

# 6

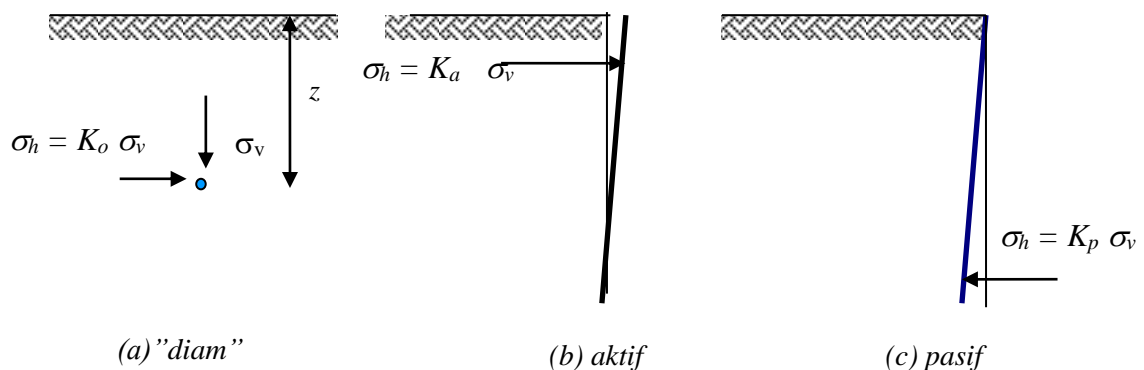
## Tekanan Tanah Lateral

### Pendahuluan

Dalam perencanaan penahan tanah seperti dinding penahan, dinding ruang bawah tanah (basement), abutmen jembatan dan lain lain, adalah sangat penting mengetahui dengan tepat besarnya tekanan lateral atau tekanan horizontal yang akan bekerja terhadap dinding tersebut. Tekanan lateral pada suatu titik hdi dalam tanah umumnya lebih kecil dari tekanan vertical, dan rasio antara tekanan lateral terhadap tekanan vertical disebut koefisien tekanan tanah lateral atau dinyatakan sebagai  $K$ .

Besarnya koefisien tekanan tanah lateral dan sebaran tekanan tanah lateral pada dinding tergantung dari beberapa faktor yaitu: sifat fisik tanah, kuat geser tanah, interaksi antara tanah dan struktur, karakteristik deformasi material pembentuk dinding. Juga dipengaruhi oleh tipe dan geometri struktur yang akan mengntrol pergerakan dinding penahan tanah, serta oleh beban beban luar yang berkerja pada dinding penahan tanah.

Dalah hubungannya dengan interaksi tanah-struktur dan karaketristik deformasi; tekanan tanah lateral dikategorikan menjadi tiga kondisi seperti diperlihatkan pada Gambar 6.1:



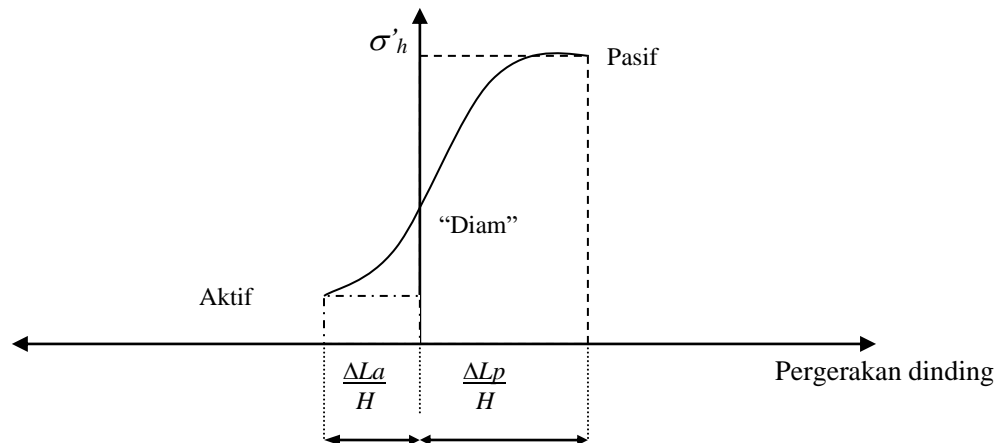
Gambar 6.1 Tiga kondisi tekanan tanah lateral

Tekanan tanah “at-rest” atau “diam” menggambarkan kondisi dimana tanah dihalangi untuk bergerak dalam arah horizontal (oleh tanah disekitarnya atau oleh dinding yang sangat kuat) sehingga tanah berada dalam kondisi kesetimbangan statis. Koefisien tekanan tanah lateral dalam kondisi “diam” dinyatakan sebagai  $K_o$ .

Pada kenyataannya, elemen tanah yang berada di belakang dinding penahan tanah akan bergerak dan mencapai kondisi aktif atau pasif. Kondisi aktif terjadi apabila elemen tanah tersebut bergerak menjauhi tanah. Apabila pergerakan cukup besar, maka akan terbentuk bidang gelincir dalam massa tanah sehingga tanah bergerak ke depan dan ke bawah. Tekanan yang terbentuk disebut tekanan tanah aktif  $\sigma_a = \sigma_v' K_a$ . Sebaliknya bila elemen tanah bergerak mendekati tanah, maka dinding bergerak mendorong ke arah tanah. Tekanan yang terbentuk disebut tekanan tanah pasif  $\sigma_p = \sigma_v' K_p$ .

Tabel 6.1 memperlihatkan besarnya pergerakan yang diperlukan untuk mencapai kondisi aktif dan pasif.

Tabel 6.1 Pergerakan dinding yang diperlukan untuk mencapai kondisi aktif dan pasif.



Jenis tanah	Kondisi aktif	Kondisi pasif
	$\frac{\Delta L_a}{H}$	$\frac{\Delta L_p}{H}$
Pasir padat	0.001	0.020
Pasir longgar	0.004	0.060
Lempung kaku	0.010	0.020
Lempung lunak	0.020	0.040

## Tekanan tanah "DIAM"

To analyze the lateral earth pressure at rest, we need to consider an element of soil at depth  $z$  as shown in Figure 3.2a. The soil element is confined by the surrounding soil, so it cannot deform laterally due to vertical effective pressure  $\sigma_v'$ . In this case, a lateral pressure was developed and it is defined as

$$\sigma_h' = \sigma_v' K_o \quad (6.1)$$

atau

$$K_o = \frac{\sigma_h'}{\sigma_v'}$$

Berdasarkan penelitian, nilai  $K_o$  berkisar antara 0.40 – 0.50 untuk pasir, 0.35 – 0.70 untuk lempung terkonsolidasi normal atau lempung NC, dan 0.50 – 3.00 untuk lempung yang telah mengalami konsolidasi sebelumnya (disebut lempung over-consolidated atau lempung OC)

