kapur
- ◆ Kap. Jen : Tanah yang telah dicampur dengan kapur kemudian dijenuhkan



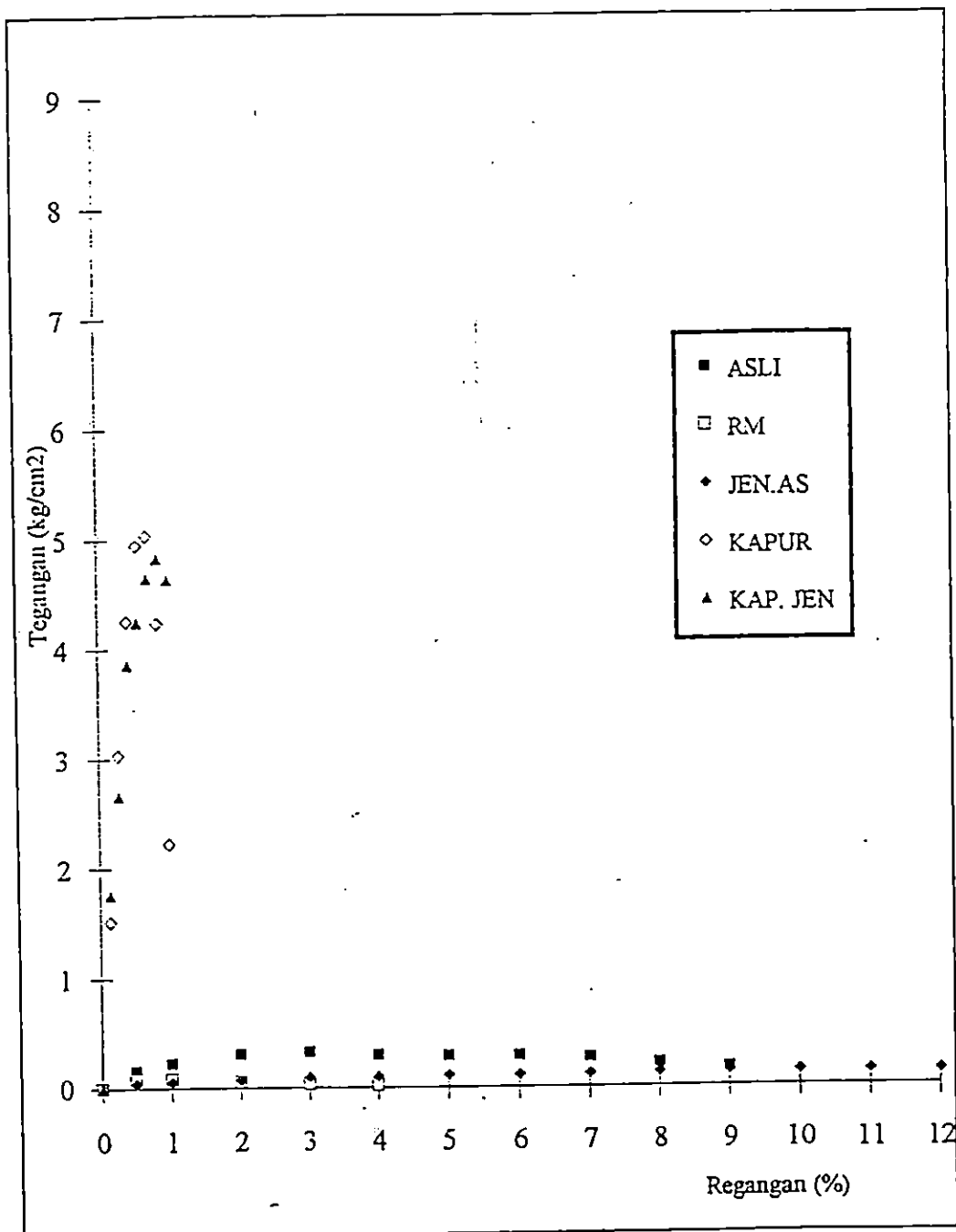
Gambar 16 Hasil tes kuat tekan bebas pada tipe tanah 3 (tipe 1)

Gambar 17 memperlihatkan hasil tes kuat tekan bebas pada tipe tanah 2 dengan penambahan kapur sebanyak 8% dari berat keringnya dengan perawatan contoh selama 7 hari.



