

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Umum

Bangunan teknik sipil yang khusus untuk menahan gaya lateral adalah dinding penahan tanah. Gaya lateral adalah tekanan tanah arah horisontal yang disebabkan oleh massa tanah dalam keadaan diam atau bergerak. Dalam keadaan bergerak tanah menuju pada keruntuhan plastis yaitu kondisi dimana setiap titik dalam tanah menuju keruntuhan. Pada kondisi keruntuhan plastis tanah menghasilkan tekanan aktif dan pasif.

Teori yang mencari besarnya tekanan tanah lateral antara lain adalah teori Rankine dan Coulomb. Kedua teori ini memperhitungkan gaya lateral dengan asumsi yang berbeda, yang tentunya akan menghasilkan besar gaya lateral yang berbeda.

3.2 Teori Coulomb

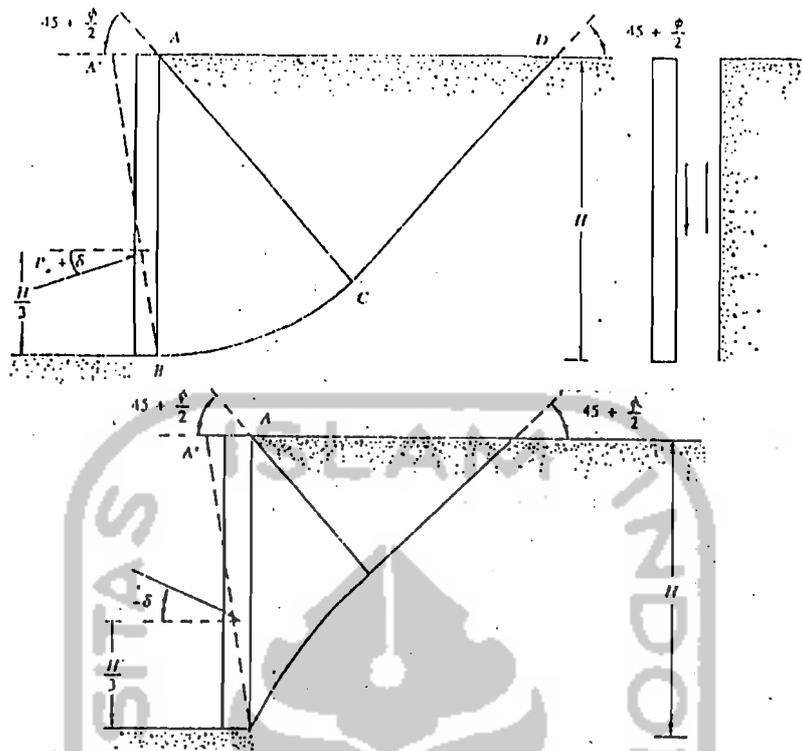
Pada tahun 1776 dikemukakan teori tentang tekanan tanah lateral yang pertama kali oleh Coulomb. Coulomb menganalisa segitiga keruntuhan tanah untuk mendapatkan koefisien tekanan tanah aktif dan pasif. Untuk memudahkan perhitungannya tanah dianggap ideal dan permukaan runtuh adalah garis lurus. Lebih jelasnya dapat dilihat pada uraian berikut.

3.2.1 Sudut Gesek Antara Dinding dan Tanah

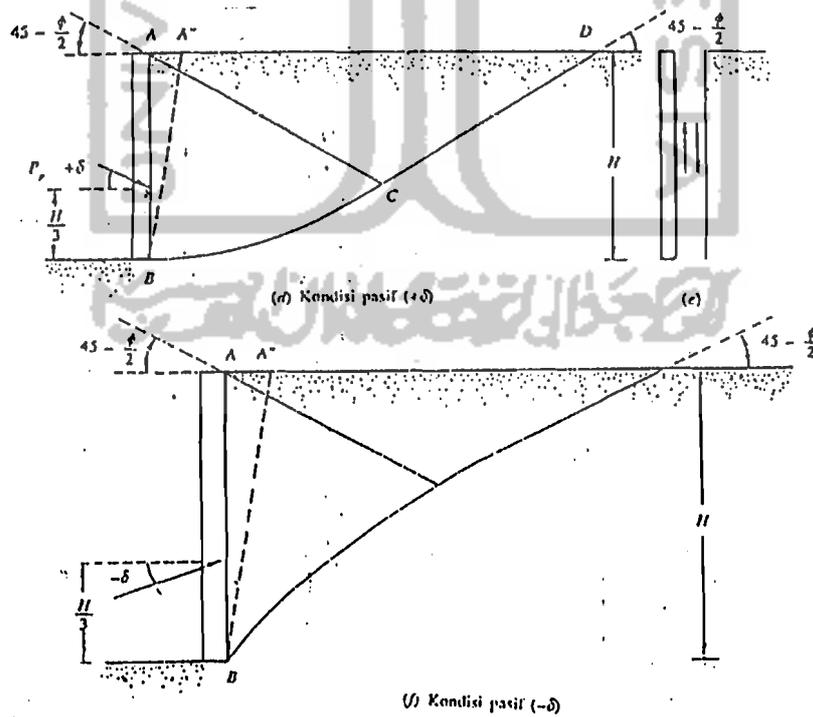
Dalam kenyataannya permukaan dinding penahan tanah adalah kasar dan terjadi geseran antara dinding dengan tanah. Coulomb mengaplikasikannya dengan sudut geser tanah antara dinding dan tanah (δ). Akibat dari sudut geser ini bidang runtuh menjadi melengkung. Gaya resultan yang ada akan bekerja dengan kemiringan sebesar sudut δ terhadap bidang normal.

