

TEGANGAN EFEKTIF (Effective Stress)

Pengertian

- Bila tanah mengalami tekanan akibat pembebanan seperti beban pondasi, maka angka pori tanah akan berkurang.
- Tekanan akibat beban pondasi juga dapat mengakibatkan perubahan-perubahan sifat mekanis tanah yang lain seperti menambah tahanan geser tanah.
- Jika tanah berada di dalam air, tanah dipengaruhi oleh gaya angkat ke atas akibat tekanan air hidrostatis.
- Berat tanah yang terendam dalam air ini disebut **berat tanah efektif**.
- Sedangkan tegangan yang terjadi akibat berat tanah efektif ini di dalam tanahnya, disebut **tegangan efektif**.
- Tegangan efektif ini merupakan tegangan yang mempengaruhi kuat geser dan perubahan volume atau penurunan tanahnya.

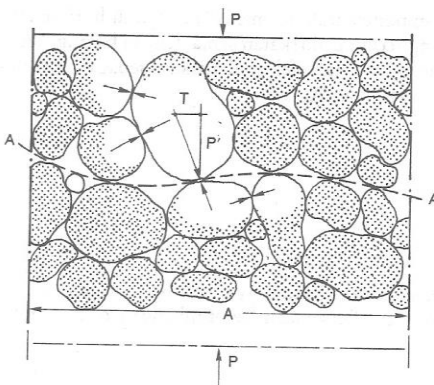
Pengertian

- Terzaghi (1923), memberikan prinsip tegangan efektif yang bekerja pada segumpal tanah.
- Prinsip ini hanya berlaku pada tanah yang jenuh sempurna, yaitu :
 - 1) **Tegangan normal total (σ)** pada bidang di dalam masa tanah, yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban akibat berat total tanah termasuk air dalam ruang pori, persatuan luas bidangnya, yang arahnya tegak lurus bidang.
 - 2) **Tekanan air pori (u)**, disebut juga dengan tekanan netral yang bekerja ke segala arah sama besar, yaitu tekanan air yang mengisi rongga diantara butiran padat;
 - 3) **Tegangan normal efektif (σ')** pada bidang di dalam tanah, yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban akibat berat butiran tanah persatuan luas bidangnya.
- Hubungan dari ketiganya adalah :

$$\sigma = \sigma' + u$$

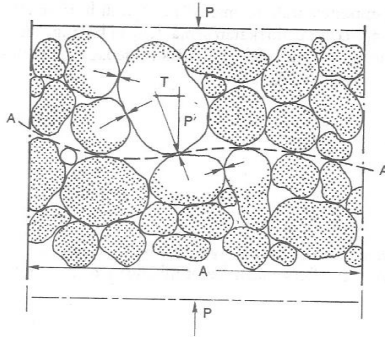
Pengertian

- Ditinjau suatu bidang AA di dalam tanah yang jenuh sempurna , seperti terlihat pada gambar :



- Bidang ini melewati titik-titik pada bidang singgung di antara butirannya.
- Pada kenyataannya, bidang AA ini merupakan bidang bergelombang sangat kecil tergantung besar butirannya.
- Gaya normal P diberikan pada luasan A, ditahan oleh gaya antarbutiran dan sebagian lagi oleh tekanan air pori.
- Besar dan arah gaya – gaya yang bekerja pada bidang kontak butirannya sangatlah acak .
- Tetapi, secara pendekatan, untuk setiap titik di bidang singgung pada bidang AA, gaya-gaya tersebut dapat dipisahkan menurut komponen arah normal (P') dan arah horizontal (T) pada arah dari bidang nyatanya yang secara pendekatan sama dengan bidang AA.