Gambar 17-- Hasil tes kuat tekan bebas pada tipe tanah 2 (titik 2)

Gambar 18 memperlihatkan hasil tes kuat tekan bebas pada tipe tanah 1 dengan penambahan kapur sebanyak 8% dari berat keringnya dengan perawatan contoh selama 7 hari.



Gambar 18. Hasil tes kuat tekan bebas pada tipe tanah 1 (titik 3)

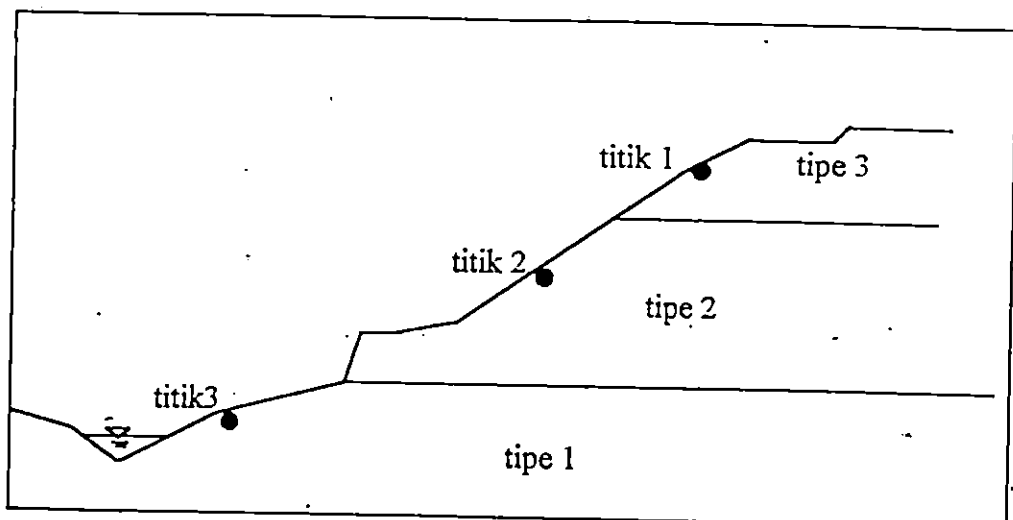
Kondisi	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Ket.
Tanah asli	0.213	0.232	0.162	kg/cm ²
Tanah remoulded	0.15	0.109	0.042	"
Tanah asli (jenuh)	0.126	0.088	0.068	"
Tanah + kapur	4.206	2.118	2.518	"
Tanah + kapur (jenuh)	1.522	0.731	2.417	"

Tabel 11. Angka kohesi pada berbagai kondisi

Dari Gambar-gambar dan Tabel di atas dapat dilihat bahwa dengan penambahan kapur dapat menaikkan tegangan dan nilai kohesi tanah.

Keterangan Gambar 19 (a)

- Titik 1 memperlihatkan nilai kohesi pada tanah tipe 3
- Titik 2 memperlihatkan nilai kohesi pada tanah tipe 2
- Titik 3 memperlihatkan nilai kohesi pada tanah tipe 1



Gambar 19 (a) Skema kasar lereng Limau Manis Unand

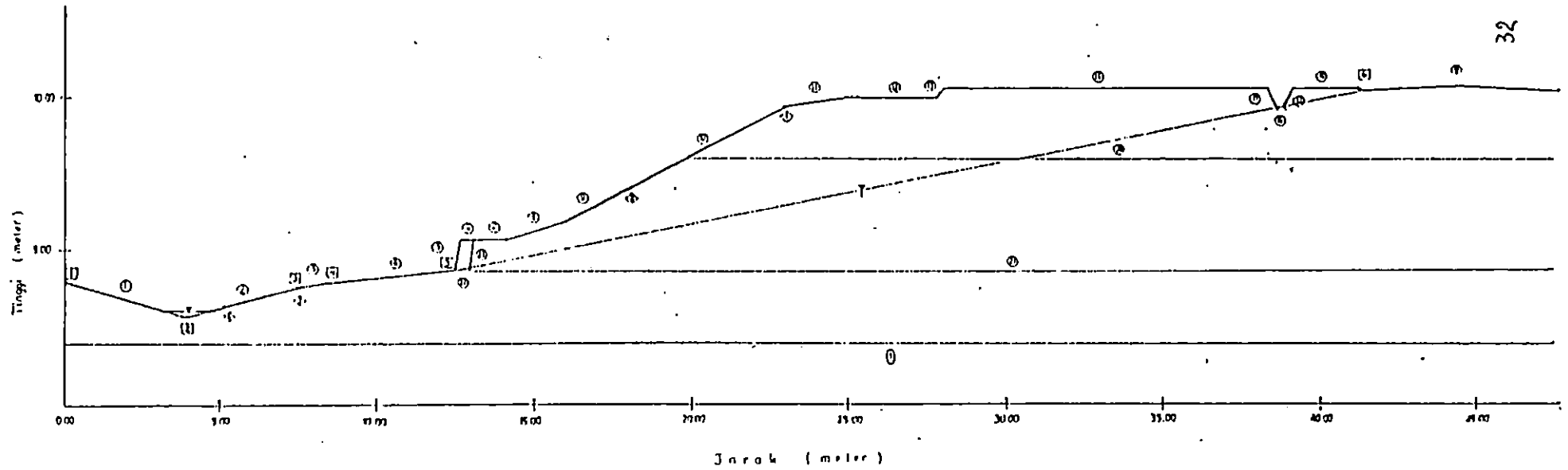
14. ANALISIS KESTABILAN LERENG DENGAN PCSTABL5M

