

III. KONSISTENSI TANAH

3.1. Pendahuluan

Apabila tanah berbutir halus mengandung mineral lempung, maka tanah tersebut dapat di remas-remas (*remolded*) tanpa menimbulkan retakan. Sifat kohesif ini disebabkan karena adanya air yang terserap (*adsorbed water*) di sekeliling permukikman dari partikel lempung. Pada awal tahun 1900, seorang ilmuwan dari Swedia bernama Atterberg mengembangkan suatu metode untuk menjelaskan sifat konsistensi tanah berbutir halus pada kadar air yang bervariasi. Bilamana kadar airnya sangat tinggi, campuran tanah dan air akan menjadi sangat lembek seperti cairan. Oleh karena itu, atas dasar air yang dikandung tanah, tanah dapat dipisahkan ke dalam empat keadaan dasar, yaitu: *padat*, *semi padat*, *plastis*, dan *cair*, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.1.

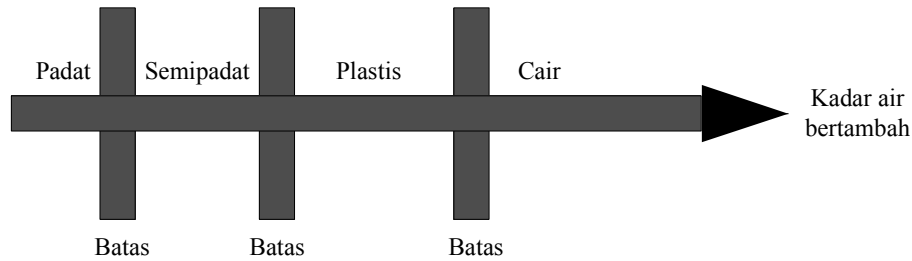
Kadar air, dinyatakan dalam persen, di mana terjadi transisi dari keadaan padat ke keadaan semi-padat didefinisikan sebagai batas susut (*shrinkage limit*). Kadar air di mana transisi dari keadaan semi-padat ke keadaan plastis terjadi dinamakan batas plastis (*plastic limit*), dan dari keadaan plastis ke keadaan cair dinamakan batas cair (*liquid limit*). Batas-batas ini dikenal juga sebagai batas-batas Atterberg (*Atterberg limits*).

3.2. Batas Cair (*liquid limit*) (*LL*)

Skema dari alat yang digunakan untuk menentukan batas cair diberikan dalam Gambar 3.2a. Alat tersebut terdiri dari mangkok kuningan yang bertumpu pada dasar karet yang keras. Mangkok kuningan dapat diangkat dan dijatuhkan di atas dasar karet keras tersebut dengan sebuah pengungkit eksentris ("cam") dijalankan oleh suatu alat pemutar. Untuk melakukan uji batas cair, pasta tanah diletakkan di dalam mangkok kuningan kemudian digores tepat di tengahnya dengan menggunakan alat penggores standar (Gambar 3.2b). Dengan menjalankan alat pemutar, mangkok kemudian dinaik-turunkan dari ketinggian 0,3937 in (10 mm). Kadar air, dinyatakan dalam persen, dari tanah yang dibutuhkan untuk menutup goresan yang berjarak 0,5 in. (12,7 mm) sepanjang dasar contoh tanah di dalam mangkok (lihat Gambar 3.2c dan 3.2d) sesudah 25 pukulan didefinisikan sebagai batas cair (*liquid limit*).

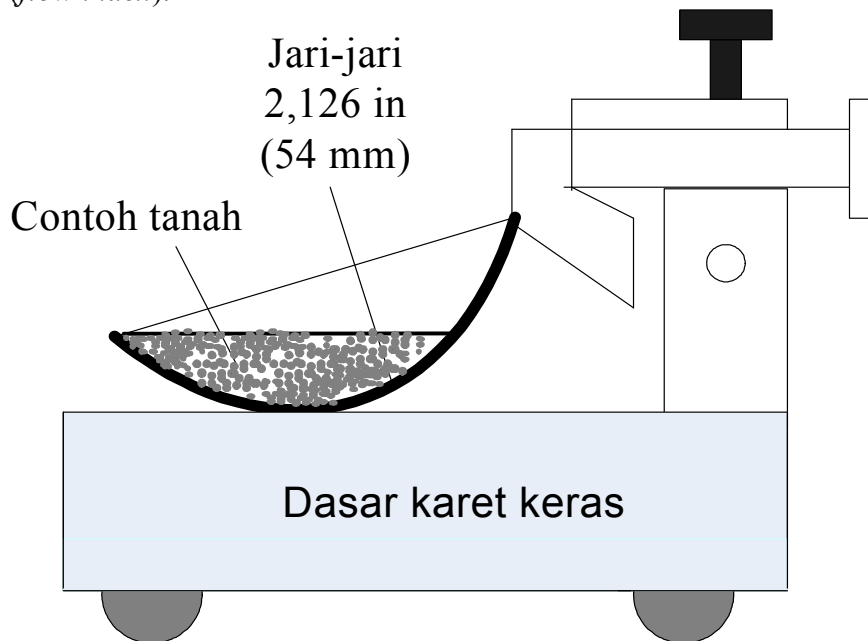
Untuk mengatur kadar air dari tanah yang bersangkutan agar dipenuhi persyaratan di atas ternyata sangat sulit. Oleh karena itu akan lebih baik kalau dilakukan uji batas cair paling sedikit empat kali pada tanah yang sama tetapi pada kadar air yang berbeda-beda sehing-