Pada kondisi aktif yaitu ketika dinding bergerak keluar, maka tanah akan bergerak ke arah bawah terhadap tembok, sehingga menimbulkan sudut geser positif ($\delta+$) dengan perilaku bidang runtuh seperti pada gambar 3.1 (a). Pada kondisi tertentu apabila dinding tertekan ke bawah akibat beban yang sangat berat maka sudut geser akan menjadi negatif ($\delta-$) dengan bidang runtuh melengkung ke arah dinding.

Pada kondisi pasif yaitu ketika dinding bergerak ke arah tanah urugan, akibatnya tanah tertekan dan bergeser ke arah atas pada dinding, sehingga menimbulkan sudut geser positif ($\delta+$) dengan bidang runtuh melengkung ke arah menjauhi dinding, dapat dilihat pada gambar 3.2 (a). Apabila dinding tertekan ke bawah oleh beban yang sangat berat maka sudut geser menjadi negatif ($\delta-$) dengan perilaku bidang runtuh seperti pada gambar 3.2 (b).



Gambar 3.1 Sudut geser pada kondisi aktif dan perilaku bidang runtuh. (Sumber: Braja.M.Das, Mekanika Tanah)



Gambar 3.2 Sudut geser pada kondisi pasif dan perilaku bidang runtuh. (Sumber : Braja.M.Das, Mekanika Tanah)

Untuk pertimbangan praktis apabila tanah urugan adalah tanah berbutir lepas sudut geser diambil sama dengan sudut geser dalam tanah ϕ . Untuk tanah berbutir padat, δ diambil lebih kecil dari ϕ berkisar antara $\phi/3$ sampai $2\phi/3$.

3.2.2 Tekanan Tanah Aktif dan Pasif Coulomb

Teori tekanan tanah lateral oleh Coulomb (1776) memperhatikan adanya pengaruh gesekan antara tanah urugan dengan dinding penahannya. Akibat adanya gesekan itu bentuk bidang longsor menjadi melengkung dekat dasar kaki dinding, baik yang berupa tekanan tanah aktif maupun pasif. Anggapan-anggapan dasar didalam teori tekanan tanah lateral Coulomb adalah sebagai berikut :

1. Tanah adalah isotropik dan homogen.
2. Bidang longsor dan permukaan tanah urug adalah bidang rata. Hal ini dilakukan untuk memudahkan dalam perhitungan.
3. Gaya-gaya gesekan didistribusi merata sepanjang bidang longsor yang rata dan $f = \tan \phi$.
4. Baji keruntuhan adalah sebuah benda tegar yang merupakan satu kesatuan.
5. Memperhitungkan gesekan dinding yang ditimbulkan oleh pergerakan baji keruntuhan disepanjang bagian belakang dinding.
6. Keruntuhan adalah suatu persoalan peregangan bidang.

Dari persamaan (3-2) dapat dilihat bahwa harga $P_a = f(\rho)$ artinya harga selain sudut ρ adalah konstan, dan harga P_a yang paling diperlukan adalah harga yang sebesar mungkin, dengan mensubstitusikan persamaan (3-1) ke (3-2) didapat

$$P_a = \frac{\tau \cdot H^2}{2 \cdot \sin^2 \alpha} \left[\frac{\sin(\alpha + \rho)}{\sin(\rho - \beta)} \right] \left[\frac{\sin(\rho - \phi)}{\sin(180 - \alpha - \rho + \phi + \delta)} \right] \quad (3-3)$$

Dengan membuat turunan pertama sama dengan nol,

$$dP_a/d\rho = 0$$

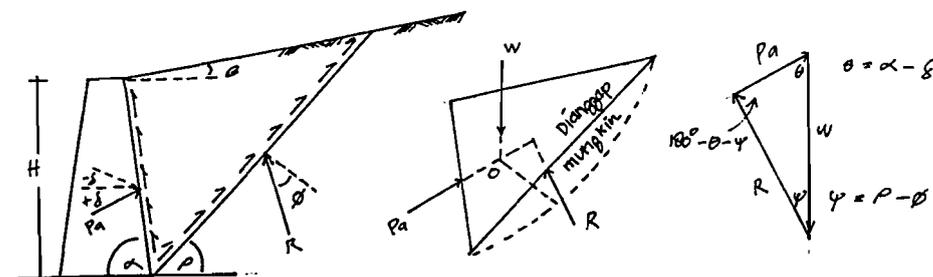
harga maksimum daripada gaya dinding aktif P_a diperoleh sebesar,

$$P_a = \frac{\tau \cdot H^2 \sin^2(\alpha + \phi)}{2 \sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (3-4)$$