Untuk tanah butiran, koefisien tekanan tanah "diam" dapat dihitung menggunakan persamaan empiris (Jaky, 1944):

$$K_o = 1 - \sin \phi' \quad (6.2)$$

dimana  $\phi'$  adalah sudut geser dalam tanah dalam kondisi efektif. Brooker dan Ireland (1965) menyarankan persamaan berikut untuk tanah lembung yang belum pernah terkonsolidasi sebelumnya (*normally consolidated*):

$$K_o = 0.95 - \sin \phi' \quad (6.3)$$

Alpan (1967) juga memberikan suatu persamaan empiris untuk  $K_o$  dalam hubungannya dengan Index plastisitas):

$$K_o = 0.19 + 0.233 \log (PI) \quad (6.4)$$

dimana PI adalah index plastisitas tanah. Rumus empiris lainnya diajukan oleh Mayne dan Kulhawy (1982):

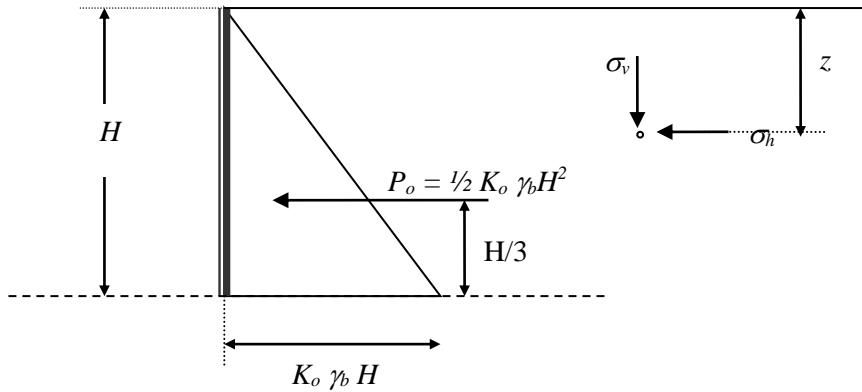
$$K_o = 0.4 + 0.007 (PI) \quad \text{for } 0 < PI < 40 \quad (6.5a)$$

$$K_o = 0.64 + 0.001 (PI) \quad \text{for } 40 < PI < 80 \quad (6.5b)$$

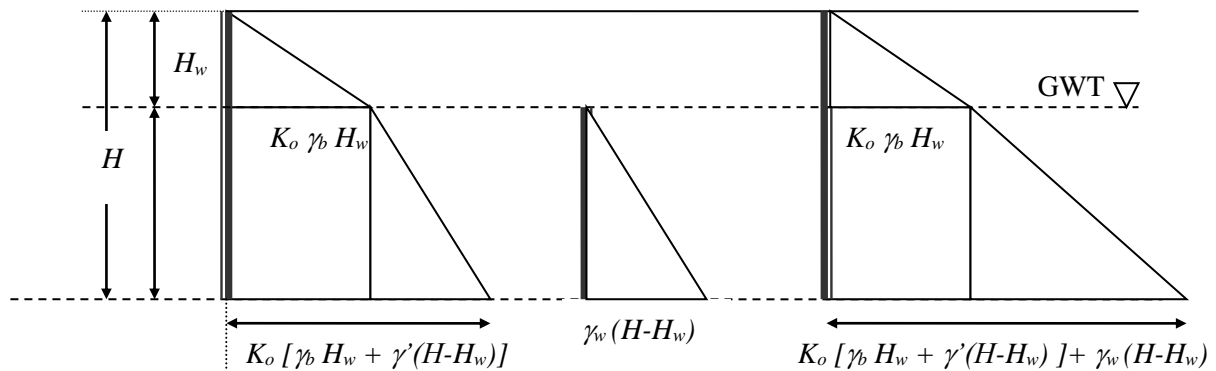
Distribusi tekanan tanah lateral pada dinding sama dengan distribusi tekanan tanah vertical, sehingga sebaran tekanan lateral dapat diperlihatkan pada Gambar 6.2 :

$$P_o = \frac{1}{2} K_o \gamma_b H^2 \quad (6.6)$$

Bila terdapat muka air tanah di bawah muka tanah seperti diperlihatkan pada Gambar 6.2b maka sebaran tekanan tanah lateral akan dipengaruhi oleh tekanan air. Kita tahu bahwa tekanan air adalah sama ke segala arah, maka tekanan horizontal yang di akibatkan oleh adanya dalam arah horizontal sama dengan tekanan dalam arah vertical.



(a) Tidak ada muka air tanah



(b) Muka air tanah pada kedalaman  $H_w$

Figure 6.2 Sebaran tekanan lateral di belakang dinding penahan tanah

Tekanan vertikal dan horizontal di atas muka air tanah pada kedalaman  $z$  adalah:

$$\sigma_v' = \gamma_b z$$

$$\sigma_h' = K_o \sigma_v' = K_o \gamma_b z$$

Tekanan air pori pada kedalaman  $z$  di bawah muka air tanah adalah:

$$\mu = \gamma_w (z - H_w) \tag{6.7}$$

Tekanan total vertikal pada kedalaman  $z$  di bawah muka air tanah adalah:

$$\sigma_v = \gamma_b H_w + \gamma_{sat} (z - H_w)$$

Dan tekanan efektif pada kedalaman tersebut adalah :

$$\sigma_v' = \gamma_b H_w + \gamma_{sat} (z - H_w) - \gamma_w (z - H_w)$$

atau 
$$\sigma_v' = \gamma_b H_w + \gamma' (z - H_w) \quad (6.8)$$

Tekanan efektif lateral pada kedalaman  $z$  di bawah muka air tanah adalah:

$$\sigma_h' = K_o \sigma_v' = K_o (\gamma_b H_w + \gamma' (z - H_w)) \quad (6.9)$$

Dan tekanan lateral total adalah

$$\sigma_h = K_o \sigma_v = K_o (\gamma_b H_w + \gamma' (z - H_w)) + \gamma_w (z - H_w) \quad (6.10)$$

Sebaran tekanan diperlihatkan pada Gambar 6.2b. Gaya total yang bekerja pada dinding, dimana  $H_2 = H - H_w$ , adalah:

$$P_o = \frac{1}{2} K_o \gamma_b H_w^2 + K_o \gamma_b H_w H_2 + \frac{1}{2} K_o \gamma' H_2^2 + \frac{1}{2} \gamma_w H_2^2 \quad (6.11)$$