ga jumlah pukulan N , yang dibutuhkan untuk menutup goresan bervariasi antara 15 dan 35. (Gambar 3.3) menunjukkan foto dari alat uji batas cair dengan contoh tanah diletakkan di dalam mangkok kuning pada saat awal pengujian.) Kadar air dari tanah, dalam persen, dan jumlah pukulan untuk masing-masing uji digambarkan di atas kertas grafik semi-log (Gambar 3.4). Hubungan antara kadar air dan $\log N$ dapat dianggap sebagai suatu garis lurus. Garis lurus tersebut dinamakan sebagai kurva aliran (*flow curve*).

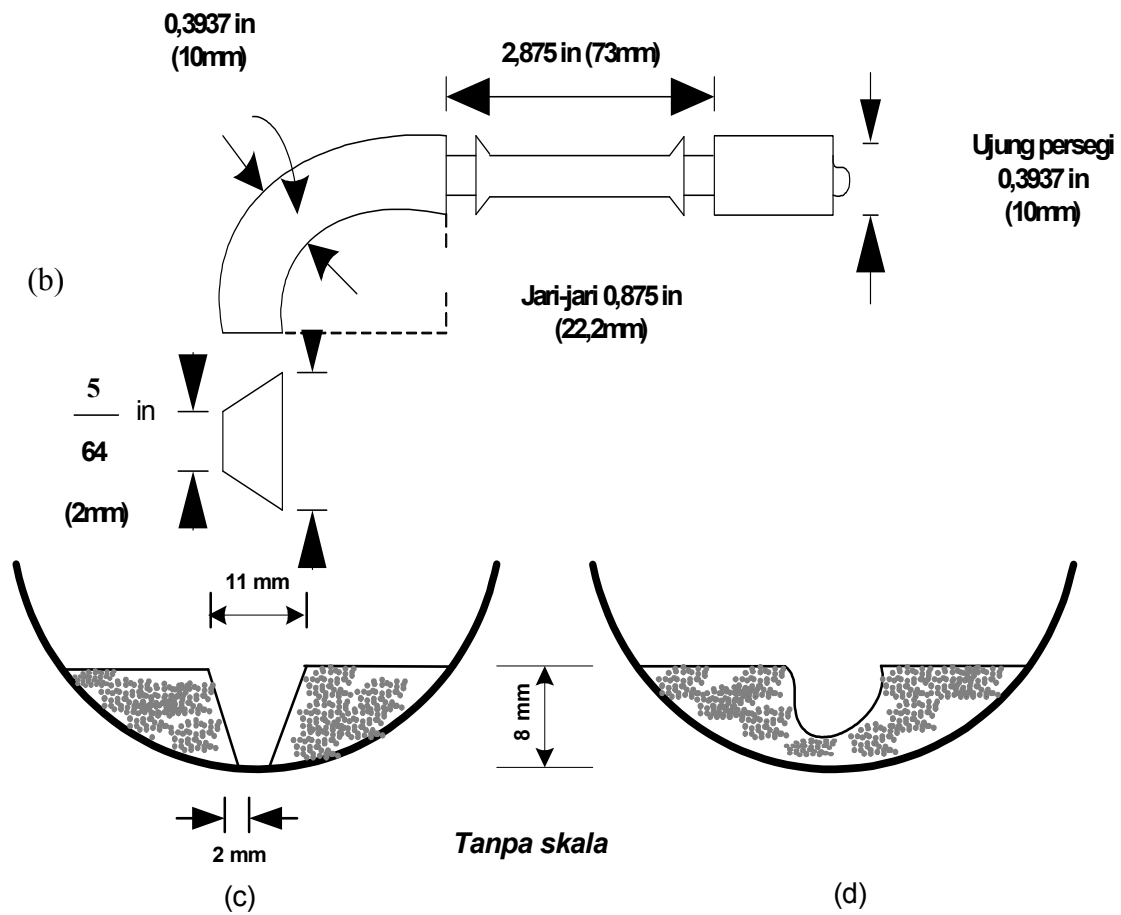


Gambar 3.1. Batas-batas Atterberg

Kadar air yang bersesuaian dengan $N = 25$, yang ditentukan dari kurva aliran, adalah batas cair dari tanah yang bersangkutan. Kemiringan dari aliran (*flow line*) didefinisikan sebagai indeks aliran (*flow index*).