Pada Gambar 19(b) dapat dilihat penampang lereng pada jalan menuju Rektorat Universitas Andalas Limau Manis. PCSTABL5M merupakan program komputer untuk menyelesaikan kasus-kasus stabilitas lereng dengan metoda keseimbangan batas (limit equilibrium method) bidang dua dimensi. Perhitungan faktor keamanan dilakukan dengan metoda irisan (method of slices). Metoda yang dipergunakan pada PCSTABL5M salah satunya adalah metoda Irisn Bishop yang Disederhanakan (Simplified Bishop Method) ditetapkan pada bidang longsor berbentuk lingkaran. PCSTABL5M dirancang dengan teknik random yang unik untuk menghasilkan bidang longsor yang potensial, selanjutnya menetapkan bidang kritis dan faktor keamanannya. PCSTABL5M juga memiliki kemampuan untuk menghitung faktor keamanan dengan ciri-ciri tanah sebagai berikut: susunan tanah heterogen, kuat geser tanah anisotropis, tekanan air pori, air tanah, dan air permukaan. Selain itu kemampuan PCSTABL5M adalah untuk mendapatkan 10 bidang keruntuhan yang paling kritis yang ditandai dengan angka 1,2,3,4,5,6,7,8,9, dan 0, dimana:

- Angka 1 = bidang keruntuhan yang paling kritis
- Angka 2 = bidang keruntuhan kritis yang kedua
- Angka 3 = bidang keruntuhan kritis yang ketiga
- Angka 4 = bidang keruntuhan kritis yang keempat
- Angka 5 = bidang keruntuhan kritis yang kelima
- Angka 6 = bidang keruntuhan kritis yang keenam
- Angka 7 = bidang keruntuhan kritis yang ketujuh
- Angka 8 = bidang keruntuhan kritis yang kedelapan
- Angka 9 = bidang keruntuhan kritis yang kesembilan
- Angka 0 = bidang keruntuhan kritis yang kesepuluh

Angka-angka tersebut dapat dilihat pada gambar bidang keruntuhan yang dihasilkan.

Gambar 19 (b) Penampang lereng pada jalan menuju Rektorat Unand



Batas profil (O):

- | | | | | |
|---------------------------------------|---|---|---|---|
| 1. (0.000 - 4.000) & (4.000 - 2.900) | 6. (12.546 - 4.398) & (12.764 - 5.353) | 11. (20.000 - 8.000) & (23.081 - 9.685) | 16. (38.365 - 10.300) & (38.690 - 9.700) | 21. (20.000 - 8.000) & (47.665 - 8.000) |
| 2. (4.000 - 2.900) & (5.100 - 3.200) | 7. (12.764 - 5.353) & (13.155 - 5.353) | 12. (23.081 - 9.685) & (25.000 - 10.000) | 17. (38.690 - 9.700) & (38.840 - 9.700) | 22. (13.000 - 4.398) & (13.150 - 5.353) |
| 3. (5.100 - 3.200) & (7.450 - 3.800) | 8. (13.155 - 5.353) & (14.155 - 5.353) | 13. (25.000 - 10.000) & (27.800 - 10.000) | 18. (38.840 - 9.700) & (39.165 - 10.300) | 23. (12.546 - 4.398) & (47.665 - 4.398) |
| 4. (7.450 - 3.800) & (8.348 - 3.934) | 9. (14.155 - 5.353) & (15.962 - 5.928) | 14. (27.800 - 10.000) & (28.065 - 10.300) | 19. (39.165 - 10.300) & (41.265 - 10.300) | |
| 5. (8.348 - 3.934) & (12.546 - 4.398) | 10. (15.962 - 5.928) & (20.000 - 8.000) | 15. (28.065 - 10.300) & (38.365 - 10.300) | 20. (41.265 - 10.300) & (47.665 - 10.300) | |