Pengertian



- **Tegangan normal efektif** atau tegangan vertikal efektif diartikan sebagai jumlah komponen P' di dalam luasan A , dibagi luas A , atau

$$\sigma' = \frac{\sum P'}{A}$$

- **Tegangan normal total** adalah :

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

- Jika titik singgung dianggap terletak diantara butirannya, tekanan air pori akan bekerja pada bidang di seluruh luasan A , sehingga persamaan kesetimbangan dalam arah normal bidang AA , adalah :

$$P = \sum P' + u A$$

atau

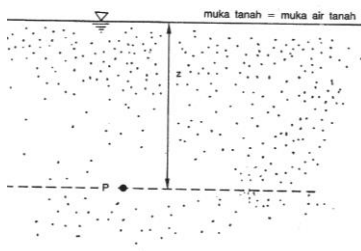
$$\frac{P}{A} = \frac{\sum P'}{A} + u$$

- Persamaan
$$\frac{P}{A} = \frac{\sum P'}{A} + u$$

dapat ditulis menjadi : $\sigma = \sigma' + u$ atau

$$\sigma' = \sigma - u$$

- Untuk meninjau tegangan efektif akibat berat tanah yang ada di atasnya, ditinjau suatu massa tanah yang berada dalam bidang horizontal dan dengan muka air tanah pada permukaan tanah tersebut.



- Tegangan vertikal total (σ_v), yaitu tegangan normal pada bidang horizontal pada kedalaman z = berat seluruh material (padat + air) per satuan luas pada kedalamannya.

$$\sigma_v = \gamma_{\text{sat}} z$$

dengan γ_{sat} adalah berat volume (unit weight) tanah jenuh.

- Karena ruang pori diantara butirannya saling berhubungan, maka tekanan air pori (u) pada kedalaman z , adalah :

$$u = \gamma_w z$$

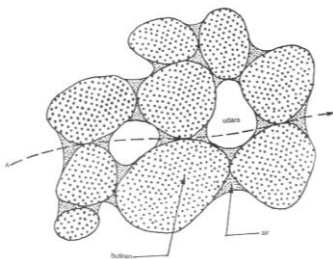
- Tegangan vertikal efektif (σ_v') pada kedalaman z , adalah :

$$\begin{aligned}\sigma_v' &= \sigma_v - u \\ &= \gamma_{\text{sat}} Z - \gamma_w Z \\ &= (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) Z \\ \sigma_v' &= \gamma' Z\end{aligned}$$

dimana γ' adalah berat volume (unit weight) tanah efektif atau berat volume tanah terendam.

Tegangan Efektif pada Tanah Tak Jenuh

- Bila tanah tidak jenuh sempurna, maka rongga-rongga tanah akan terisi oleh air dan udara, seperti terlihat pada gambar :



- Tekanan air pori (u_w) harus selalu lebih kecil daripada tegangan yang terjadi dalam udaranya (u_a), akibat tarikan permukaan.
- Karena tanah tidak jenuh, pori udara akan membentuk saluran yang sambung-menyambung melalui ruang diantara butirannya, sedang air pori akan terkonsentrasi pada daerah sekitar kontak antar partikelnya.
- Bishop (1955) memberikan persamaan hubungan tegangan total (σ) dan tegangan efektif (σ') untuk tanah tak jenuh sbb :

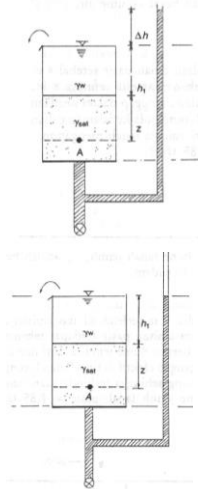
$$\sigma = \sigma' + u_a - S(u_a - u_w)$$

dimana S adalah parameter yang ditentukan secara eksperimental, yang mempunyai hubungan secara langsung dengan derajat kejenuhan tanahnya. u_w adalah tekanan air di dalam ruang pori dan u_a adalah tekanan udara dalam porinya.

Untuk tanah jenuh $S = 1$ dan untuk tanah kering sempurna $S = 0$.

Pengaruh Gaya Rembesan pada Tegangan Efektif

- Jika air mengalir dengan gradien hidrolis tertentu di dalam tanah, maka pengaruh perbedaan tinggi tekanan akan menimbulkan gaya pada butiran tanahnya. Arah gaya rembesan searah dengan alirannya.
- Ditinjau kondisi aliran air di dalam tanah seperti terlihat pada gambar :



- Pada kasus (a), tanah menderita gaya rembesan ke arah atas.