(a)



Gambar 3.2. Uji batas cair : (a) alat untuk uji batas cair; (b) alat untuk menggores; (c) contoh tanah sebelum diuji; (d) contoh tanah setelah diuji



Gambar 3.3. Awal uji batas cair dengan contoh tanah di dalam mangkok kuning (atas jasa dari Soiltest, Inc. Evanston, Illinois).

$$I_F = \frac{w_1 - w_2}{\log\left(\frac{N_2}{N_1}\right)} \quad (3.1)$$

Dimana :

I_F = indeks aliran

w_1 = kadar air, dalam persen, dari tanah yang bersesuaian dengan jumlah pukulan N_1

w_2 = kadar air, dalam persen, dari tanah yang bersesuaian dengan jumlah pukulan N_2

Jadi persamaan garis aliran dapat dituliskan dalam bentuk yang umum, sebagai berikut :

$$w = -I_F \log N + C \quad (3.2)$$

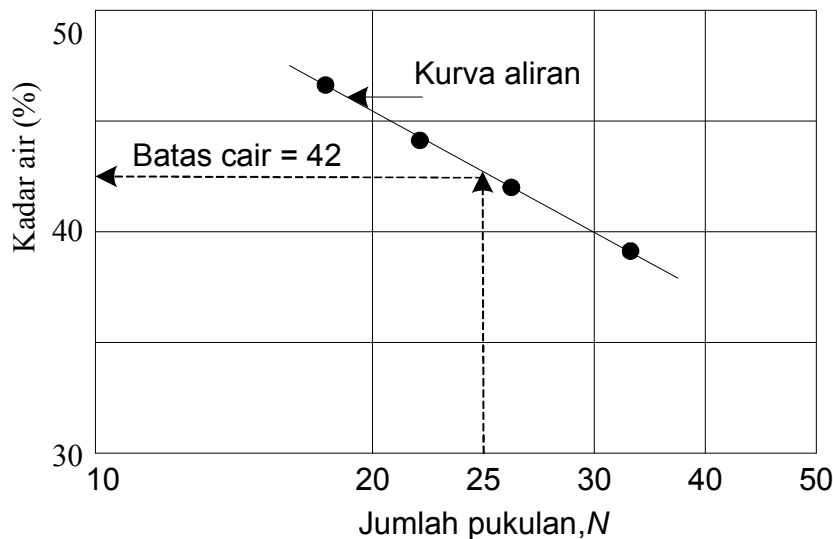
Atas dasar hasil dari beberapa uji batas cair, US Waterways Experiment Station, Vickburg, Mississippi (1949), mengajukan suatu persamaan empiris untuk menentukan batas cair, yaitu :

$$LL = w_N \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta} \quad (3.3)$$

Dimana :

N = jumlah pukulan yang dibutuhkan untuk menutup goresan selebar 0,5 in pada dasar contoh tanah yang diletakkan dalam mangkok kuning dari alat uji batas cair.

w_N = kadar air dimana untuk menutup dasar goresan dari contoh tanah dibutuhkan pukulan sebanyak N $\tan \beta = 0,121$ (harap dicatat bahwa tidak semua tanah mempunyai harga $\tan \beta = 0,121$)



Gambar 3.4. Kurva aliran (flow curve) untuk penentuan bts cair lempung berlanau (silty clay)

Persamaan (3.3) umumnya memberikan hasil yang cukup baik apabila jumlah pukulan adalah antara 20 dan 30. Untuk uji laboratorium yang dilakukan secara rutin, persamaan tersebut mungkin dapat dipergunakan untuk menentukan harga batas cair bilamana hanya dilakukan satu pengujian untuk tiap-tiap tanah. Cara ini dikenal sebagai metode satu titik (*one point method*). Metode ini telah dimasukkan dalam ASTM standar keterangan no D-423. Sebagai alasan mengapa metode satu titik ini dapat memberikan hasil yang cukup baik adalah bahwa rentang (range) harga kadar air yang terlibat hanya kecil, yaitu $N = 20$ sampai dengan $N = 30$. Tabel 3.2 menunjukkan harga-harga dari $(N/25)^{0,121}$ yang diperlukan oleh Persamaan (3.22) untuk $N = 20$ sampai dengan $N = 30$. Angka-angka batas Atterberg untuk bermacam-macam mineral lempung diberikan dalam Tabel 3.3.

Casagrande (1932) telah menyimpulkan bahwa tiap-tiap pukulan dari alas uji batas cair adalah bersesuaian dengan tegangan geser tanah sebesar kira-kira 1 g/cm^2 ($\approx 0,1 \text{ kN/m}^2$). Oleh karena itu, batas cair dari tanah berbutir halus adalah kadar air di mana tegangan geser tanahnya adalah kira-kira 25 g/cm^2 ($= 2,5 \text{ kN/m}^2$).