Titik muka air (□):

- | | | | |
|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 1. (0.000 - 3.200) | 3. (7.450 - 3.800) | 5. (12.546 - 4.398) | 7. (41.265 - 10.300) |
| 2. (5.100 - 3.200) | 4. (8.348 - 3.934) | 6. (13.050 - 4.450) | |

Titik pengambilan sampel (◇):

- | | |
|---------------------|--------------------|
| 1. (23.081 - 9.685) | 3. (7.450 - 3.800) |
| 2. (18.040 - 7.024) | 4. (5.100 - 3.200) |

Batas permukaan (O):

- (0.000 - 2.000) & (47.665 - 2.000)

15. FS TANPA STABILISASI

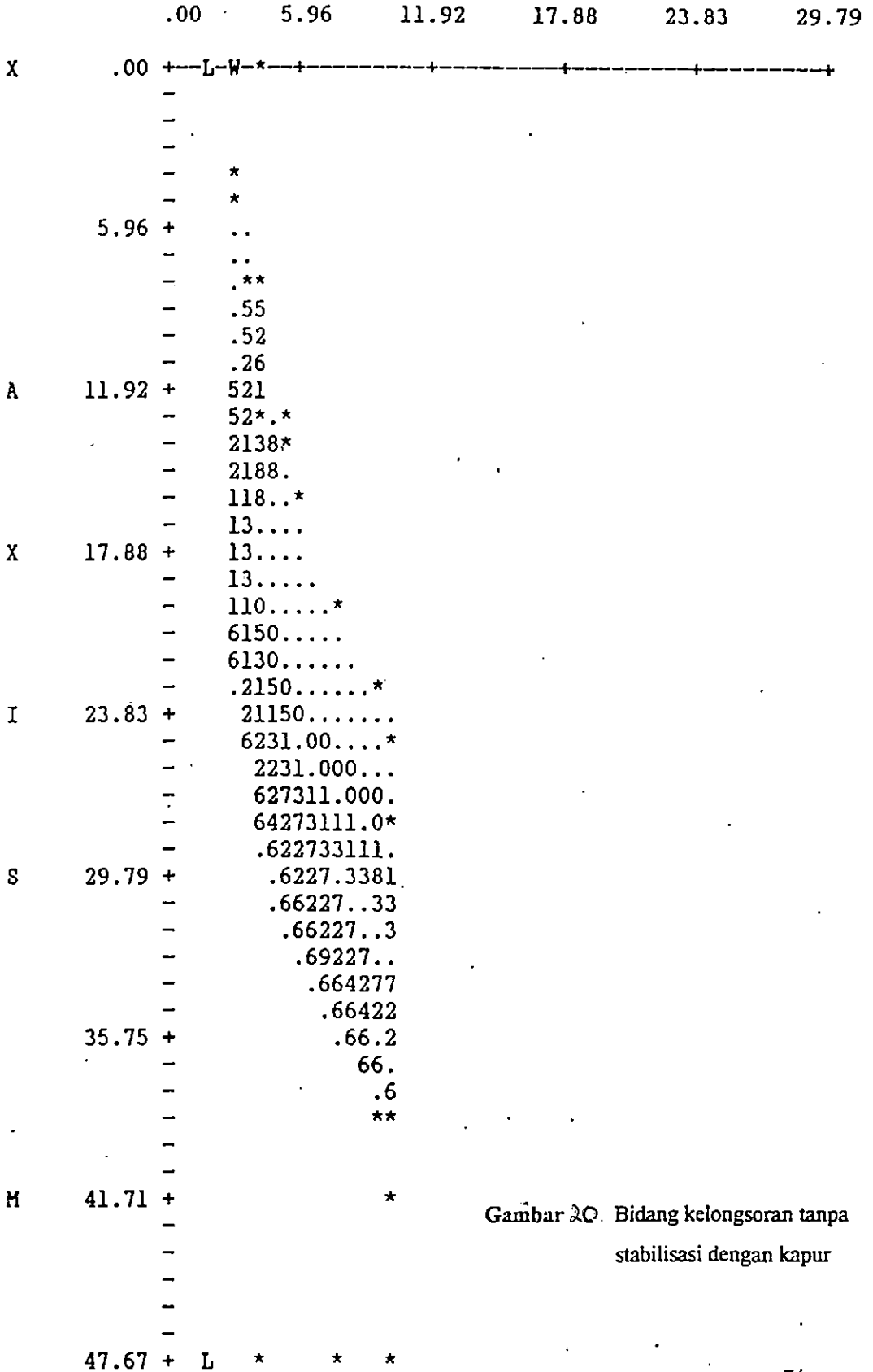
Dari beberapa pemeriksaan yang telah dilakukan, didapatkan suatu kondisi yang paling kritis dimana terjadi pada tanah dalam keadaan jenuh air. Batasan bidang kelongsoran yang diperiksa dimulai dari $X = 5$ m sampai $X = 38$ m. Gambar 20 memperlihatkan bidang-bidang kelongsoran tanpa stabilisasi dengan kapur dan dari hasil pemeriksaan tersebut terlihat bahwa harga factor keamanan < 1 , yang berarti lereng dalam keadaan tidak stabil. Faktor keamanan yang dihasilkan dengan 10 bidang keruntuhan yang paling kritis adalah:

