

Pertemuan I

I. Tegangan Efektif

I.1 Umum.

Bila tanah mengalami tekanan yang diakibatkan oleh beban maka ;

- Angka pori tanah akan berkurang
- Terjadinya perubahan-perubahan sifat mekanis tanah (tahanan geser meningkat).

Jika tanah berada dalam air, tanah dipengaruhi oleh gaya angkat keatas akibat tekanan hidrostatik. Berat tanah terendam disebut **berat tanah efektif**, sedangkan tegangan yang terjadi disebut **tegangan efektif**.

Segumpal tanah terdiri dari **butiran padat** dan **ruang pori**, ruang pori dapat berisi udara atau air atau keduanya. Bila tanah jenuh sempurna, ruang pori ini terisi penuh dengan air. Besar bidang kontak antar butiran tergantung bentuk dan susunan butiran. Tegangan yang terjadi pada bidang kontak antar butiran dipengaruhi oleh tekanan air pori. Dalam praktek butiran tanah dan air pori dianggap tidak mudah mampat sedang udara mudah sekali mampat. Sifat mudah mampat tanah tergantung pada susunan butiran padat.

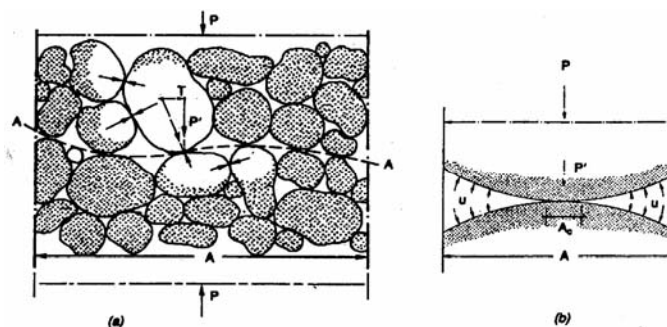
Pengurangan volume tanah terjadi bila ;

- Pada tanah jenuh jika sejumlah air meninggalkan ruang pori.
- Pada tanah kering atau jenuh sebagian jika sejumlah udara terdesak keluar.

Volume tanah secara keseluruhan dapat berubah akibat adanya perubahan susunan butir, sehingga terjadi pula perubahan gaya-gaya yang bekerja pada butiran ;

- Tegangan geser ditahan oleh butiran tanah, yaitu oleh gaya-gaya yang berkembang pada bidang singgung antar butiran.
- Tegangan normal ditahan oleh tanah melalui penambahan gaya antar butirnya.

Luas bidang kontak antar butiran sangat kecil, dimana untuk butiran bulat kontak ini berupa sebuah titik.



Gambar I. 1 Gaya antar butiran (a), kontak antar butir (b)

Terzaghi (1923) memberikan prinsip tegangan efektif pada segumpal tanah, ini hanya berlaku pada tanah jenuh sempurna yaitu ;

- **Tegangan normal total (σ)** yaitu tegangan yang diakibatkan oleh berat tanah total termasuk air pori persatuan luas dengan arah $\perp$.
- **Tekanan air pori (μ)** atau tekanan netral yang bekerja segala arah sama besar , yaitu tekanan air yang mengisi rongga antar butiran padat.
- **Tegangan normal efektif (σ')** yaitu tegangan yang dihasilkan dari beban berat butiran tanah persatuan luas bidangnya.

Hubungan ketiganya adalah ;

$$\sigma = \sigma' + \mu$$

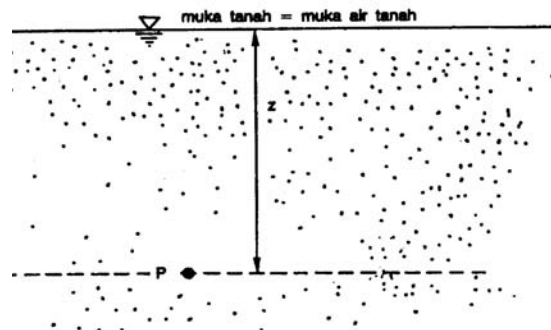
atau

$$\frac{P}{A} = \frac{P'}{A} + \mu$$

Atau tegangan efektif adalah

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Untuk meninjau tegangan efektif akibat berat tanah yang ada di atasnya, perhatikan gambar sebagai berikut dimana muka air tanah dipermukaan tanah ;



Gambar I.2 Tegangan efektif

Tegangan vertikal total (σ_v) yaitu tegangan normal pada bidang horizontal pada kedalaman z sama dengan berat seluruh material (padat + air) persatuan luas.