Tabel 3.2. Harga-harga $\left(\frac{N}{25}\right)^{0,121}$

N	$\left(\frac{N}{25}\right)^{0,121}$	N	$\left(\frac{N}{25}\right)^{0,121}$
20	0,973	26	1,005
21	0,979	27	1,009
22	0,985	28	1,014
23	0,990	29	1,018
24	0,995	30	1,022
25	1,000		

Tabel 3.3. Harga-Harga Batas Atterberg untuk Mineral Lempung

Mineral	Batas Cair	Batas Plastis	Batas kerut
Montmorillonite	100 – 900	50 – 100	8,5 – 15
Nontronite	37 – 72	19 – 27	
Illite	60 – 120	35 – 60	15 – 17
Kaolinite	30 – 110	25 – 40	25 - 29

Halloysite	50 - 70	47 - 60	
tehidrasi	35 - 55	30 - 45	
Halloysite	160 - 230	100 - 120	
Attapulgate	44 - 47	36 - 40	
Chlorite	200 - 250	130 - 140	
Allophone			

- Menurut Mitchell (1976)

3.3. Batas Plastis (*Plastic Limit*) (*PL*)

Batas plastis didefinisikan sebagai kadar air, dinyatakan dalam persen, di mana tanah apabila digulung sampai dengan diameter 1/8 in (3,2 mm) menjadi retak-retak. Batas plastis merupakan batas terendah dari tingkat keplastisan suatu tanah. Cara pengujiannya adalah sangat sederhana, yaitu dengan cara menggulung massa tanah berukuran elipsoida dengan telapak tangan di atas kaca datar (Gambar 3.5a dan b).

Indeks plastisitas [*plasticity index* (*PI*)] adalah perbedaan antara batas cair dan batas plastis suatu tanah, atau

$$PI = LL - P \quad (3.4)$$

Urutan pelaksanaan uji batas plastis diberikan oleh ASTM Test Designation D-424.

3.4. Batas Susut (*Shrinkage Limit*) (*SL*)

Suatu tanah akan menyusut apabila air yang dikandungnya secara perlahan-lahan hilang dalam tanah. Dengan hilangnya air secara terus menerus, tanah akan mencapai suatu tingkat keseimbangan di mana penambahan kehilangan air tidak akan menyebabkan perubahan volume (Gambar 3.6). Kadar air, dinyatakan dalam persen, di mana perubahan volume suatu massa tanah berhenti didefinisikan sebagai *batas susut* (*shrinkage limit*).

Uji batas susut (ASTM Test Designation D-427) dilakukan di laboratorium dengan menggunakan suatu mangkok porselin yang mempunyai diameter kira-kira 1,75 in (44,4 mm) dan tinggi kira-kira 0,5 in (12,7 mm). Bagian dalam dari mangkok dilapisi dengan vaselin (petroleum jelly), kemudian diisi dengan tanah basah sampai penuh. Permukaan tanah di dalam mangkok kemudian diratakan dengan menggunakan penggaris yang bersisi lurus sehingga permukaan tanah tersebut menjadi sama tinggi dengan sisi mangkok. Berat tanah basah di dalam mangkok ditentukan. Tanah di dalam mangkok kemudian dikeringkan di dalam oven.

Volume dari contoh tanah yang telah dikeringkan ditentukan dengan cara menggunakan air raksa.

Seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.6, batas susut dapat ditentukan dengan cara sebagai berikut:

$$SL = w_i(\%) - \Delta w (\%) \quad (3.5)$$

Dimana : W_i = kadar air tanah mula-mula pada saat ditempatkan didalam mangkok uji batas susut

Δw = perubahan kadar air (yaitu antara kadar air mula-mula dan kadar air pada batas susut)



Gambar 3.5 Uji batas plastis : (a) contoh tanah yang sedang digulung;
(b) gulungan tanah yang retak-retak (atas jasa dari Soiltest, Inc, Evanston, Illinois).

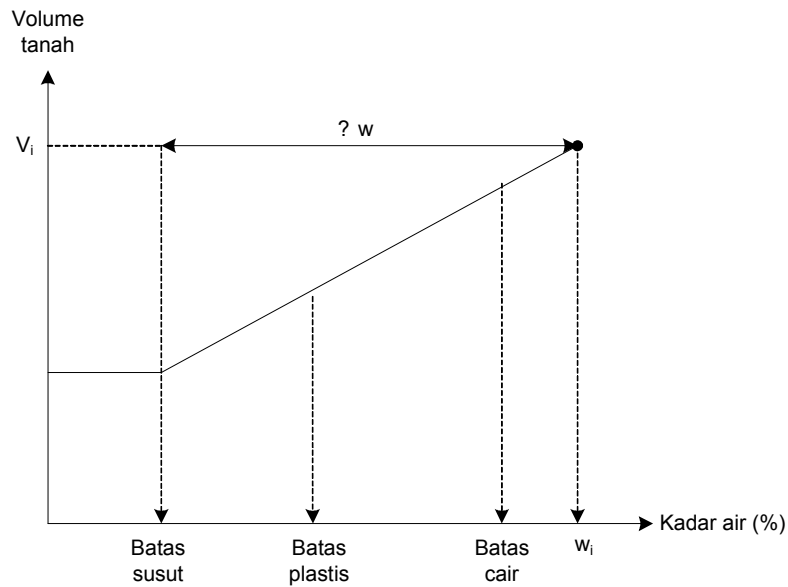
Tetapi :

$$w_i(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (3.6)$$

Dimana :

m_1 = masa tanah basah dalam mangkok saat permulaan pengujian (gram)

m_2 = masa tanah kering (gram) lihat Gambar 3.7



Gambar 3.6 Definisi batas susut

Selain itu :

$$\Delta w(\%) = \frac{(V_i - V_f) p_w}{m_2} \times 100 \quad (3.7)$$

Dimana :