- Tegangan efektif pada titik A adalah :

$$\sigma' = h_1 \gamma_w + z \gamma_{\text{sat}} - z \gamma_w - (h_1 + \Delta h) \gamma_w$$

$$\sigma' = z (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) - \Delta h \gamma_w$$

$$\sigma' = z \gamma' - \Delta h \gamma_w$$

- Pada kasus (b), karena tidak ada gaya rembesan ($\Delta h = 0$).

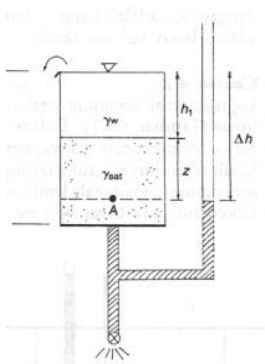
- Tegangan efektif pada titik A adalah :

$$\sigma' = z \gamma_{\text{sat}} - z \gamma_w$$

$$\sigma' = z (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w)$$

$$\sigma' = z \gamma'$$

Pengaruh Gaya Rembesan pada Tegangan Efektif



- Pada kasus (c), di sini terjadi aliran arah ke bawah dengan tinggi tekanan air sebesar $-(h_1 + z)$

- Tegangan efektif pada titik A adalah :

$$\sigma' = z \gamma' - [-(h_1 + z)] \gamma_w$$

$$\sigma' = z (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) + h_1 \gamma_w + z \gamma_w$$

$$\sigma' = z \gamma_{\text{sat}} - z \gamma_w + h_1 \gamma_w + z \gamma_w$$

$$\sigma' = z \gamma_{\text{sat}} + h_1 \gamma_w$$

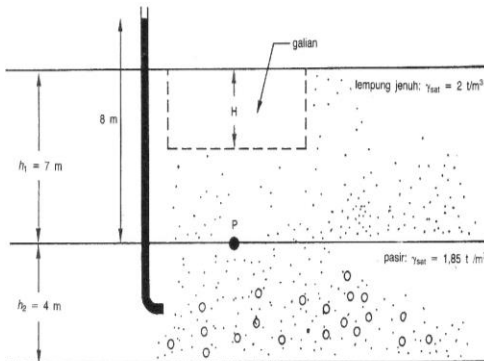
γ_{sat} adalah berat volume tanah jenuh;

γ_w adalah berat volume air; dan

γ' adalah berat volume tanah terendam

Contoh Soal 1

- Lapisan tanah lempung setebal 7 m terletak di atas lapisan tanah pasir setebal 4 m, seperti terlihat pada gambar :



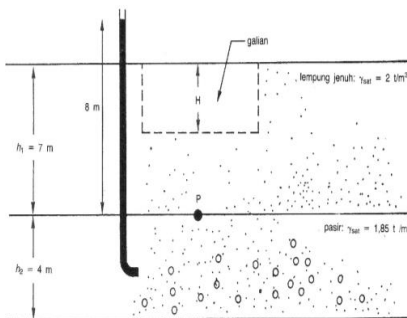
- Dalam lapisan pasir terdapat tekanan artesis setinggi 8 m.
- Jika berat volume jenuh lempung (γ_{sat}) 2 t/m^3 dan berat volume jenuh pasir (γ_{sat}) $1,85 \text{ t/m}^3$
- Hitung tegangan efektif di titik P dan hitung pula kedalaman galian maksimum pada tanah lempung sehingga terhindar dari bahaya tanah mengapung.

- Penyelesaian :

Tegangan efektif di titik P :

$$\begin{aligned}\sigma'_P &= h_1 \gamma_{\text{sat}} \text{ lempung} - h_{\text{artesis}} \gamma_w \\ &= 7 \times 2 - 8 \times 1 = 6 \text{ t/m}^2\end{aligned}$$

Lanjutan penyelesaian soal 1



- Misalkan kedalaman galian = H
- Pengurangan tekanan akibat tanah galian adalah : $H \gamma_{\text{sat}} = H \times 2 = 2H \text{ t/m}^2$
- Tekanan tanah setebal 7 m :
 $h_1 \times \gamma_{\text{sat}} = 7 \times 2 = 14 \text{ t/m}^2$
- Pada kondisi kritis, agar tanah tidak mengapung, tekanan artesis = tekanan lapisan lempung tersisa, sehingga :
 $h \gamma_w = 14 - 2H$
 $8 \times 1 = 14 - 2H$
 $H = 3 \text{ meter}$