Jika $\beta = \delta = 0$ dan $\alpha = 90^\circ$ (untuk sebuah dinding vertikal licin yang mempunyai urugan horisontal), maka persamaan (3-4) akan disederhanakan menjadi

$$P_a = \frac{\tau \cdot H^2 (1 - \sin \phi)}{2 (1 + \sin \phi)} = \frac{\tau \cdot H^2}{2} \tan^2(45 - \phi/2) \quad (3-5)$$

yang juga merupakan persamaan Rankine untuk tekanan tanah aktif.



Gambar 3-4:

(a) Kondisi-kondisi untuk kegagalan, (b) Menunjukkan bahwa gaya-gaya resultan tidak melalui titik o maka kesetimbangan statik tidak dipenuhi, (c) Segitiga gaya untuk menghasilkan P_a . (Sumber: Joseph. E. Bowles, Analisa dan Disain Pondasi)

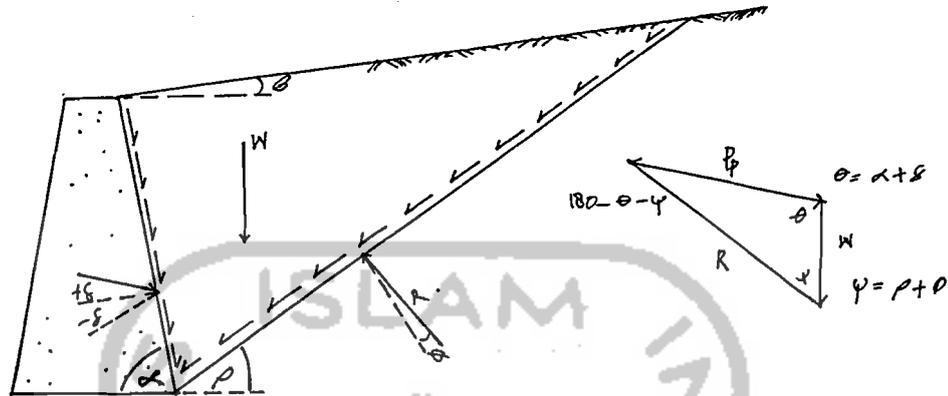
Persamaan (3-5) mempunyai bentuk umum

$$P_a = \frac{\tau \cdot H^2}{2} K_a \quad \text{dengan} \quad (3-6)$$

$$K_a = \frac{\sin^2(\alpha + \phi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\alpha - \delta) \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2}$$

dan merupakan sebuah koefisien yang mengandung α , β , δ dan ϕ , akan tetapi tak tergantung pada τ dan H .

Tekanan tanah pasif diturunkan dengan cara yang serupa kecuali bahwa inklinasi pada dinding dan segitiga gaya yang bersangkutan akan diperlihatkan seperti didalam gambar 3-5.



Gambar 3-5:

(a) Baji kegagalan dan gaya-gaya yang bekerja untuk tekanan pasif
 (b) Poligon gaya untuk perhitungan tekanan pasif.
 (Sumber: Joseph. E. Bowles, Analisa dan Disain Pondasi)

Dari gambar 3-5 terlihat bahwa massa kegagalan yang dianggap adalah

$$W = \frac{\tau \cdot H^2}{2} \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\rho - \beta)} \quad (3-7)$$

dan dengan menggunakan hukum sinus maka dari segi tiga gaya diperoleh

$$P_p = W \frac{\sin(\rho + \phi)}{\sin(180 - \rho - \phi - \delta - \alpha)} \quad (3-8)$$

Dengan membuat turunan $dP_p/d\rho = 0$ maka diperoleh harga minimum daripada P_p sebagai

$$P_p = \frac{\tau \cdot H^2}{2} \frac{\sin^2(\alpha - \phi)}{\sin^2 \alpha \cdot \sin(\alpha + \delta) \left[1 - \sqrt{\left[\frac{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin(\phi + \beta)}{\sin(\alpha + \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)} \right]^2} \right]} \quad (3-9)$$

Untuk sebuah dinding vertikal licin yang mempunyai urugan kembali horisontal ($\delta=\beta=0$ dan $\alpha=90^\circ$) maka persamaan (3-9) akan disederhanakan menjadi

$$P_p = \frac{\tau \cdot H^2}{2} \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} = \frac{\tau \cdot H^2}{2} \tan^2(45+\phi/2) \quad (3-10)$$