V_i = volume contoh tanah basah pada saat permulaan pengujian (yaitu volume mangkok, cm^3)

V_f = volume tanah kering sesudah dikeringkan didalam oven

p_w = kerapatan air (g / cm^3)

dengan menggabungkan persamaan-persamaan (3.5), (3.6) dan (3.7) maka di dapat :

$$SL = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) (100) - \left[\frac{(V_i - V_f) p_w}{m_2} \right] (100) \quad (3.8)$$

Contoh :

Dilakukan uji batas susut pada suatu tanah dimana mineral lempung yang paling dominan dikandungnya adalah Illite. Hasil pengujian yang didapat adalah :

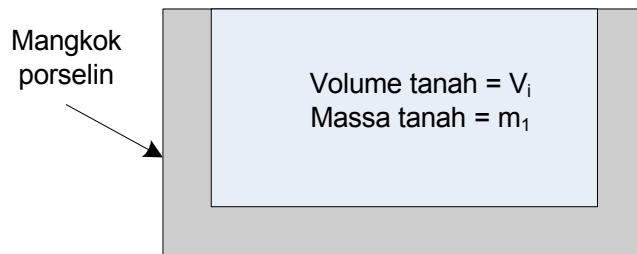
$$\begin{array}{ll} m_1 &= 44,6 \text{ g} & V_i &= 16,2 \text{ cm}^3 \\ m_2 &= 32,8 \text{ g} & V_f &= 10,8 \text{ cm}^3 \end{array}$$

Hitung batas susutnya :

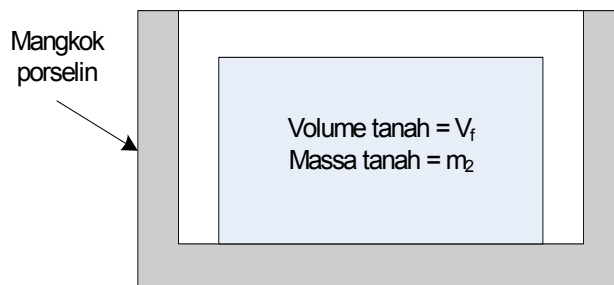
Penyelesaian :

Dari Persamaan (3.8)

$$SL = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right) (100) - \left[\frac{(V_i - V_f) \rho_w}{m_2} \right] (100)$$



(a) Sebelum pengeringan



(b) Setelah pengeringan

Gambar 3.7 Uji batas susut

Dengan memasukkan data uji ke dalam persamaan, didapat :

$$\begin{aligned} SL &= \left(\frac{44,6 - 32,8}{32,8} \right) 100 - \left(\frac{16,2 - 10,8}{32,8} \right) 100 \\ &= 35,97 - 16,46 = 19,5 \end{aligned}$$

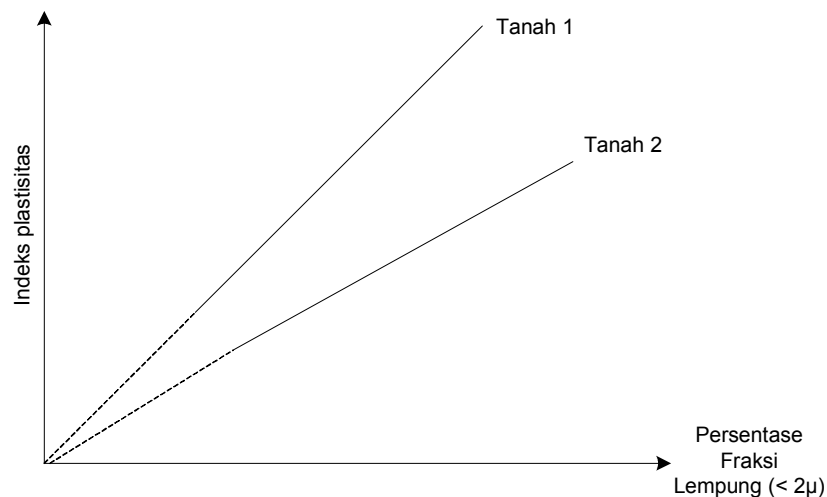
Catatan : Batas susut yang didapat dari hasil perhitungan di atas adalah masih di dalam batas umum untuk illite seperti yang diberikan dalam Tabel 3.3.