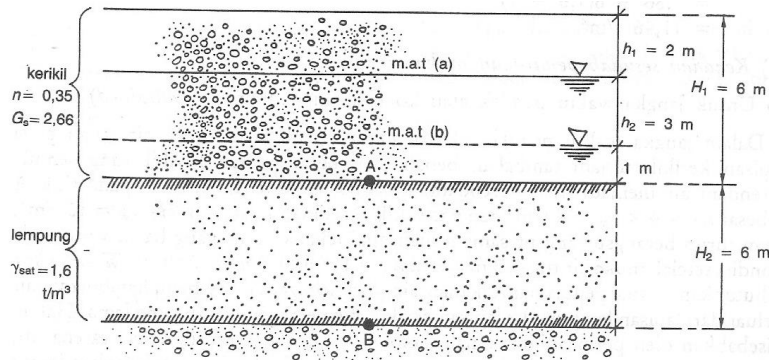
- Jadi, kedalaman galian maksimum agar tidak terjadi bahaya tanah mengapung adalah 3 meter.
- Dapat pula diselesaikan dengan cara :

$$\begin{aligned}\sigma'_P &= (7 - H) \gamma_{\text{sat}} - u \\ &= (7 - H) 2 - 8 \times 1 = 6 - 2H\end{aligned}$$

- Pada kondisi kritis $\sigma'_P = 0$, maka :
 $0 = 6 - 2H$ sehingga $H = 3 \text{ meter}$

Contoh Soal 2

- Lapisan tanah lempung setebal 6 m, diapit oleh dua lapisan kerikil.
- Tebal lapisan kerikil sebelah atas lempung 6 m.
- Muka air tanah terletak 2 m di bawah permukaan kerikil.



- Jika ditentukan :
 Kerikil : $n = 0,35$; $G_s = 2,66$
 Lempung : $\gamma_{sat} = 1,6 \text{ t/m}^3$

Contoh Soal 2

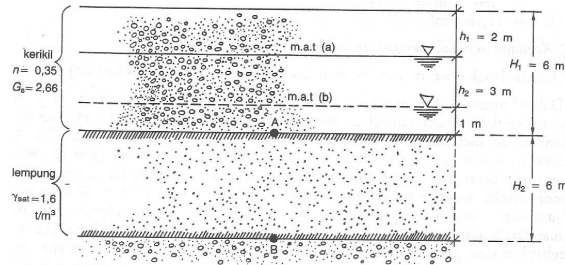
- Tentukan tegangan efektif pada sisi atas dan bawah lapisan lempung, yaitu pada titik A dan titik B.
 - Bila muka air tanah turun mendadak sebesar 3 m dari muka air sebelumnya, hitung tegangan total dan tegangan efektif pada sisi atas dan bawah lapisan lempung untuk waktu jangka pendek dan jangka panjang.
 - Gambarkan diagram tegangan yang menunjukkan perubahan besarnya tegangan efektif dari jangka pendek dan jangka panjang.
- *Penyelesaian :*

Terlebih dahulu dihitung γ_{sat} dan γ_d lapisan kerikil.

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0,35}{1-0,35} = 0,54 \quad \gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{2,66 \times 1}{1+0,54} = 1,73 \text{ t/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = \frac{2,66 + 0,54}{1+0,54} = 2,1 \text{ t/m}^3$$

Penyelesaian Soal 2



a) Keadaan sebelum penurunan muka air tanah :

