

## PERANCANGAN DINDING PENAHAN TANAH PADA (KONSTRUKSI) BASEMENT DENGAN DUKUNGAN STRUT-BEAM

Renaldo Livando<sup>1</sup> dan Aksan Kawanda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
Renaldolivando6@gmail.com

<sup>2</sup>Program Studi Doktor Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit No.94, Jawa Barat  
aksank@dti.untar.ac.id

Masuk: 08-07-2020, revisi: 22-07-2020, diterima untuk diterbitkan: 05-08-2020

### ABSTRACT

*Basement development in the construction world has become common. The contractor is expected to be able to master the knowledge for the construction of the basement. In practice, it cannot use only one or two methods to be used in each field condition. Many things must be estimated to design a structure, in addition to choosing the shape of the retaining wall used, the selection of support becomes something that must really be considered by looking at field conditions. An example that must be considered in designing a retaining wall itself is the stress of the soil that must be calculated appropriately so as not to damage the retaining wall itself. In addition, the relationship used between projects with deep or shallow excavations. If the retaining wall is lacking or not strong enough to withstand the stresses of the soil, it must be assisted with a support system that will withstand some of the lateral pressure exerted by the soil. In this analysis, the focus of the discussion is on the support system strutting model or can be called a strut-beam that is used to support the diaphragm wall.*

*Keywords: basement; retaining wall; deep excavation; strut*

### ABSTRAK

Pembangunan *basement* dalam dunia konstruksi sudah menjadi sesuatu yang umum. Kontraktor diharapkan sudah dapat menguasai ilmu untuk pembangunan *basement*. Dalam prakteknya, tidak bisa menggunakan hanya satu atau dua metode untuk dipakai dalam setiap kondisi lapangan. Banyak hal yang harus diperkirakan untuk mendesain sebuah struktur, selain pemilihan bentuk dinding penahan tanah yang digunakan, pemilihan support pun menjadi hal yang harus benar-benar dipertimbangkan dengan melihat kondisi lapangan. Contoh yang harus dipertimbangkan dalam mendesain dinding penahan tanah sendiri adalah tegangan tanah yang harus diperhitungkan secara tepat agar tidak merusak dinding penahan tanah itu sendiri. Selain itu juga perhitungan yang digunakan antara proyek dengan galian dalam atau galian dangkal. Jika dinding penahan tanah tersebut kurang atau tidak kuat dalam menahan tegangan tanah maka harus dibantu dengan support system yang akan menahan sebagian tekanan lateral yang diberikan oleh tanah. Dalam analisis ini, fokus pembahasan ada pada *support system* model strutting atau bisa disebut *strut-beam* yang digunakan untuk mendukung *diaphragm wall*.

Kata kunci: *basement*; dinding penahan tanah; galian dalam; *strut*

### 1. PENDAHULUAN

Meluasnya struktur perkotaan dan penambahan penduduk yang cepat menimbulkan tantangan untuk mencari ruang yang dapat digunakan di kota-kota besar. Para pengembang semakin terorientasi untuk membangun bangunan dengan struktur yang semakin tinggi walaupun dengan lahan yang tergolong sempit, dan karena adanya kebutuhan lahan parkir, bangunan juga harus membutuhkan *basement* sehingga struktur bangunan semakin lama semakin dalam. Seringnya bangunan-bangunan yang ada di daerah dengan ketersediaan lahan sempit memiliki dua sampai tiga *basement* ataupun lebih.

Untuk pembangunan yang membutuhkan galian sudah hampir tidak mungkin untuk memanfaatkan kemiringan lereng sebagai penahan tanah. Maka dari itu dibutuhkan dukungan galian yang dapat berbentuk *diaphragm wall* ataupun *sheet pile*. Namun untuk galian dalam, struktur tersebut sangat mungkin untuk membutuhkan dukungan tambahan, metode yang dapat digunakan untuk mengatasi masalah ini salah satunya adalah dengan galian bertahap dan memberikan dukungan tambahan, seperti penggunaan *struts*, *ground anchor*, dan juga campuran sistem *strutting/anchoring*.

Pemilihan sistem yang digunakan harus didasarkan dari keadaan di lapangan. Pada kasus proyek dengan lahan yang sempit dan adanya pertimbangan pengaruh terhadap bangunan/proyek disebelahnya, *strutting* merupakan dukungan yang cocok.