### Contoh Soal 6.1

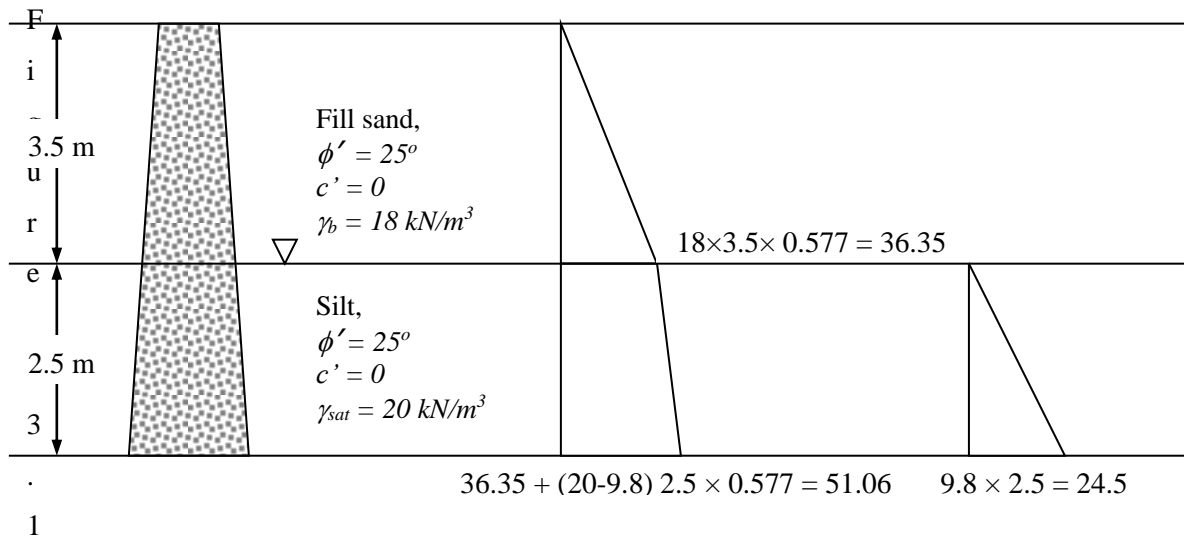
Suatu dinding menahan galian sedalam 6m seperti dipelihatkan pada Gambar P6.1. Dinding adalah sangat kaku sehingga tanah yang berada di belakang dinding berada dalam kondisi “diam”. Sifat tanah diperlihatkan dalam gambar. (a) Gambarkan diagram tekanan lateral pada Gambar P6.1 dan tentukan (b) tentukan gaya lateral  $P_o$  dan (c) Tentukan tekanan hidrostatik (abibat air)  $P_w$ . Muka air tanah terletak pada kedalaman 3.5 m.

### Jawab

Gunakan rumus Jaky untuk menentukan  $K_o$

$$\text{Untuk ke dua lapisan} \rightarrow K_o = 1 - \sin \phi' = 1 - \sin 25^\circ = 0.577$$

## a. Diagram tekanan lateral



## b. Tekanan tanah lateral (lihat diagram)

$$P_o = \frac{1}{2} \times 36.35 \times 3.5 + 36.35 \times 2.5 + \frac{1}{2} \times 14.71 \times 2.5$$

$$P_o = 63.61 + 90.88 + 18.39$$

$$P_o = 172.88 \text{ kN}$$

## c. Tekanan air (lihat diagram)

$$P_w = \frac{1}{2} \times 24.5 \times 2.5$$

$$P_w = 30.63 \text{ kN}$$

Tekanan horizontal Total pada dinding

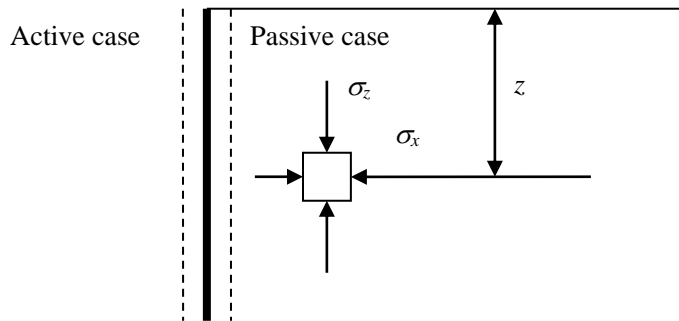
$$= P_o + P_w = 172.88 + 30.63 = 203.51 \text{ kN}$$

## TEORI RANKINE

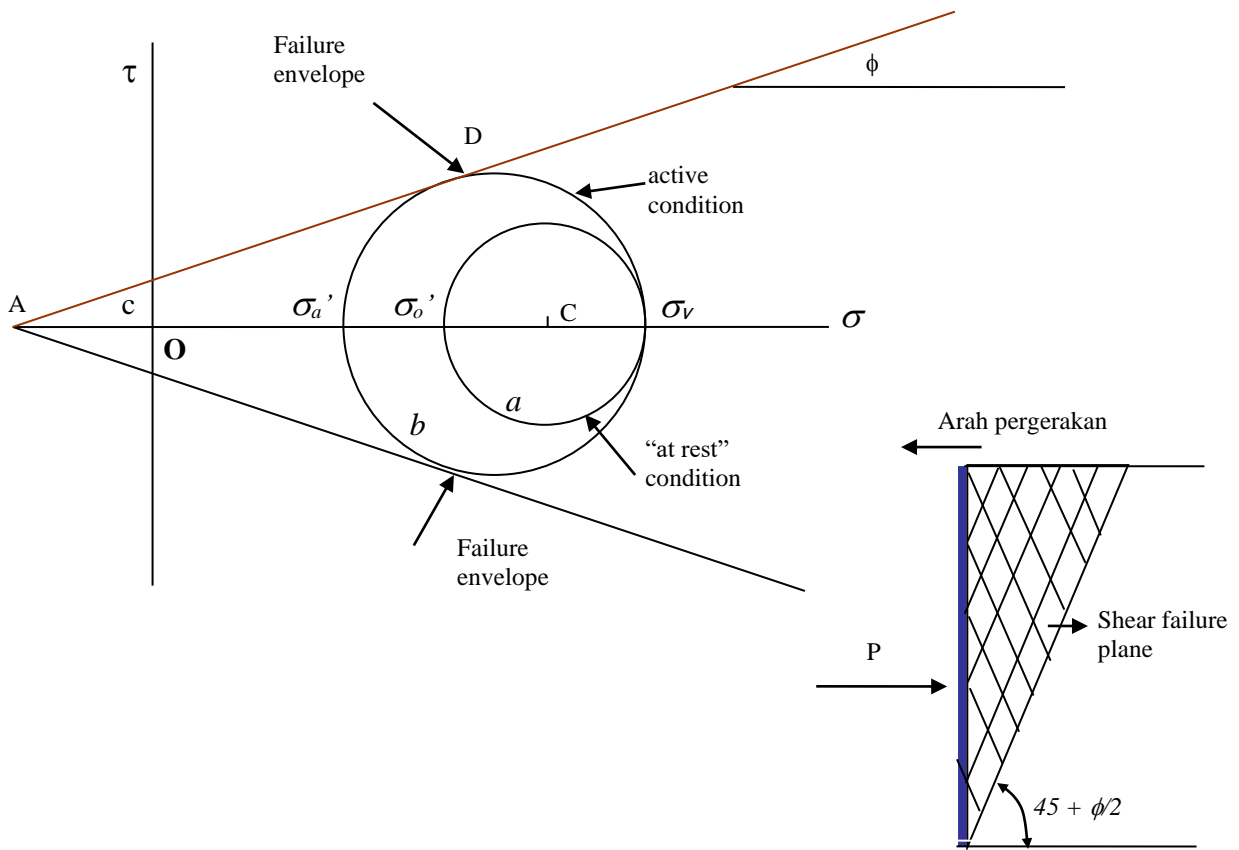
Teori Rankine (1857) mempertimbangkan kondisi tegangan dalam tanah homogen dan isotropik dengan permukaan datar yang ditahan oleh dinding licin (tanpa adanya gesekan antara permukaan dinding dengan tanah) dengan tinggi yang tak terbatas (Gambar 6.3). Teori ini menganggap bahwa bidang kritis adalah 2 dimensi (2-D case) dibentuk oleh garis yang membentuk sudut tertentu dengan horizontal.