Persamaan (3-9) dapat juga ditulis sebagai

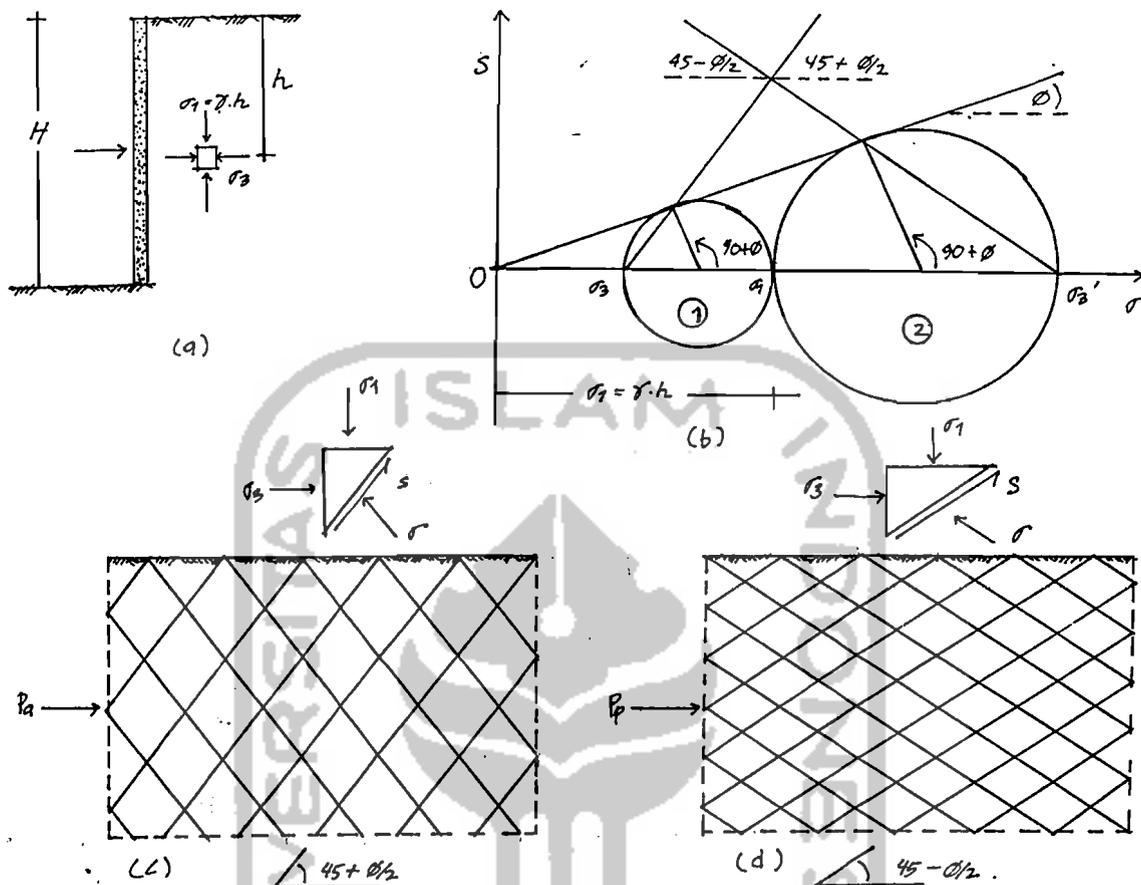
$$P_p = \frac{\tau H^2}{2} K_p \quad \text{dengan}$$

$$K_p = \frac{\sin^2(\alpha-\phi)}{\sin^2\alpha \cdot \sin(\alpha+\delta) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi+\delta)\sin(\phi+\beta)}{\sin(\alpha+\delta)\sin(\alpha+\beta)}} \right]^2} \quad (3-11)$$

3.3 Teori Rankine

Rankine (1857) menyelidiki keadaan tegangan didalam tanah yang berada pada kondisi keseimbangan plastis yaitu suatu keadaan yang menyebabkan tiap-tiap titik didalam massa tanah menuju proses ke suatu keadaan runtuh. Pada dasarnya anggapan-anggapan yang digunakan sama dengan Coulomb kecuali bahwa Rankine menganggap tidak ada kohesi dan gesekan pada dinding guna menyederhanakan persoalan pada analisisnya.