### Basement

*Basement* merupakan lantai tambahan pada bagian paling bawah sebuah gedung, terletak di bawah permukaan tanah dari desain bangunan gedung yang tergolong bangunan tinggi yang tidak mempunyai lahan kosong yang cukup baik di sekitar gedung ataupun untuk memberi lantai tambahan lagi di atas gedung. ada tiga hal penting yang perlu diperhatikan, yaitu metode konstruksi, *retaining wall* dan *dewatering*.

### Dinding penahan tanah

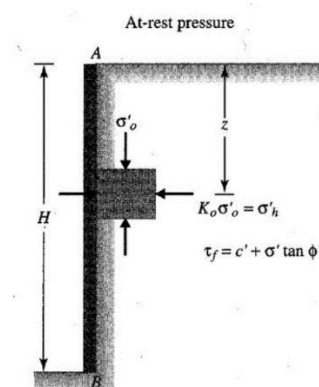
Dinding penahan tanah adalah sebuah struktur pada bidang geoteknik yang memiliki fungsi untuk memberikan tahanan terhadap tekanan tanah lateral akibat dari pengembangan atau keruntuhan tanah itu. Struktur dapat terguling atau akan tergeser karena adanya dorongan aktif yang diberikan oleh tanah yang tertahan. Dinding penahan tanah juga digunakan untuk membantu proses penggalian. Dinding tersebut sering diaplikasikan pada banyak proyek seperti jalan raya, irigasi, dan struktur-struktur fondasi seperti bangunan ruang bawah tanah karena kemampuannya untuk menahan tekanan tanah.

### Tegangan tanah lateral

Tegangan tanah lateral merupakan gaya yang dihasilkan karena adanya dorongan atau tekanan dengan arah horizontal atau lateral dari tanah ke struktur penahan tanah. Maka dari itu struktur yang menerima gaya horizontal/lateral ini harus dipertimbangkan desainnya sedemikian rupa agar sesuai dengan ketentuan yang ada sehingga struktur tidak mengalami kegagalan. Tegangan tanah lateral dipengaruhi berbagai faktor, sebagai berikut: Nilai kohesi pada tanah, nilai koefisien tegangan lateral dalam keadaan diam ( $K_0$ ), aktif ( $K_a$ ), dan pasif ( $K_p$ ), dan yang mempengaruhi struktur.

### Koefisien tanah lateral dalam keadaan diam

Koefisien tanah lateral saat tanah dalam keadaan diam adalah tekanan tanah yang terjadi akibat massa tanah pada dinding penahan dalam keadaan seimbang. Pada Gambar 1 terlihat suatu massa tanah yang ditahan oleh struktur penahan tanah AB dengan tinggi H. Dinding penahan AB berada dalam keadaan diam, sedangkan untuk massa tanah dalam keadaan keseimbangan *elastic*.



Gambar 1. Tekanan tanah lateral dalam keadaan diam

(Sumber: Das, 2002)

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (1)$$

### Koefisien tanah lateral aktif

Diagram illustrating the active pressure on a retaining wall. The diagram shows a vertical wall segment AB and a failure surface BC. A rectangular soil element is shown at depth  $z$ . The horizontal distance between the failure surface and the wall is  $\Delta L_a$ . The active pressure is represented by a horizontal arrow  $\sigma'_o$ . The vertical stress is  $\sigma'_v$ . The failure surface is a straight line BC. The angle of failure is  $\phi'$ . The active pressure is given by  $K_a \sigma'_o = \sigma'_h$ . The failure stress is given by  $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$ .

(Sumber: Das, 2002)

Passive pressure

$A$   $A''$   $C'$

$z$

$K_p \sigma_o = \sigma_h$

$\sigma_o$

$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi$

$B$

(Sumber: Das, 2002)

## 825

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\theta'}{2} \right) \quad (2)$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\theta'}{2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma'_{ha} = \sigma'_v \cdot K_a - 2 c' \sqrt{K_a} \quad (4)$$

$$\sigma'_{hp} = \sigma'_v \cdot K_p + 2 c' \sqrt{K_p} \quad (5)$$

dengan  $K_a$  = koefisien tekanan tanah aktif,  $K_p$  = koefisien tekanan tanah pasif,  $c'$  = kohesi,  $\theta'$  = sudut geser dalam tanah,  $\sigma'_{ha}$  = tegangan tanah lateral aktif,  $\sigma'_{hp}$  = tegangan tanah lateral pasif,  $\sigma'_v$  = tegangan vertikal efektif.