Tekanan vertikal dan horizontal pada suatu titik dalam massa tanah adalah tekanan principal major dan minor  $\sigma_1 = \sigma_z$  dan  $\sigma_3 = \sigma_x$ . Bila pergerakan dinding tidak diperbolehkan, maka  $\sigma_x = K_o \sigma_v$ . Hal ini diperlihatkan sebagai lingkaran  $a$  pada Gambar 6.4. Bila pergerakan dinding menjauhi tanah cukup besar, maka akan

terjadi kesetimbangan plastis, sehingga kondisi aktif tercapai.  $\sigma_x$  berkurang sampai nilai minimum ( $\sigma_a$ ). Kondisi ini diperlihatkan sebagai lingkaran  $b$  pada Gambar 6.4.



Gambar 6.3 Kondisi tekanan pada elemen tanah di belakang dinding



Gambar 6.4 Tekanan aktif Rankine

Dari gambar 6.4,

$$\sin \phi = \frac{CD}{AC} = \frac{CD}{AO + OC}$$

dimana  $CD = \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_a)$ ;  $AO = c \cot \phi$ ; and  $OC = \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_a)$ , maka

$$\sin \phi = \frac{\frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_a)}{c \cot \phi + \frac{1}{2} (\sigma_v + \sigma_a)}$$

Sehingga

$$\sigma_a = \sigma_v' \left[ \frac{(1 - \sin \phi)}{(1 + \sin \phi)} \right] - 2c \left[ \frac{(\cos \phi)}{(1 + \sin \phi)} \right] \quad (6.12)$$

Dari geometri

$$\frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$\frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} = \tan \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

Maka

$$\sigma_a' = \sigma_v' \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) - 2c \tan \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (6.13)$$

Untuk cohesionless soil atau tanah pasir kering ( $c = 0$ ), maka

$$\sigma_a' = \sigma_v' \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (6.14)$$

Maka koefisien tekanan tanah aktif adalah :

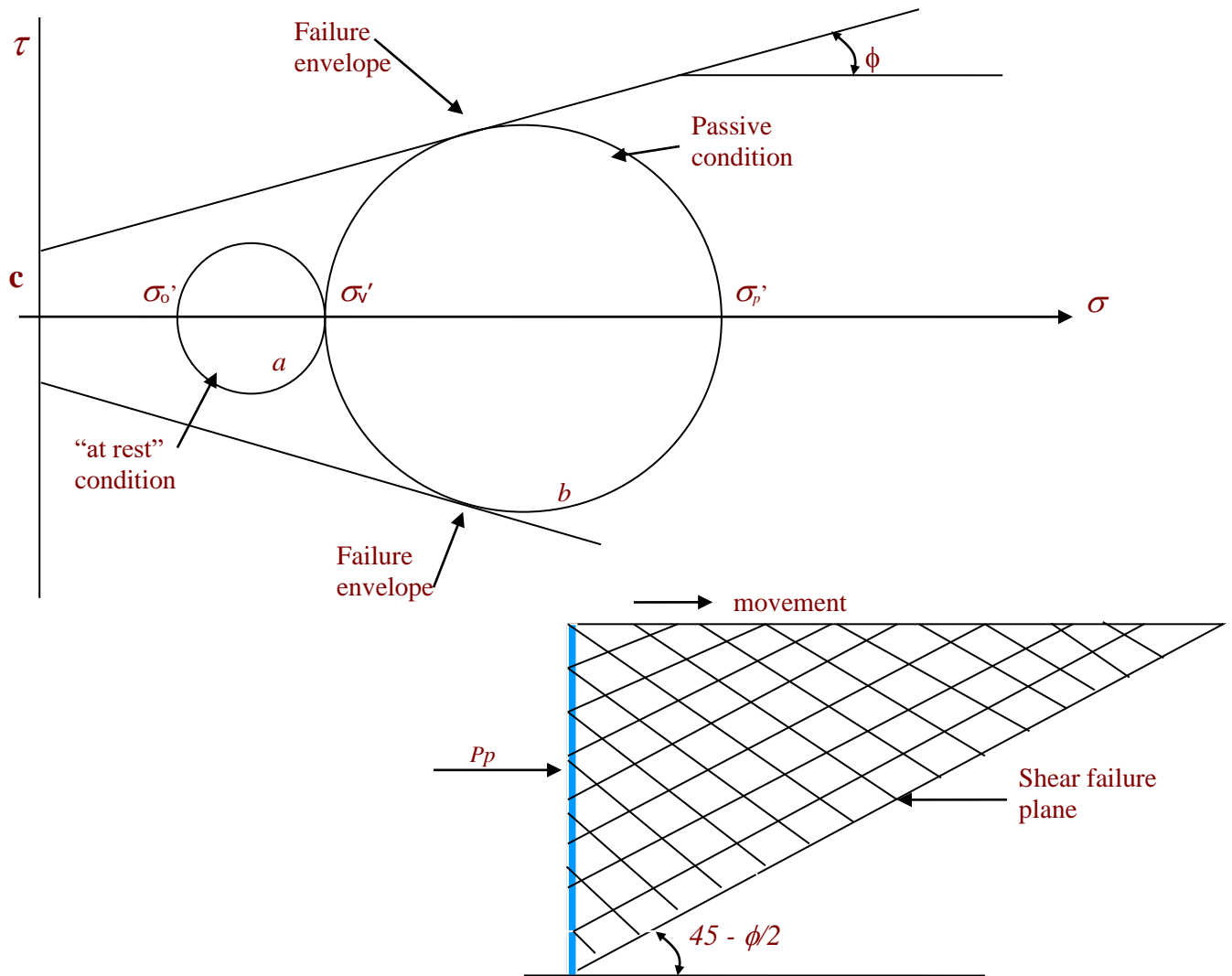
$$K_a = \frac{\sigma_a'}{\sigma_v'} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (6.15)$$