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

Tekanan air pori (μ) pada sembarang kedalam berupa tekanan hidrostatik karena ruang pori antar butiran saling berhubungan yaitu ;

$$\mu = \gamma_w z$$

Tegangan efektif vertikal (σ_v') pada kedalaman z adalah ;

$$\begin{aligned}\sigma_v' &= \sigma_v - \mu \\ &= \gamma_{sat} z - \gamma_w z \\ &= (\gamma_{sat} - \gamma_w) z \\ &= \gamma' z\end{aligned}$$

Dimana γ' adalah berat volume apung tanah (berat volume efektif atau berat volume terendam).

I.2 Tegangan efektif pada tanah tak jenuh.

Bila tanah tidak jenuh sempurna, maka rongga-rongga tanah akan terisi oleh air dan udara. Tekanan air pori (μ_w) harus lebih kecil dari tegangan yang terjadi dalam udara (μ_a) akibat tarikan permukaan. Karena tanah tidak jenuh, pori udara akan membentuk saluran yang sambung menyambung melalui runang antar butiran, sedangkan air pori terkonsentrasi sekitar kontak antar partikel. Bishop (1955) memberikan persamaan ;

$$\sigma = \sigma' + \mu_a - X(\mu_a - \mu_w)$$

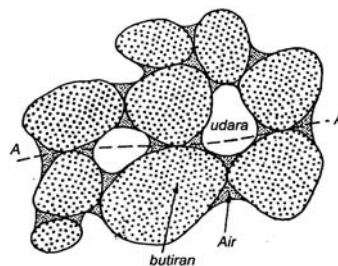
dengan ;

X = parameter yang ditentukan secara eksperimental yang berhubungan langsung dengan derajat kejenuhan tanah.

μ_w = tekanan air dalam ruang pori

μ_a = tekanan udara dalam pori

Tanah jenuh $S = 1$ dan $X = 1$, Tanah kering sempurna $S = 0$ dan $X = 0$

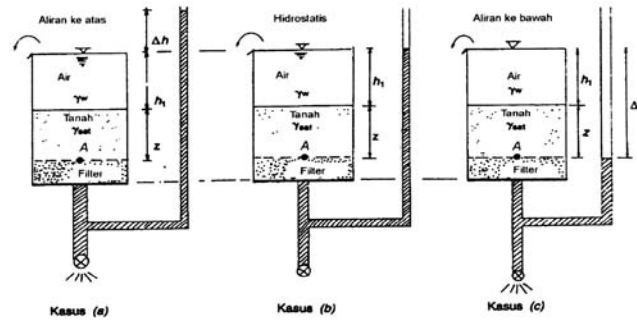


Gambar I.3 Susunan tanah tidak jenuh.

I.3 Pengaruh gaya rembesan pada tegangan efektif.

Jika air mengalir dengan gradien hidrolik tertentu dalam tanah, pengaruh beda tinggi tekanan akan menimbulkan gaya pada butiran tanah. Arah gaya rembesan searah dengan aliran.

Kasus (a) tanah menderita gaya rembesan keatas



Gambar I.4 Tegangan efektif akibat gaya rembesan

Tinjau titik A.

Tegangan total $\sigma = \gamma_w h_1 + \gamma_{sat} z$

Tekanan air pori $\mu = \gamma_w (z + h_1 + \Delta h)$

Tegangan efektif $\sigma' = \sigma - \mu$

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

$$= \gamma_w h_1 + \gamma_{sat} z - \gamma_w z - \gamma_w h_1 - \gamma_w \Delta h$$

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

$$= \gamma'_z - \gamma_w \Delta h$$

Kasus (b). Tidak ada gaya rembesan

Tinjau titik A.