3.5. Aktivitas (activity)

Karena sifat plastis dari suatu tanah adalah disebabkan oleh air yang terserap di sekeliling permukaan partikel lempung (adsorbed water), maka dapat diharapkan bahwa tipe dan jumlah mineral lempung yang dikandung di dalam suatu tanah akan mempengaruhi batas plastis dan batas cair tanah yang bersangkutan. Skempton (1953) menyelidiki bahwa indeks plastis (PI) suatu tanah bertambah menurut garis lurus sesuai dengan bertambahnya persentase dari fraksi berukuran lempung (% Berat butiran yang lebih kecil dari 2μ) yang dikandung oleh tanah. Hubungan ini dapat dilihat dalam Gambar 3. di mana garis rata-rata untuk semua tanah adalah melalui titik pusat sumbu. Hubungan antara PI dengan fraksi berukuran lempung untuk tiap-tiap tanah mempunyai garis yang berbeda-beda. Keadaan ini disebabkan karena tipe dari mineral lempung yang dikandung oleh tiap-tiap tanah berbeda-beda. Atas dasar hasil studi tersebut, Skempton mendefinisikan suatu besaran yang dinamakan *aktivitas* (activity) = A , yang merupakan kemiringan dari garis yang menyatakan hubungan antara PI dan persen butiran yang lolos ayakan 2μ , atau dapat pula dituliskan sebagai:

$$A = \frac{PI}{(\% \text{berat fraksi berukuran lempung})} \quad (3.9)$$

A = aktivitas/activity



Gambar 3.11 Hubungan antara indeks plastisitas dengan persentase berat fraksi berukuran lempung

Aktivitas digunakan sebagai indeks untuk mengidentifikasi kemampuan mengembang dari suatu tanah lempung. Harga dari aktivitas untuk berbagai mineral lempung diberikan dalam Tabel 3.4.

Seed, Woodward, dan Lundgren (1964a) mempelajari sifat plastis dari beberapa macam tanah yang dibuat sendiri dengan cara mencampur pasir dan lempung dengan persentase yang berbeda-beda. Mereka menyimpulkan bahwa walaupun hubungan antara indeks plastis (*PI*) dan persentase butiran yang lebih kecil dari 2μ adalah merupakan garis lurus, seperti diteliti oleh Skempton, tetapi garis-garis tersebut tidak selalu melalui pusat sumbu. Keadaan ini dapat dilihat dalam Gambar 3.12 dan 3.13. Oleh karena itu, aktivitas dapat didefinisikan sebagai:

$$A = \frac{PI}{\%beratfraksiberukuranlempung - C'} \quad (3.29)$$

di mana C' adalah konstanta dari tanah yang ditinjau.

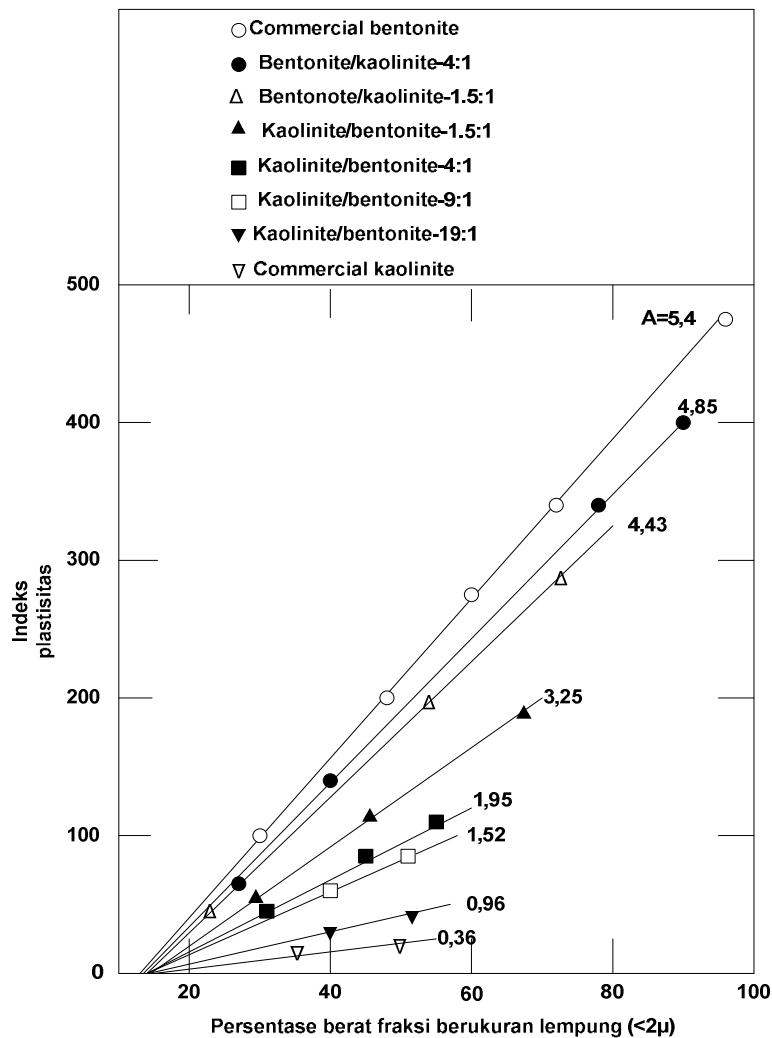
Untuk hasil percobaan yang ditunjukkan dalam Gambar 3.9 dan 3.10, $C' = 9$.