- Pada sisi atas lapisan lempung (titik A) :

$$\sigma_A' = h_1 \gamma_d + (H_1 - h_1) (\gamma_{\text{sat kerikil}} - \gamma_w)$$

$$\sigma_A' = 2 \times 1,73 + (6 - 2) (2,1 - 1)$$

$$\sigma_A' = 7,86 \text{ t/m}^2$$

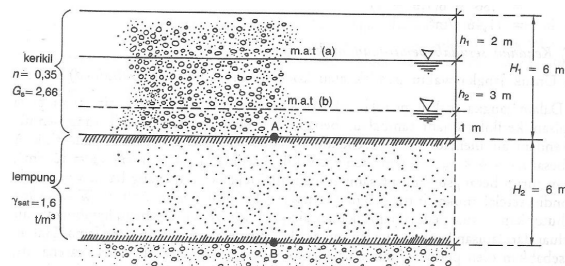
- Pada sisi bawah lapisan lempung (titik B)

$$\sigma_B' = \sigma_A' + H_2 (\gamma_{\text{sat lempung}} - \gamma_w)$$

$$\sigma_B' = 7,86 + 6 (1,6 - 1)$$

$$\sigma_B' = 11,46 \text{ t/m}^2$$

Penyelesaian Soal 2



b) Keadaan sesudah penurunan muka air tanah :

(i) Untuk jangka waktu pendek atau kondisi tanpa drainasi (undrained).

Dalam jangka waktu pendek, akibat adanya penurunan muka air tanah pada lapisan kerikil, terjadi tambahan beban oleh berat lapisan kerikil yang semula terendam air menjadi tidak terendam.

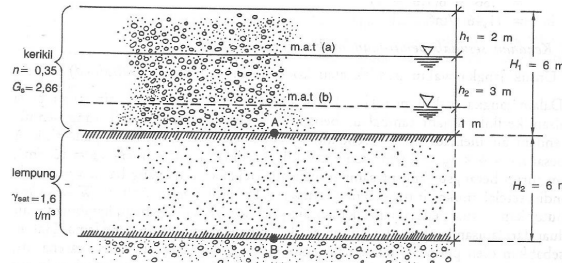
- Tekanan air pori mula-mula pada titik A :

$$u_A = 4 \times \gamma_w = 4 \times 1 = 4 \text{ t/m}^2$$

- Tekanan air pori mula-mula pada titik B :

$$u_B = 10 \times \gamma_w = 10 \times 1 = 10 \text{ t/m}^2$$

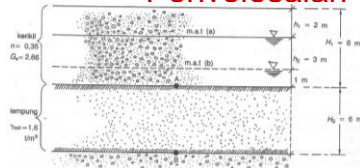
Penyelesaian Soal 2



(i) Untuk jangka waktu pendek atau kondisi tanpa drainasi (undrained).

- Tekanan air pori pada titik A setelah muka air turun 3 m :
 $u_A = 1 \times \gamma_w = 1 \times 1 = 1 \text{ t/m}^2$
- Tekanan air pori pada titik B setelah muka air turun 3 m :
 $u_B = 7 \times \gamma_w = 7 \times 1 = 7 \text{ t/m}^2$
- Waktu yang diperlukan untuk penurunan tekanan air pori sebagai akibat keluarnya air dari lapisan lempung ke lapisan kerikil, memerlukan waktu yang lama. Hal ini disebabkan permeabilitas tanah lempung yang sangat kecil.
- Oleh karena itu dalam jangka waktu yang pendek atau $t = 0$, relatif belum ada air pori yang keluar dari lapisan lempungnya.

Penyelesaian Soal 2



(i) Untuk jangka waktu pendek atau kondisi tanpa drainasi (undrained).

- Karena ada tambahan beban dari lapisan kerikil akibat penurunan air, maka tekanan air pori pada tanah lempung akan bertambah sebesar tambahan bebannya.
- Sehingga pada jangka pendek tekanan air pori pada tanah lempung akan bertambah sebesar :

$$u_{A\text{total}} = u_A + \Delta\sigma' \quad \text{dan} \quad u_{B\text{total}} = u_B + \Delta\sigma'$$

dengan $\Delta\sigma'$ adalah tambahan tegangan oleh lapisan kerikil dari kondisi terendam menjadi tidak terendam.

- Jadi, dalam jangka pendek kondisi pembebanan identik dengan pembebanan pada kondisi tanpa drainasi (undrained), yaitu tegangan efektif tetap tidak berubah, karena tambahan beban akan = tambahan tekanan air pori ($\Delta u = \Delta\sigma'$).