Dan bidang gelincir membentuk sudut  $(45 + \frac{\phi}{2})$  terhadap horizontal

Kondisi pasif dijelaskan pada Gambar 6.5. Kondisi awal adalah ketika tanah berada dalam keadaan “diam” diperlihatkan oleh lingkaran  $a$ . Bila dinding



bergerak ke arah massa tanah, maka tekanan prinsipal minor  $\sigma_x$  meningkat sampai tanah mengalami keruntuhan (diperlihatkan sebagai lingkaran  $b$ ).



Gambar 6.5 Tekanan Pasif Rankine

Gunakan langkah langkah yang sama dengan tekanan aktif yang dibahas sebelum ini, maka kita dapatkan

$$\sigma'_p = \sigma'_v \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) + 2 c \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) \quad (6.16)$$

Untuk tanah cohesionless ( $c = 0$ ),

$$\sigma'_p = \sigma'_v \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (6.17)$$

Bidang gelincir untuk kondisi pasif membentuk sudut  $\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$  dengan horizontal, dan koefisien tekanan tanah lateral Rankine adalah :

$$K_p = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_v} = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (6.18)$$

Rankine juga mengajukan persamaan untuk koefisien tekanan tanah lateral dalam kondisi aktif dan pasif untuk dinding dimana bagian belakangnya membentuk sudut yang dinyatakan sebagai  $\beta$  (Gambar 6.6). Kondisi ini sangat umum terjadi pada dinding penahan tanah di daerah perbukitan.

Untuk kondisi aktif:

$$K_a = \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (6.20)$$

Untuk kondisi pasif:

$$K_p = \frac{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (6.21)$$

Maka, tekanan aktif dan pasif parallel terhadap lereng di bagian belakang dinding :

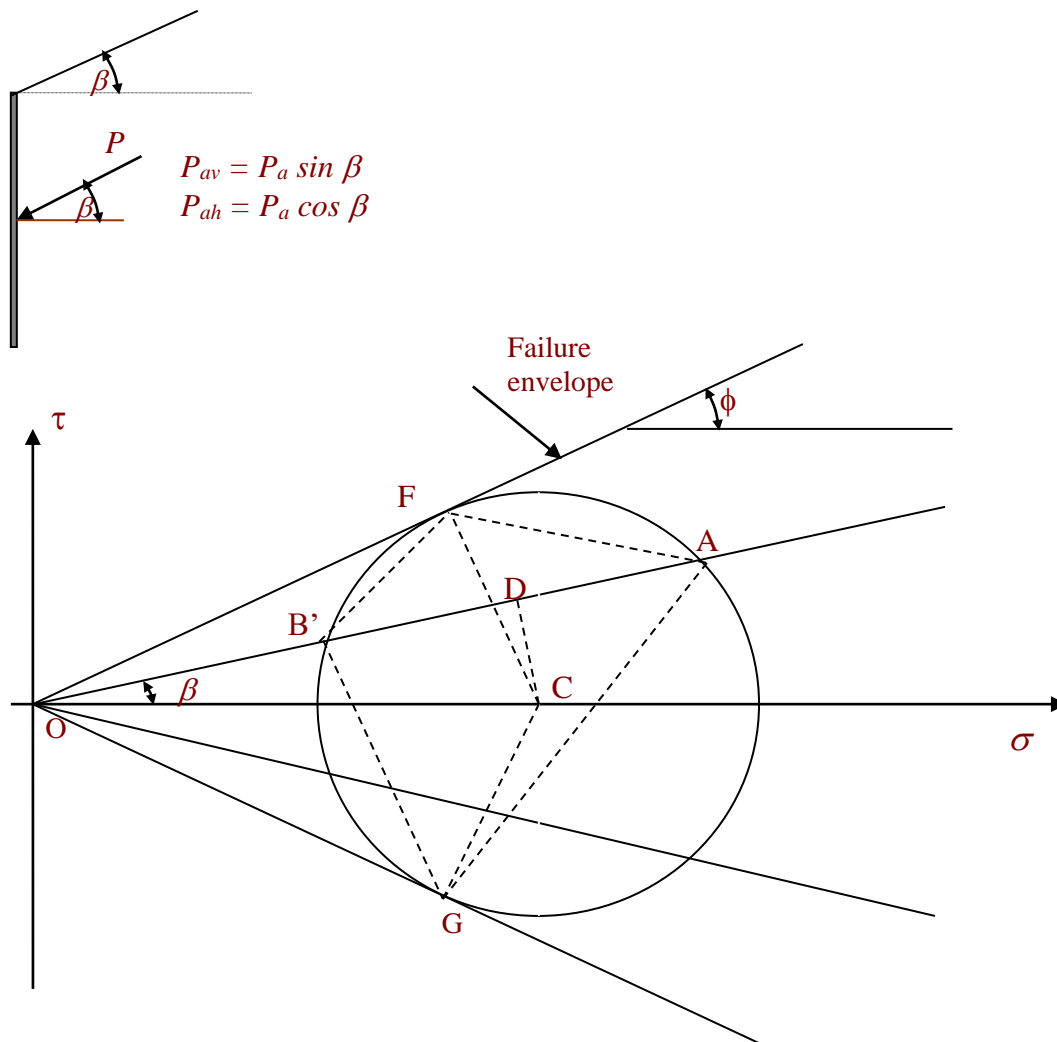
$$\sigma'_a = K_a \gamma z \cos \beta \quad (6.22)$$

$$\sigma'_p = K_p \gamma z \cos \beta \quad (6.23)$$

Dan gaya total yang bekerja pada dinding penahan tanah adalah:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \cos \beta \quad (6.24)$$

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \cos \beta \quad (6.25)$$



Gambar 6.6 Dinding dengan sudut di bagian belakang

Example Problem 3.2

A retaining structure is supporting a 5.3 m high excavation. This wall has moved sufficiently to develop active condition. The properties of the soil behind retaining wall are  $c' = 0$  ;  $\phi' = 30^\circ$  ;  $\gamma_b = 20.4 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_{sat} = 22.0 \text{ kN/m}^3$ . Compute the lateral pressure distribution acting on this wall if ground water table exist at 2.5 m below ground surface. Assume that the back of the wall is smooth so that the wall friction angle  $\delta = 0$ .