Tegangan total $\sigma = \gamma_w h_1 + \gamma_{sat} z$

Tekanan air pori $\mu = \gamma_w (z + h_1)$

Tegangan efektif $\sigma' = \sigma - \mu$

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

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

$$= (\gamma_{sat} - \gamma_w) z = \gamma'_z$$

Kasus (c). Terjadi aliran air kebawah yang menekan butiran

Tinjau titik A.

Tegangan total $\sigma = \gamma_w h_1 + \gamma_{sat} z$

Tekanan air pori $\mu = 0$

Tegangan efektif $\sigma' = \sigma - \mu$

$$= \gamma_w h_1 + \gamma_{sat} z - 0$$

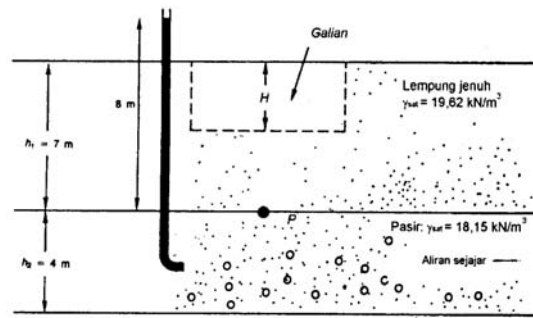
$$= \gamma_w h_1 + \gamma_{sat} z$$

Terlihat bahwa jika aliran air ke bawah maka tegangan efektif meningkat.

I.4 Contoh-contoh soal.

Soal – 1

Tebal lapisan lempung 7 m terletak diatas tanah pasir dengan ketebalan 4 m (**Gambar C.I.1**).



Gambar C. I.1

Dalam lapisan pasir terdapat tekanan artesis 8 m, lapisan lempung dianggap jenuh sempurna ;

- Hitung tegangan efektif di titik P yang berada di dasar lempung
- Hitung kedalaman galian maksimum pada tanah lempung agar tanah tidak mengalami bahaya mengapung (runtuh).

Penyelesaian ;

- Perhatikan titik P pada dasar lempung

Tegangan vertikal total (σ) yang diakibatkan oleh berat lempung jenuh ($\downarrow$) adalah ;

$$\begin{aligned}\sigma_p &= \gamma_{sat} \cdot h_1 \\ &= 19,62 \cdot 7 \\ &= 137,34 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Tekanan air pori akibat tekanan artesis setinggi 8 m ($\uparrow$) adalah ;

$$\begin{aligned}\mu_p &= \gamma_w \cdot 8 \\ &= 9,81 \cdot 8 \\ &= 78,48 \text{ kN/m}^3.\end{aligned}$$

Tegangan efektif dititik P adalah ;

$$\begin{aligned}\sigma'_p &= \sigma_p - \mu_p \\ &= 137,34 - 78,48 \\ &= 58,86 \text{ kN/m}^2.\end{aligned}$$

b. Misalkan kedalaman galian yang dimaksud adalah H meter, maka akibat galian sedalam H tersebut maka ;

Tegangan vertikal total (σ) yang diakibatkan oleh berat lempung jenuh ($\downarrow$) adalah ;

$$\begin{aligned}\sigma_p &= \gamma_{sat} \cdot (h_1 - H) \\ &= 19,62 (7 - H)\end{aligned}$$