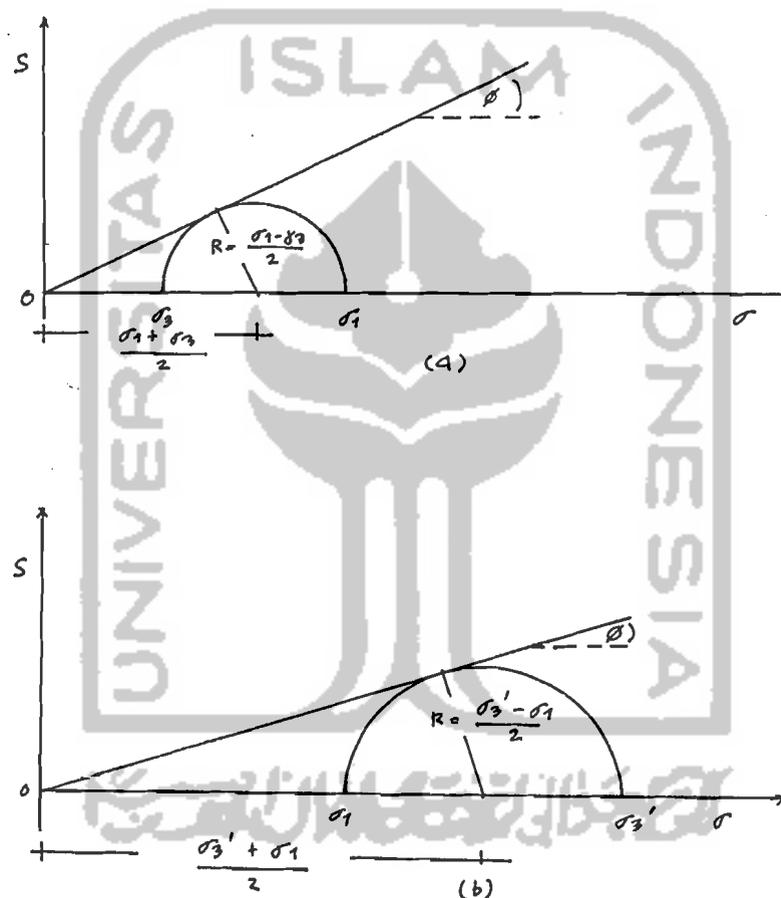
Dalam uraiannya dibedakan menjadi dua keadaan yaitu tekanan tanah aktif dan pasif dengan koefisien yang berbeda. Nilai banding tekanan horisontal dan vertikal tanah yang ada di belakang disebut koefisien tekanan tanah aktif sedang yang ada di depannya disebut koefisien tekanan tanah pasif.



Gambar 3-6 (a) Elemen dalam tanah
 (b) Lingkaran Mohr untuk aktif(1) dan pasif (2)
 (c) Garis keruntuhan untuk kondisi aktif
 (d) Garis keruntuhan untuk kondisi pasif
 (Sumber: John. N. Cernica, Geotechnical Engineering)

Konsep dasar teori Rankine bisa digambarkan lewat lingkaran Mohr. Pada kedalaman tertentu h nilai tegangan vertikal suatu titik adalah $\sigma_1 = \gamma h$ dan tegangan horisontal σ_3 . Jika dinding bergerak ke luar dari tanah urugan akan mengakibatkan tegangan aktif. Nilai σ_1 akan menjadi tegangan utama mayor dan σ_3 akan menjadi tegangan utama minor. Hubungannya dengan lingkaran Mohr dapat digambarkan dalam gambar 3-6b lingkaran 1. Pada keadaan lain jika

dinding bergerak kedalam kearah tanah urugan akan mengakibatkan tegangan pasif dimana tegangan vertikal σ_1 akan menjadi tegangan utama minor dan σ_3 akan menjadi tegangan utama mayor. Lingkaran Mohr untuk kondisi ini akan ditunjukkan pada gambar 3-6b lingkaran 2.



Gambar 3-7:
Lingkaran Mohr untuk kondisi aktif dan pasif pada tanah non kohesif, permukaan datar dengan kedalaman h , (a) kondisi aktif (b) kondisi pasif

Dari lingkaran Mohr 3-7a akan didapatkan persamaan

$$\sin \phi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{(\sigma_1 + \sigma_3)/2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tau \cdot h \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (a)$$

$$(1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi) = \tan^2 (45 - \phi / 2)$$

maka persamaan (a) menjadi

$$\sigma_3 = \tau \cdot h \tan^2 (45 - \phi / 2) \quad (3-12)$$

untuk kasus pasif gambar 3-7b didapat persamaan

$$\sin \phi = \frac{(\sigma'_3 - \sigma_1) / 2}{(\sigma'_3 + \sigma_1) / 2} = \frac{\sigma'_3 - \sigma_1}{\sigma'_3 + \sigma_1}$$

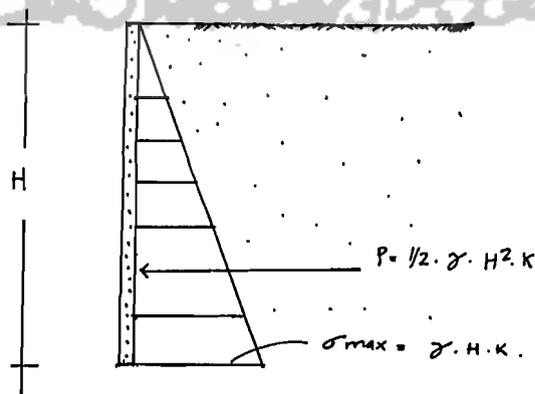
$$\sigma'_3 = \sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = \tau \cdot h \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (b)$$

$$(1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) = \tan^2 (45 + \phi / 2)$$

maka persamaan (b) menjadi

$$\sigma_3 = \tau \cdot h \tan^2 (45 + \phi / 2) \quad (3-13)$$

Nilai $\tan^2 (45 - \phi / 2)$ dan $\tan^2 (45 + \phi / 2)$ adalah konstan untuk nilai ϕ yang konstan. Hubungan antara tekanan melawan dinding penahan adalah linier terhadap kedalaman, semakin dalam maka nilai tekanan tanah semakin besar membentuk bidang segitiga, seperti ditunjukkan pada gambar 3-8.