Solution

Use Rankine's theory  $K_a = \tan^2 (45 - 30/2) = 0.333$

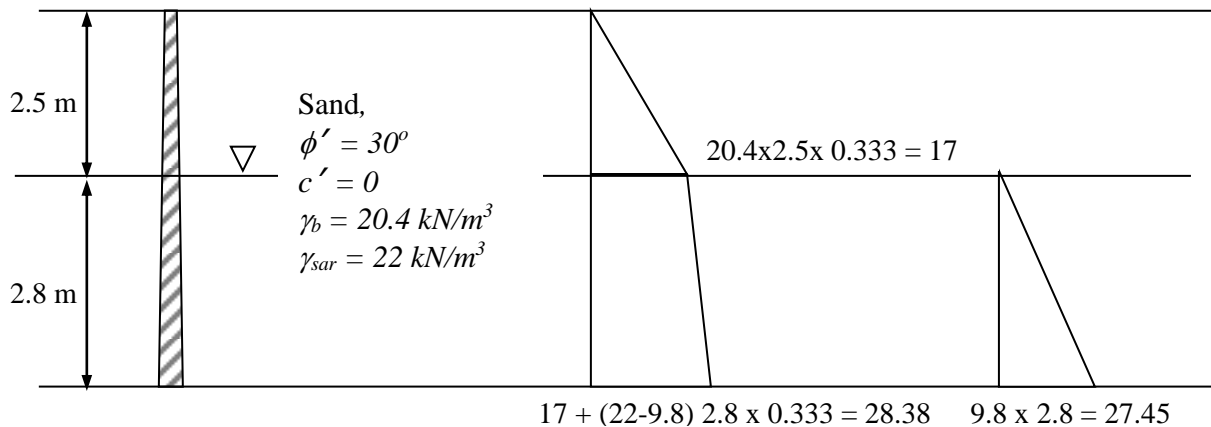


Figure P3.2

a. Lateral earth pressure (see diagram)

$$\begin{aligned}
 P_a &= \frac{1}{2} \times 17 \times 2.5 + 17 \times 2.8 + \frac{1}{2} \times 11.38 \times 2.8 \\
 P_a &= 21.25 + 47.6 + 15.93 \\
 P_a &= 84.78 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

b. Hydrostatic pressure (see diagram)

$$\begin{aligned}
 P_w &= \frac{1}{2} \times 27.45 \times 2.8 \\
 P_w &= 38.43 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Total horizontal pressure on wall =  $P_a + P_w = 84.78 + 38.43 = 123.2 \text{ kN}$

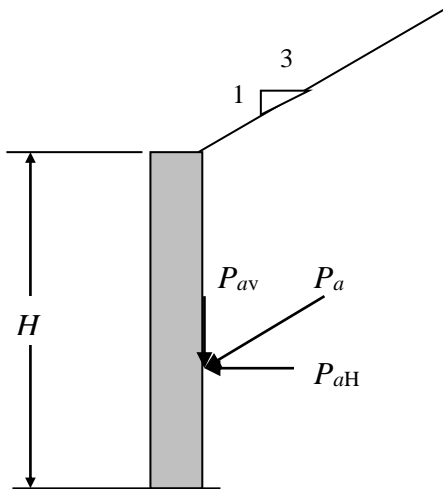
Contoh Soal 6.3

Suatu dinding dengan tinggi 6 m menahan tanah dengan:  $c' = 0$ ;  $\phi' = 30^\circ$ ;  $\gamma = 19.2 \text{ kN/m}^3$ . Permukaan tanah di belakang dinding membentuk sudut 3H : 1V (Gambar P6.3). Anggap dinding bergerak cukup besar mengakibatkan terjadinya kondisi aktif. Tentukan tekanan yang bekerja di belakang dinding menggunakan teori Rankine.

Jawab:

3H : 1V slope  $\rightarrow \beta = \tan^{-1}(1/3) = 18^\circ$

$$K_a = \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} = 0.415$$



$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a \cos \beta$$

$$P_a = \frac{1}{2} (19.2) (6)^2 (0.415) \cos 18^\circ = 136 \text{ kN/m}$$

$$P_{aH} = P_a \cos 18^\circ = 129.7 \text{ kN/m}$$

$$P_{aV} = P_a \sin 18^\circ = 42.1 \text{ kN/m}$$

Gambar P6.3

## Tanah Kohesif

Sebaran tekanan tanah aktif dan pasif untuk tanah kohesif berdasarkan Teori Rankine diperlihatkan pada Gambar 6.7a dan b. Untuk kondisi aktif, adanya kohesi mengurangi tekanan tanah lateral sehingga menjadi negative pada bagian atas. Kedalaman dimana tekanan tanah aktif menjadi nol adalah :

$$z_o = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} \quad (6.26)$$

Gaya aktif dan pasif adalah sebagai berikut:

$$P_a = \frac{1}{2} H \sigma'_v K_a - H (2c \sqrt{K_a}) = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - H (2c \sqrt{K_a}) \quad (6.27)$$

$$P_p = \frac{1}{2} H \sigma'_v K_p + H (2c \sqrt{K_p}) = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_p + H (2c \sqrt{K_p}) \quad (6.28)$$