Penyelesaian Soal 2

(i) Untuk jangka waktu pendek atau kondisi tanpa drainasi (undrained).

- Untuk menghitung besarnya tambahan tegangan, ditinjau tegangan efektif pada titik A.
- Telah dihitung tegangan efektif pada titik A mula-mula $\sigma_A' = 7,86 \text{ t/m}^2$.
- Setelah penurunan muka air sedalam 3 meter :

$$\sigma_A' = 1 \times (2,1 - 1) + 5 \times 1,73 = 9,75 \text{ t/m}^2$$
- Selisih tegangan efektif :

$$\Delta\sigma_A' = 9,75 - 7,86 = 1,89 \text{ t/m}^2$$
- Jadi, segera setelah penurunan muka air, akan terjadi tambahan tekanan air pori sebesar $\Delta u = \Delta\sigma_A' = 1,89 \text{ t/m}^2$.
- Tegangan total pada titik A (dimana $\sigma_A' = 7,86 \text{ t/m}^2$), adalah :

$$\sigma_A = \sigma_A' + (u_o + \Delta u)$$

$$\sigma_A = 7,86 + (4 \times 1 + 1,89) = 13,75 \text{ t/m}^2$$
- Tegangan total pada titik B (dimana $\sigma_B' = 11,46 \text{ t/m}^2$), adalah :

$$\sigma_B = \sigma_B' + (u_o + \Delta u)$$

$$\sigma_B = 11,46 + (10 \times 1 + 1,89) = 23,35 \text{ t/m}^2$$

Penyelesaian Soal 2

(ii) Untuk kondisi jangka panjang atau kondisi dengan drainasi, dianggap kelebihan tekanan air pori = 0.

- Pada keadaan ini, tekanan air pori = tekanan hidrostatiknya, yaitu tekanan air sebesar tinggi muka air tanahnya, sehingga :
 Pada titik A

$$\sigma_A = 5 \gamma_d + 1 \gamma_{\text{sat}} = 5 \times 1,73 + 1 \times 2,1 = 10,75 \text{ t/m}^2$$

$$u_A = 1 \times \gamma_w = 1 \times 1 = 1 \text{ t/m}^2$$

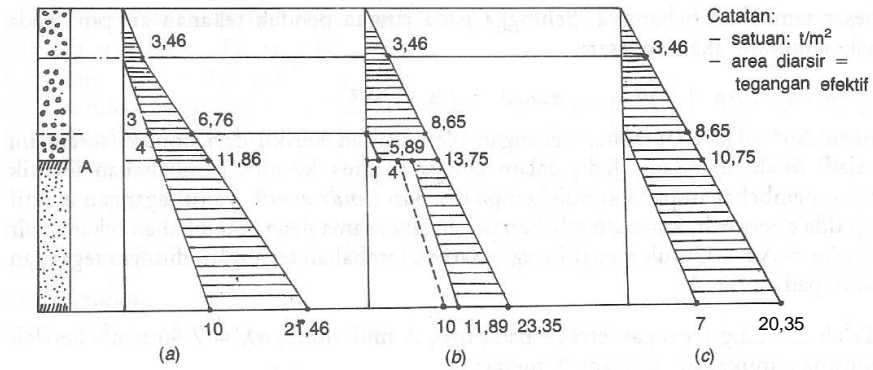
$$\sigma_A' = \sigma_A - u_A = 10,75 - 1 = 9,75 \text{ t/m}^2$$
- Pada titik B

$$\sigma_B = \sigma_A + H_2 \gamma_{\text{sat}} = 10,75 + 6 \times 1,6 = 20,35 \text{ t/m}^2$$

$$u_B = 7 \times \gamma_w = 7 \times 1 = 7 \text{ t/m}^2$$

$$\sigma_B' = \sigma_B - u_B = 20,35 - 7 = 13,35 \text{ t/m}^2$$

Gambar Diagram Tegangan



Gambar C4.3 (a) Kondisi awal sebelum muka air turun.
 (b) Kondisi jangka pendek setelah muka air turun.
 (c) kondisi jangka panjang setelah muka air turun.