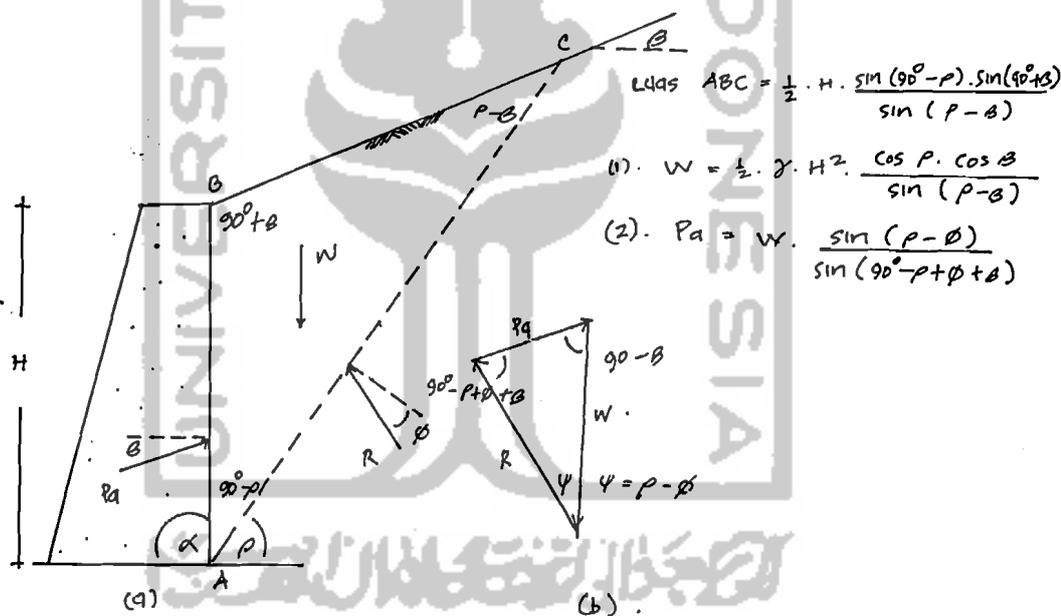
Gambar 3-8 Distribusi tekanan tanah.

Nilai resultante tekanan aktif dan pasif bisa dihitung untuk persamaan panjang dinding penahan.

$$P_a = 0,5 \cdot \tau \cdot H^2 \cdot \tan^2 (45 - \phi/2) = 0,5 \cdot \tau \cdot H^2 \cdot K_a \quad (3-14)$$

$$P_p = 0,5 \cdot \tau \cdot H^2 \cdot \tan^2 (45 + \phi/2) = 0,5 \cdot \tau \cdot H^2 \cdot K_p \quad (3-15)$$

Bila dinding licin ($\delta=0$) dan permukaan tanah yang ada dibelakang mempunyai kemiringan dengan sudut sebesar β terhadap horizontalnya, maka gaya yang bekerja sejajar dengan kemiringan permukaan tanah tersebut. Seperti gambar berikut ini



Gambar 3-9 :

(a) Sistem struktur tanah untuk pemecahan Rankine pada $\alpha=90^\circ$.

(b) Segitiga gaya didalam pemecahan Rankine

Dengan mensubstitusikan pers. (1) ke dalam pers. (2) dari gambar 3-9 dan dengan membuat $dP_a/d\beta = 0$ didapatkan untuk P_a ,

$$P_a = \frac{\tau \cdot H^2}{2} \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \phi)}}{\cos \beta + \sqrt{(\cos^2 \beta - \cos^2 \phi)}} = \frac{1}{2} \tau \cdot H^2 \cdot K_a \quad (3-16)$$

dengan

$$K_a = \cos\beta \frac{\cos\beta - \sqrt{(\cos^2\beta - \cos^2\phi)}}{\cos\beta + \sqrt{(\cos^2\beta - \cos^2\phi)}} \quad (3-17)$$

Berdasarkan analogi, maka tekanan pasif untuk pemecahan Rankine didapat sebagai berikut,

$$P_p = \frac{\tau \cdot H^2}{2} \cos\beta \frac{\cos\beta + \sqrt{(\cos^2\beta - \cos^2\phi)}}{\cos\beta - \sqrt{(\cos^2\beta - \cos^2\phi)}} = \frac{1}{2} \tau \cdot H^2 \cdot K_p \quad (3-18)$$

dengan

$$K_p = \cos\beta \frac{\cos\beta + \sqrt{(\cos^2\beta - \cos^2\phi)}}{\cos\beta - \sqrt{(\cos^2\beta - \cos^2\phi)}} \quad (3-19)$$