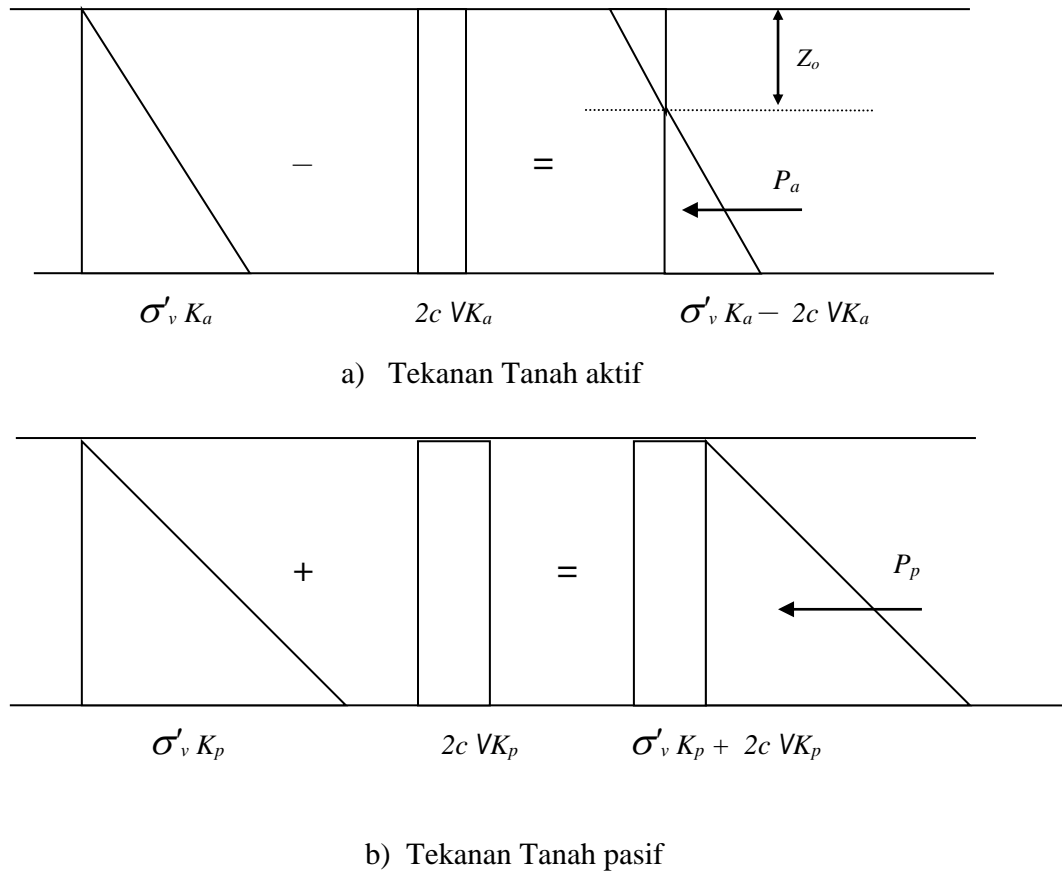


Figure 3.7 Tekanan tanah aktif dan pasif untuk tanah kohesif

Contoh Soal 3.5

Tentukan tinggi kritis galian dalam tanah lempung dengan  $c = 40 \text{ kN/m}^2$  and  $\gamma = 16.3 \text{ kN/m}^3$ .

Jawab:

Untuk  $\phi = 0$  ;  $K_a = 1$  (Rankine)

$$\sigma_h' = \sigma_v' K_a - 2c \sqrt{K_a} = \gamma z K_a - 2c \sqrt{K_a}$$

Kadaan kritis bila  $\sigma_h' = 0$

$$\gamma z \cdot K_a = 2c \sqrt{K_a}$$

$$z = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} = \frac{2 \times 40}{16.3 \sqrt{1}} = 4.90 \text{ m}$$

Maka tinggi maximum galian sebelum runtuh adalah 4.90 m

## TEORI COULOMB

Asumsi penting yang dibuat oleh Rankine ketika mengembangkan teorinya adalah tidak adanya gesekan antara dinding dengan tanah di belakangnya. Keadaan ini tidak sesuai dengan realita. Teori Coulomb yang dikembangkan tahun 1776 mempertimbangkan gesekan antara permukaan dinding dengan tanah. Asumsi lainnya adalah sama. Resultan tekanan aktif bekerja pada titik berat bidang runtuh dengan sudut gesekan antara dinding dan tanah membentuk sudut  $\delta$  dengan horizontal. Seperti teori Rankine, teori Coulomb juga di kembangkan untuk tanah cohesionless ( $c=0$ )

Gambar 6.8 memperlihatkan dinding penahan tanah dengan permukaan tanah bagian belakangnya membentuk sudut  $\beta$  dengan horizontal. Garis AB adalah garis keruntuhan yang diprediksi dimana gaya gaya berikut bekerja : (a) berat massa tanah yang akan runtuh, (b) resultan gaya gaya normal dan geser  $F$  yang membentuk sudut  $\phi$  dengan garis normal terhadap bidang runtuh dan (c) tekanan tanah aktif membentuk sudut  $\delta$  dengan garis normal terhadap belakang dinding.