Tekanan air pori akibat tekanan artesis setinggi 8 m ($\uparrow$) adalah ;

$$\mu_p = 78,48 \text{ kN/m}^2 \text{ (perhitungan diatas)}$$

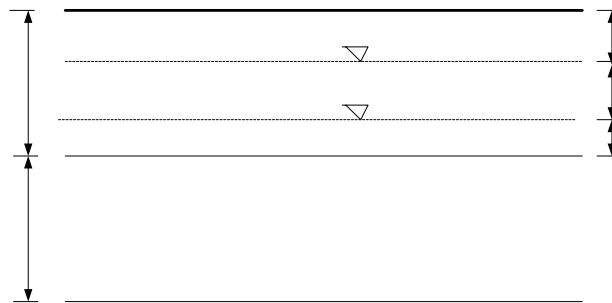
Keseimbangan dititik P maka $\sigma'_p = 0$, maka

$$\begin{aligned}0 &= \sigma_p - \mu_p \\ &= 19,62 (7 - H) - 78,48 \\ 0 &= 137,34 - 19,62 H - 78,48 \\ 19,62 H &= 58,86 \\ H &= 3 \text{ m}\end{aligned}$$

Jadi dalamnya galian maksimum agar tanah tidak terangkat adalah 3 m

Soal – 2

Kondisi tanah dan air tanah seperti tergambar,



- Tentukan tegangan efektif pada titik A dan titik B pada kondisi muka air tanah mat (a) , dan gambarkan diagramnya
- Jika muka air tanah turun mendadak dari mat (a) ke mat (b), hitung tegangan total dan tegangan efektif pada titik A dan titik B untuk jangka waktu pendek dan jangka waktu panjang dan gambarkan diagramnya

Penyelesaian ;

a. Kondisi muka air tanah di mat (a)

Kerikil

$$e = \frac{n}{1-n} = \frac{0,35}{1-0,35} = 0,54$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = \frac{2,66 \times 9,81}{1+0,54} = \frac{26,0946}{1,54} = 16,95 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \gamma_w = \frac{2,66 + 0,54}{1+0,54} \times 9,81 = \frac{3,2}{1,54} \times 9,81 = 20,38 \text{ kN/m}^3$$

Pada titik A

$$\begin{aligned} \sigma_A &= \sigma_d \cdot h_1 + \sigma_{sat} \cdot (h_2 + 1) \\ &= 16,95 \times 2 + 20,38 \times (3 + 1) \\ &= 33,9 + 81,52 = 115,42 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_A &= \gamma_w \cdot (h_2 + 1) \\ &= 9,81 \times (3 + 1) = 39,24 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

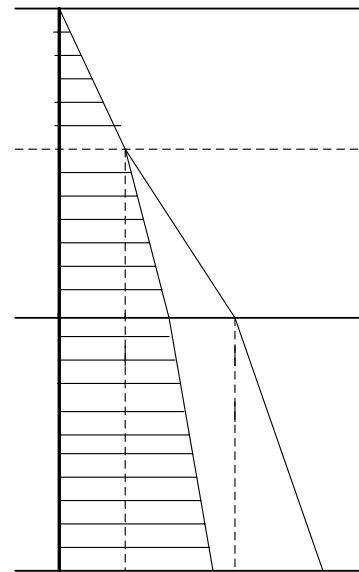
$$\begin{aligned} \sigma'_A &= \sigma_A - \mu_A = 115,42 - 39,24 \\ &= 76,18 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Pada titik B

$$\begin{aligned} \sigma_B &= \sigma_A + \sigma_{sat} \cdot H_2 \\ &= 115,42 + 20,38 \times 6 \\ &= 209,62 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_B &= \mu_A + \gamma_w \cdot H_2 \\ &= 39,24 + 9,81 \times 6 = 98,1 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_B &= \sigma_B - \mu_B = 209,62 - 98,1 \\ &= 111,52 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$



Area yang diarsir adalah tegangan efektif

b. Muka air tanah turun mendadak dari mat (a) ke mat (b)

b.1 Jangka pendek atau kondisi tak terdrainase (*undrained*), turunnya muka air tanah pada tanah kerikil akan menambah beban oleh lapisan kerikil, yang tadinya terendam menjadi tidak terendam, kerikil diatas muka air tanah dianggap kering.