3.4. Gaya lateral pada tanah kohesif

Tanah yang kohesif dapat mengurangi besar gaya lateral yang terjadi. Lingkaran Mohr dapat digunakan untuk menentukan besar gaya lateral pada dinding akibat tanah urugan yang kohesif dengan nilai tegangan geser

$$s = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

dengan,

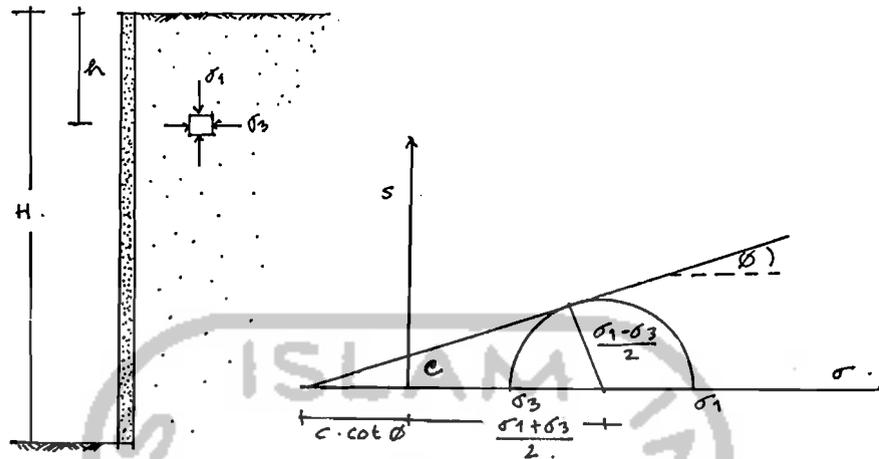
s : tegangan geser (t/m^2)

c : kohesi (t/m^2)

σ : tegangan normal (t/m^2)

ϕ : sudut geser dalam.

Diasumsikan dinding halus vertikal dengan permukaan tanah urugan horisontal. Pada kedalaman h didapat tegangan vertikal $\sigma_1 = \tau h$ dan tegangan horisontal σ_3 . Dengan menggunakan lingkaran Mohr pada gambar 3-10 didapat persamaan,



Gambar 3-10 Tanah urugan berkohesif pada kondisi aktif.

$$\sin \phi = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{(\sigma_1 + \sigma_3)/2 + c \cot \phi} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot \phi}$$

$$\sigma_3 (1 + \sin \phi) = \sigma_1 (1 - \sin \phi) - 2c \sin \phi \cot \phi$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \left[\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right] - 2c \left[\frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} \right] \quad (a)$$

tetapi,

$$\frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} = \frac{\sqrt{(1 - \sin^2 \phi)}}{(1 + \sin \phi)} = \frac{\sqrt{[(1 - \sin \phi)(1 + \sin \phi)]}}{\sqrt{[(1 + \sin \phi)(1 + \sin \phi)]}}$$

atau

$$\frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} = \sqrt{\left[\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right]}$$

maka substitusikan kedalam persamaan (a)

$$\sigma_3 = \sigma_1 \left[\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right] - 2c \sqrt{\left[\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \right]}$$

dengan $\sigma_1 = \tau \cdot h$ dan $(1 - \sin \phi)/(1 + \sin \phi) = \tan^2 (45 - \phi/2)$

maka,

$$\sigma_3 = \tau \cdot h \tan^2(45 - \phi/2) - 2 \cdot c \tan(45 - \phi/2)$$

atau

$$\sigma_3 = \tau \cdot h \cdot K_a - 2 \cdot c \sqrt{K_a} \quad (3-20)$$

Nilai maksimum tegangan horisontal adalah jika $h = H$, maka nilai tekanan tanah lateral aktif P_a adalah

$$P_a = 0,5 \cdot \tau \cdot K_a \cdot H^2 - 2 \cdot c \sqrt{K_a} \cdot H \quad (3-21)$$