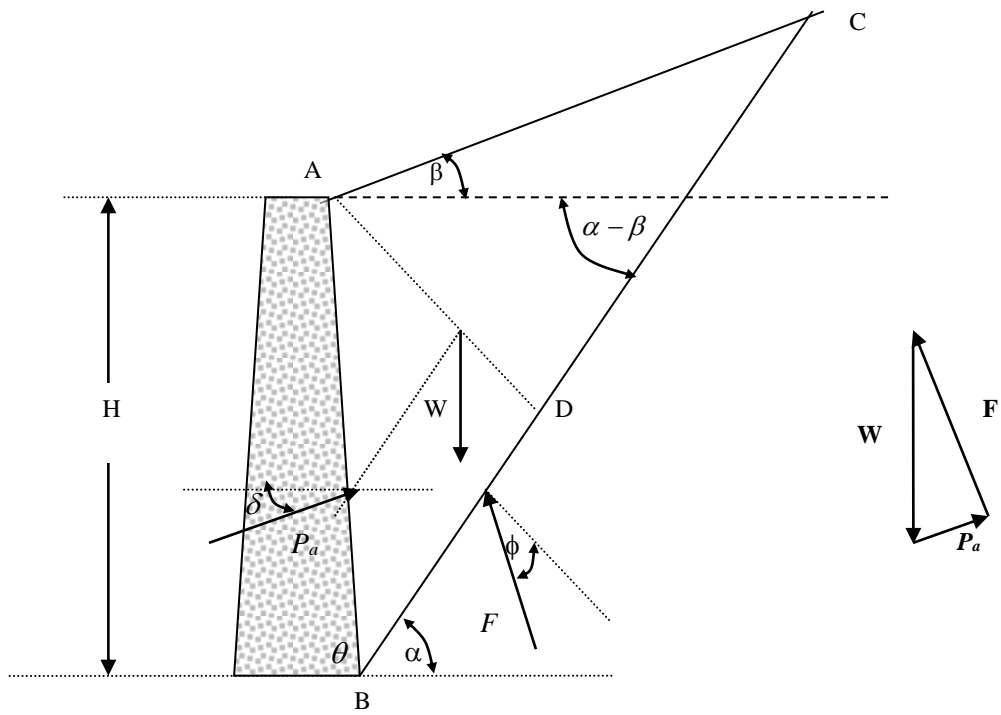


Figure 3.8 Coulomb's active earth pressure: Failure wedge and force polygon

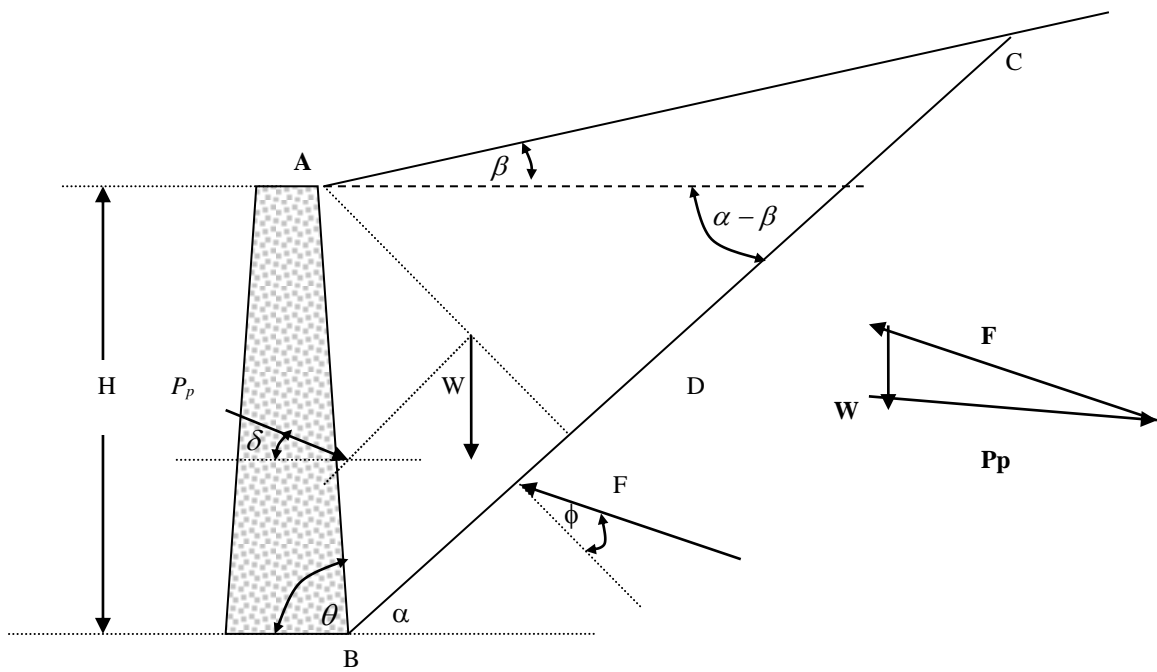


Figure 3.9 Coulomb's passive earth pressure: Failure wedge and force polygon



Dari Gambar 6.8, terlihat:

$$\frac{W}{\sin(180-(\theta-\delta)-(\alpha-\phi))} = \frac{P_a}{\sin(\alpha-\phi)}$$

$$P_a = \frac{W \sin(\alpha-\phi)}{\sin(180-(\theta-\delta)-(\alpha-\phi))}$$

Berat tanah yang akan runtuh:

$$W = \frac{\gamma H^2 \sin(\theta+\alpha)\sin(\theta+\beta)}{2 \sin^2 \theta \sin(\alpha-\beta)}$$

Maka,

$$P_a = \frac{\gamma H^2 \sin(\theta-\alpha)\sin(\theta+\beta)\sin(\alpha-\phi)}{2 \sin^2 \theta \sin(\alpha-\beta)\sin[180-(\theta-\delta)-(\alpha-\phi)]} \quad (6.29)$$

Semua parameter dalam persamaan di atas diketahui kecuali  $\alpha$ . Nilai kritis  $\alpha$  dicapai bila  $P_a$  mencapai maximum. Dalam hal ini,  $\frac{\partial P_a}{\partial \alpha}$  harus sama dengan 0. Hal ini terjadi bila  $\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$  Dengan mengganti  $\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$  dalam persamaan di atas, maka:

$$P_a = 1/2 \gamma H^2 K_a$$

dimana

$$K_a = \frac{\sin^2(\theta+\phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta-\delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi+\delta)\sin(\phi-\beta)}{\sin(\theta-\delta)\sin(\theta+\beta)}} \right]} \quad (6.30)$$

dan

$$K_p = \frac{\sin^2(\theta-\phi)}{\sin^2 \theta \sin(\theta+\delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi+\delta)\sin(\phi+\beta)}{\sin(\theta+\delta)\sin(\theta+\beta)}} \right]} \quad (6.31)$$

Catat untuk  $\beta = 0$ ,  $\theta = 90$ , and  $\delta = 0$ , rumus rumus di atas menjadi:

$$K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$K_p = \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} = \tan \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right)$$

Yang sama dengan rumus koefisien tekanan tanah lateral Rankine untuk kondisi aktif dan pasif.

### Contoh soal 6.6

Suatu dinding penahan tanah seperti diperlihatkan pada Gambar 6.6 menahan tinggi galian sebesar 9m. Hitung daya aktif yang bekerja pada dinding dan tunjukkan (pada Gambar) titik dimana gaya tersebut bekerja bila sudut geser dinding =  $25^\circ$ . Parameter tanah adalah :  $\phi = 30^\circ$ ,  $c = 0$ ,  $\gamma = 17.6 \text{ kN/m}^3$ .

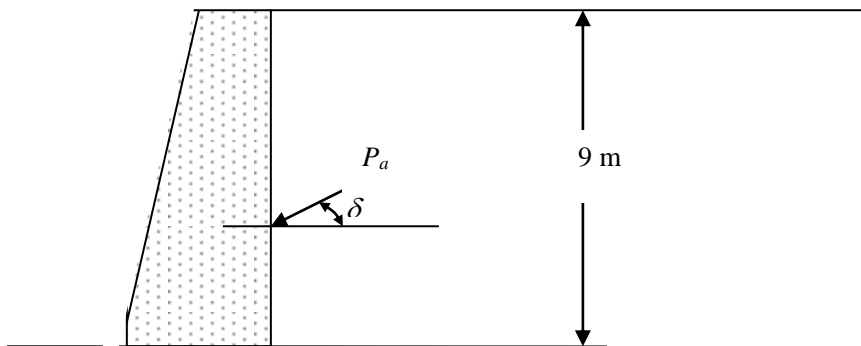


Figure P3.6

### Solution

For  $\phi = 30^\circ$ ,  $\delta = 25^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ , and  $\theta = 90^\circ$

$$K_a = \frac{\sin^2 (90 + 30)}{\sin^2 90 \sin (90 - 25) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin (30 + 25) \sin (30 - 0)}{\sin (90 - 25) \sin (90 + 0)}} \right]} = 0.296$$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a = \frac{1}{2} \times 17.6 \times (9)^2 \times 0.296 = 211 \text{ kN/m}$$