- Angka 1, $F_s = 0.662$
- Angka 2, $F_s = 0.688$
- Angka 3, $F_s = 0.693$
- Angka 4, $F_s = 0.706$
- Angka 5, $F_s = 0.712$
- Angka 6, $F_s = 0.717$
- Angka 7, $F_s = 0.717$
- Angka 8, $F_s = 0.727$
- Angka 9, $F_s = 0.727$
- Angka 0, $F_s = 0.732$

Bidang keruntuhan yang paling kritis (ditujukn dengan angka 1) terjadi pada koordinat = 11.92 m sampai = 29.97 m. Hal ini menunjukkan kelongsoran yang paling potensial. Sedangkan keruntuhan yang lain (ditunjukkan dengan angka 2-0) merupakan bidang kelongsoran lain yang mungkin terjadi.

Untuk mengatasi hal ini dan untuk mendapatkan lereng yang aman ($F_s > 1$) maka tanah tersebut perlu distabilisasi. Dalam hal ini digunakan perbaikan tanah dengan metoda pencampuran tanah dengan kapur sebagai bahan tambahan.

Y A X I S M



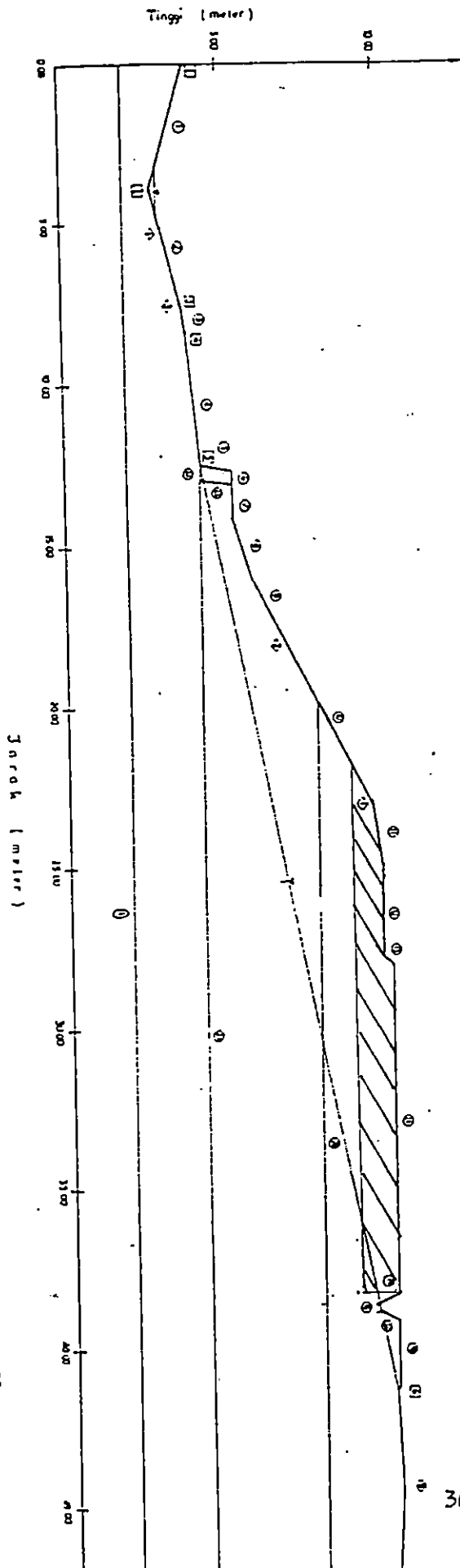
Gambar 2Q. Bidang kelongsoran tanpa stabilisasi dengan kapur