Oleh karena tanah lempung mempunyai permeabilitas yang relatif kecil, sehingga dalam $t = 0$ belum ada penghamburan air pori pada lapisan lempung, sehingga dalam jangka pendek tekanan air pori pada lempung adalah ;

$$\mu_A = \mu_A (\text{awal}) + \Delta\mu \text{ dan } \mu_B = \mu_B (\text{awal}) + \Delta\mu \text{ dimana } \Delta\mu = \Delta\sigma'$$

$$\sigma_A = \sigma'_A (\text{awal}) + \mu_A \text{ dan } \sigma_B = \sigma'_B (\text{awal}) + \mu_B$$

Pada titik A

$$\begin{aligned}\sigma_A &= \gamma_d \cdot (h_1 + h_2) + \gamma_{sat} \cdot (1) \\ &= 16,95 \times 5 + 20,38 \times (1) \\ &= 84,75 + 20,38 = 105,13 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_A &= \gamma_w \cdot (1) \\ &= 9,81 \times (1) = 9,81 \text{ kN/m}^2.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma'_A &= \sigma_A - \mu_A = 105,13 - 9,81 \\ &= 95,32 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Selisih tegangan efektif sebelum dan sesudah muka air turun ;

$$\Delta\sigma'_A = 95,32 - 76,18 = 19,14 \text{ kN/m}^2.$$

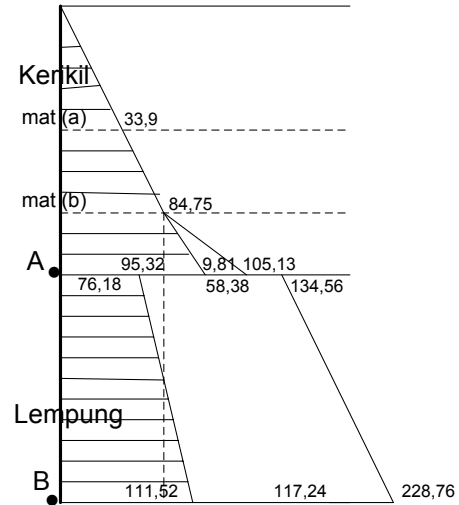
$$\mu_A = 39,24 + 19,14 = 58,38 \text{ kN/m}^2.$$

$$\sigma_A = 76,18 + 58,38 = 134,56 \text{ kN/m}^2.$$

Pada titik B.

$$\mu_B = 98,1 + 19,14 = 117,24 \text{ kN/m}^2.$$

$$\sigma_B = 111,52 + 117,24 = 228,76 \text{ kN/m}^2.$$



Area yang diarsir adalah tegangan efektif

b.2 Jangka panjang atau kondisi terdrainase (drained)

Pada waktu jangka panjang kelebihan tekanan air pori = 0, sehingga pada kondisi ini tekanan air pori sama dengan tekanan hidrostatik (tinggi muka air tanahnya).

Pada titik A

$$\begin{aligned}\sigma_A &= \gamma_d \cdot (h_1 + h_2) + \gamma_{sat} \cdot (1) \\ &= 16,95 \times 5 + 20,38 \times (1) \\ &= 84,75 + 20,38 = 105,13 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\mu_A &= \gamma_w \cdot (1) \\ &= 9,81 \times (1) = 9,81 \text{ kN/m}^2.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma'_A &= \sigma_A - \mu_A = 105,13 - 9,81 \\ &= 95,32 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

Pada titik B

$$\begin{aligned}\sigma_B &= \gamma_d \cdot (h_1 + h_2) + \gamma_{sat} \cdot (1) + \gamma_{sat} \cdot \text{lpg}(H_2) \\ &= 16,95 \times 5 + 20,38 \times 1 + 15,7 \times 6 \\ &= 84,75 + 20,38 + 94,2 \\ &= 199,33 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

$$\mu_B = \gamma_w \cdot (1 + 6) = 9,81 \times 7 = 68,67 \text{ kN/m}^2$$

$$\begin{aligned}\sigma'_B &= \sigma_B - \mu_B = 199,33 - 68,67 \\ &= 130,66 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