Untuk kondisi pasif tegangan utama mayor menjadi tegangan horisontal σ_3 dan tegangan utama minor adalah σ_1 , keadaannya terbalik dari kondisi aktif. Pada gambar lingkaran Mohr posisi σ_1 ditukar dengan σ_3 , maka didapat persamaan,

$$\sin \phi = \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)/2}{(\sigma_1 + \sigma_3)/2 + c \cot \phi} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cot \phi}$$

$$\sigma_3 (1 - \sin \phi) = \sigma_1 (1 + \sin \phi) - 2c \sin \phi \cot \phi$$

$$\sigma_3 = \sigma_1 \left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] - 2c \left[\frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \right] \quad (b)$$

tetapi

$$\frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} = \frac{\sqrt{(1 - \sin^2 \phi)}}{1 - \sin \phi} = \frac{\sqrt{(1 + \sin \phi)}}{\sqrt{(1 - \sin \phi)}}$$

atau

$$\frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} = \sqrt{\left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right]}$$

maka substitusikan kedalam persamaan (b)

$$\sigma_3 = \sigma_1 \left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right] - 2c \sqrt{\left[\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right]}$$

dengan $\sigma_1 = \tau \cdot h$ dan $(1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) = \tan^2 (45 + \phi / 2)$

maka

$$\sigma_3 = \tau \cdot h \tan^2 (45 + \phi / 2) + 2 \cdot c \tan (45 + \phi / 2)$$

atau

$$\sigma_3 = \tau \cdot h \cdot K_p + 2 \cdot c \sqrt{K_p} \quad (3-22)$$

Nilai maksimum tegangan horisontal adalah jika $h = H$,

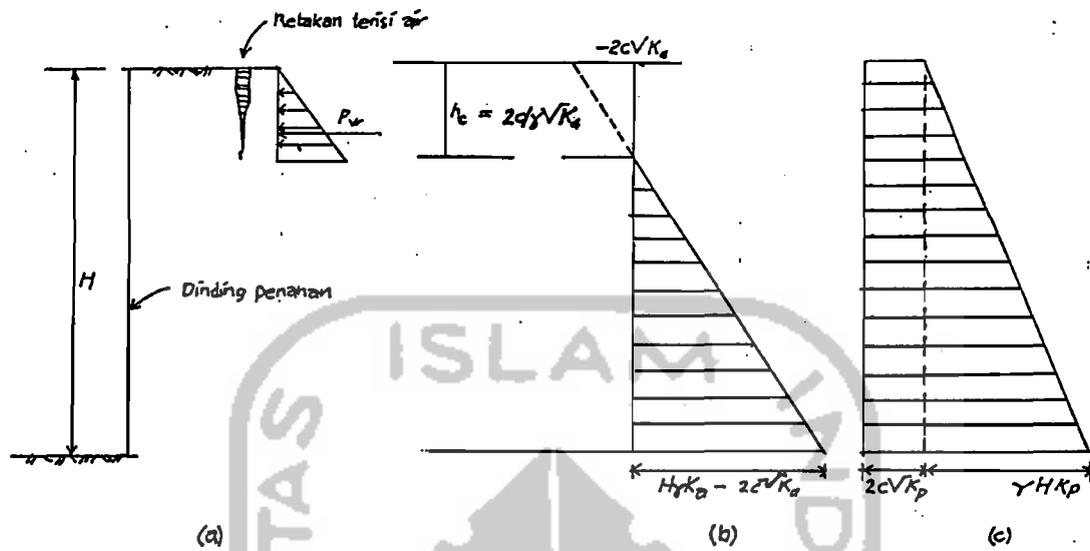
maka nilai tekanan tanah lateral pasif P_p adalah

$$P_p = 0,5 \cdot \tau \cdot K_p \cdot H^2 + 2 \cdot c \sqrt{K_p} \cdot H \quad (3-23)$$

Telah diketahui bahwa persamaan tegangan tanah arah horisontal untuk tekanan tanah aktif adalah $\sigma_3 = \tau \cdot h \cdot K_a - 2c \sqrt{K_a}$, jika $h=0$ maka $\sigma_3 = -2 \cdot c \sqrt{K_a}$ nilai negatif menunjukkan pengertian adanya gaya tarik yang bekerja yang arahnya berlawanan dengan tekanan tanah aktif, dimulai dari kedalaman tertentu h dari permukaan. Kedalaman dimana $P_a=0$ akan memberikan kedalaman retakan tanah urugan akibat gaya tarikan,

$$0 = \tau \cdot h \cdot K_a - 2 \cdot c \sqrt{K_a}, \text{ maka } h = 2 \cdot c / \tau \sqrt{K_a}.$$

Karena tanah mengalami tarikan sampai kedalaman h dari permukaan, pada galian tanah-tanah yang kohesif sering terlihat adanya retakan disepanjang galian. Demikian pula Untuk tekanan tanah pasif, persamaan tegangan tanah horisontal adalah $\sigma_3 = \tau \cdot H \cdot K_a + 2 \cdot c \sqrt{K_a}$, jika $h=0$ maka $\sigma_3 = 2 \cdot c \sqrt{K_p}$, nilai positif menunjukkan bahwa gaya tarikan oleh tanah kohesif memberikan tambahan untuk tekanan tanah pasif karena arahnya searah dengan tekanan tanah pasif. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3-11 Galian pada tanah kohesif,
 (a) Pengaruh retakan yang terisi air
 (b) Diagram tekanan tanah aktif secara teoritis
 (c) Diagram tekanan pasif
 (Sumber: Hary Christady.H, Mekanika Tanah)