16. F_s DENGAN STABILISASI

Salah satu metoda perbaikan tanah ialah dengan menggunakan pencampuran kapur dengan cara pencampuran lapisan campuran kapur pada bahu lereng sepanjang bidang horisontal. Bahan campuran ini ditempatkan memotong bidang kelongsoran/keruntuhan yang mungkin terjadi. Sehingga diharapkan dapat merubah bidang kelongsoran tersebut dan diperoleh kondisi lereng yang lebih stabil. Dari hasil pemeriksaan stabilitas lereng, didapatkan titik bidang longsor pada bahu lereng. Sehingga untuk memperoleh kestabilan lereng dilakukan stabilisasi sepanjang bahu lereng. Faktor keamanan yang didapatkan (dengan stabilisasi sepanjang 16.565 m dengan tebal 1 m) adalah:

- Angka 1, $F_s = 2.857$
- Angka 2, $F_s = 2.947$
- Angka 3, $F_s = 3.049$
- Angka 4, $F_s = 3.091$
- Angka 5, $F_s = 3.096$
- Angka 6, $F_s = 3.117$
- Angka 7, $F_s = 3.155$
- Angka 8, $F_s = 3.184$
- Angka 9, $F_s = 3.205$
- Angka 0, $F_s = 3.323$

Dari Gambar 22, nilai-nilai F_s yang di dapat terlihat bahwa untuk mendapatkan lereng yang aman perlu adanya stabilisasi tanah dengan kapur sepanjang bahu lereng sampai sekitar kelongsoran lereng yang terjadi (kelongsoran yang tanpa distabilisasi dengan kapur)



Gambar 2.1 Stabilisasi sepanjang bahu lereng

17. KESIMPULAN

1. Dari uji propertis dapat diambil kesimpulan bahwa tanah lereng pada sisi jalan menuju Rektorat Unand Limau Manis adalah lempung.
2. Apabila dilihat dari nilai-nilai Atterberg dimana batas cair berada antara nilai 35% dan 50% dan batas plastis antar 30% dan 45% serta nilai-nilai berat jenisnya berkisar antara 2 sampai 2.55 dan nilai-nilai aktivitasnya sebesar 0.1 maka lempung tersebut dapat dikategorikan ke dalam lempung Halloysite.
3. Dari hasil tes kuat tekan bebas, dapat dilihat bahwa pencampuran tanah dengan kapur sebesar 8% (dengan perawatan contoh selama 7 hari) dapat menaikkan nilai tegangan (σ) dan kohesi (c).
4. Kapur sebagai bahan tambahan memang dapat memperbaiki dan menaikkan kekuatan tanah meskipun untuk mendapatkan kondisi lereng yang stabil perlu diperhatikan penempatan lapisan campuran.
5. Stabilisasi dengan menempatkan campuran tanah dan kapur setebal 1 meter pada bahu lereng dapat memberikan faktor keamanan sesuai yang diharapkan.

18. DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J.E., **Foundation Analysis and Design**, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo, Japan, 1977.
- Das, B.M., **Advanced Soil Mechanics**, McGraw-Hill, New York, 1983
- Dunham, C.W., **Foundation of Structure**, Edisi Kedua, McGraw-Hill Book Co., Inc., Kogakusha Company, 1962.
- Huang, Y.H., **Stability Analysis of earth Slopes**, Van Nostrand Reinhold Company. New York, 1983.
- Hary Cristiady H., **Mekanika Tanah I dan II**, Penerbit PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1992.
- Hausman, Manfred R., **Engineering Principles of Ground Modification**, McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- Idrus, **Stabilisasi Pada Lempung Losari dengan Kapur dan Semen**, ITB, Bandung, September 1991.
- Irsyam, Mashyur, **Modification by Admixture**, Diktat ITB.
- Irsyam, Masyhur, **Mineral Lempung**, Diktat ITB.