Studi lanjutan dari Seed, Woodward, dan Lundgren (1964b) menunjukkan bahwa hubungan antara indeks plastisitas dan persentase dari fraksi berukuran lempung di dalam tanah dapat diwakili oleh dua garis lurus. Hal ini ditunjukkan secara kualitatif dalam Gambar 3.11. Untuk tanah yang mengandung fraksi berukuran lempung lebih besar dari 40%, garis lurus tersebut akan melalui pusat sumbu apabila diproyeksikan kembali.

Table 3.4. Aktivitas Mineral Lempung

Mineral	Aktivitas (A)
Smectites / Montmorillonite	1 – 7
Illite	0,5 – 1,2
Kaolinite	0,5
Halloysite (2H ₂ O)	0,5
Halloysite (4H ₂ O)	0,10
Attapulgite	0,5 – 1,2
Allophone	0,5 – 1,2

Menurut Mitchell (1976)

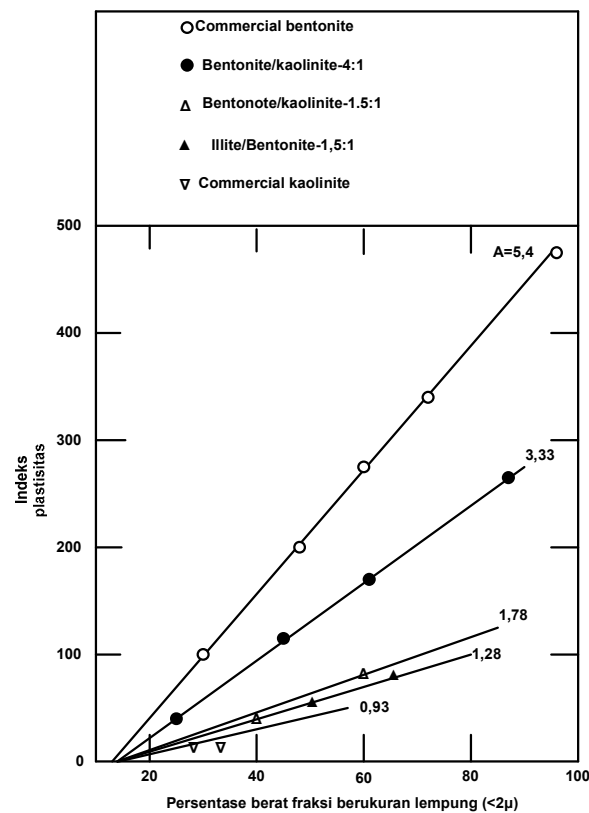


Gambar 3.12 Hubungan antara indeks plastisitas dan persentase berat fraksi berukuran lempung untuk campuran lempung illite/ betonite (menurut Seed, Woodward, dan Lundgren, 1964).

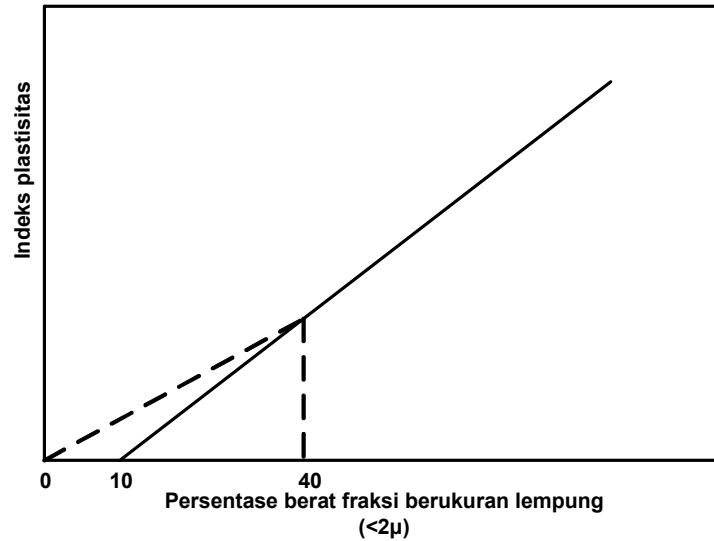
Bagan Plastisitas

Walaupun cara untuk menentukan batas cair dan batas plastis di laboratorium adalah sangat sederhana, batas-batas tersebut dapat memberikan informasi tentang sifat dari tanah kohesif. Maka dari itu, batas cair dan batas plastis telah digunakan secara ekstensif oleh para ahli teknik sipil untuk menentukan korelasi dari beberapa parameter tanah fisis dan juga untuk mengidentifikasi tanah. Casagrande (1932) telah mempelajari hubungan antara indeks plastis dan batas cair dari bermacam-macam tanah asli. Berdasarkan hasil-hasil pengujian tersebut, Casagrande mengusulkan suatu bagan plastisitas seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.15. Hal yang paling penting dalam bagan tersebut adalah garis empiris A yang diberikan dengan Persamaan $PI = 0,73 (LL - 20)$. Garis empiris A memisahkan tanah lempung

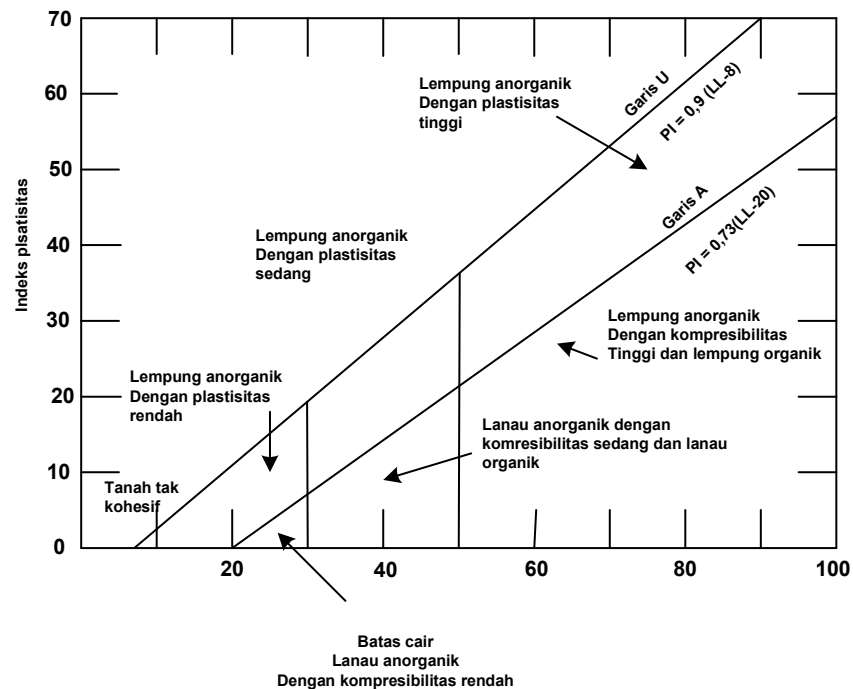
anorganik (inorganic clay) dari tanah lanau anorganik (inorganic silt). Tanah lempung anorganik terletak di atas garis *A*, dan lanau anorganik terletak di bawah garis *A*. Tanah lanau anorganik dengan kemampuan memampat sedang (di bawah garis *A* dengan *LL* berkisar antara 30 sampai dengan 50). Tanah lempung organik (organic clay) berada di dalam daerah yang sama seperti tanah lanau anorganik dengan kemampuan memampat tinggi (di bawah garis *A* dengan *LL* lebih besar dari 50). Keterangan yang diberikan dalam bagan plastisitas adalah sangat berguna karena bagan tersebut merupakan dasar dalam pengelompokan tanah berbutir halus dengan sistem unified (USCS)



Gambar 3.13 Hubungan antara indeks plastisitas dan persentase berat fraksi berukuran lempung untuk campuran lempung illite/bentonite (menurut Seed, Woodward, dan Lundgren)



Gambar 3.14 Penyederhanaan hubungan antara indeks plastisitas dan persentase berat fraksi berukuran lempung (Seed, Woodward, dan Lun)



Gambar 3.15 Bagan plastisitas

Dalam Gambar 3.15 terlihat bahwa ada suatu garis di atas garis *A* yang dinamakan *garis U*. Garis *U* ini merupakan batas atas perkiraan dari hubungan antara indeks plastisitas dan batas cair untuk semua tanah yang telah ditemukan selama ini. Persamaan garis *U* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$PI = 0,9 (LL - 8) \quad (3.11)$$

Pemakaian yang lain dari garis A dan garis U adalah untuk menentukan batas susut tanah, seperti telah disarankan oleh Casagrande bahwa apabila indeks plastisitas dan batas cair dari suatu tanah diketahui, maka batas susut dari tanah yang bersangkutan dapat ditentukan secara kira-kira (lihat Holtz dan Kovacs, 1981). Hal ini dapat dilakukan dengan cara seperti yang terlihat dalam Gambar 3.16, yaitu:

- a. Gambar indeks plastisitas dan batas cair dari tanah yang bersangkutan, misalnya titik A dalam Gambar 3.16.
- b. Perpanjangan garis A dan garis U ke bawah hingga bertemu pada satu titik B . Titik B mempunyai koordinat $LL = -43,5$ dan $PI = -46,4$.
- c. Hubungkan titik A dan titik B dengan satu garis lurus. Garis tersebut akan memotong sumbu batas cair pada titik C . Absis dari titik C adalah perkiraan harga batas susut dari tanah yang bersangkutan.