### Teori Coulomb (1776)

Berdasarkan Teori dari Coulomb dalam Hardyatmo (1996) koefisien tekanan tanah aktif dan pasif pada permukaan tanah datar ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$K_a = \frac{\sin^2(\beta + \theta')}{\sin^2 \beta \cdot \sin(\beta - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\theta' + \delta) \cdot \sin(\theta' - \alpha)}{\sin(\beta - \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (6)$$

$$K_p = \frac{\sin^2(c - \theta')}{\sin^2 \beta \cdot \sin(\beta + \delta) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\theta' + \delta) \cdot \sin(\theta' + \alpha)}{\sin(\beta + \delta) \cdot \sin(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (7)$$

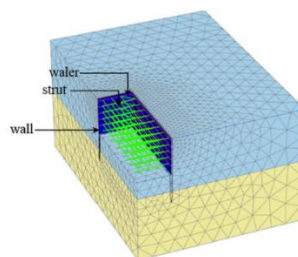
$$\sigma'_{ha} = \sigma'_v \cdot K_a - 2 c' \sqrt{K_a} \quad (8)$$

$$\sigma'_{hp} = \sigma'_v \cdot K_p + 2 c' \sqrt{K_p} \quad (9)$$

dengan  $K_a$  = koefisien tekanan tanah aktif,  $K_p$  = koefisien tekanan tanah pasif,  $\theta'$  = sudut geser dalam tanah,  $c'$  = kohesi,  $\alpha$  = sudut kemiringan *backfill*,  $\beta$  = sudut kemiringan dinding penahan,  $\delta$  = sudut kemiringan tegak lurus tegangan.

### Sistem *strutting*

Sistem *strutting* dipasang ketika diperlukan dukungan tambahan untuk mengontrol pergerakan atau defleksi dinding. Sistem ini terdiri dari lapisan waler dan struts yang biasa terbuat dari balok baja.



Gambar 4. Galian 3D dengan sistem *strutting*

(Sumber: Wengang Zhang, 2019)

### Strut

Setiap *strut* dalam penahan galian sebaiknya dibuat proporsional terhadap beban maksimum yang diberikan oleh diagram tekanan. Prosedur sederhana diberikan pada Gambar 4. Untuk mengurangi pergerakan sistem penahan tanah, *strut* biasanya *diprestress* pada waktu pemasangan antara 40% sampai dengan 70% terhadap beban maksimum yang mungkin terjadi. *Wales*

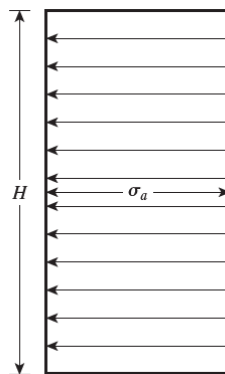
*Wales* umumnya terbuat dari baja H. Lendutan dari *wales* dan *D-wall* di antara *strut* menyebabkan tekanan geser pada tanah, hal ini akan mentransfer sebagian beban langsung kebagian penahan yang kaku. Karena itu *wales*, *D-wall* tidak perlu direncanakan untuk menahan bending momen maksimum.

### Tegangan pada desain galian dalam

Pada tanah seragam Peck (1969) dalam Das (2002) menyatakan tegangan lateral untuk jenis tanah pasir dapat diilustrasikan pada Gambar 5 dan dinyatakan dengan rumus:

$$\sigma_a = 0.65\gamma HK_a \quad (10)$$

dengan  $\gamma$  = berat jenis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $H$  = tinggi potongan (m),  $K_a$  = koefisien tanah lateral aktif.



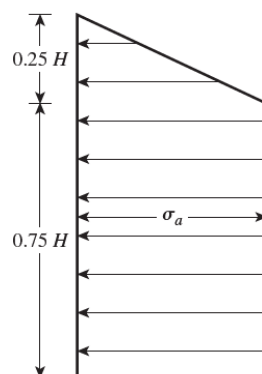
Gambar 5. Tegangan tanah lateral pada pasir

(Sumber: Das, 2002)

Sedangkan tegangan lateral untuk jenis tanah lempung lunak sampai sedang untuk kondisi  $\frac{\gamma H}{c} > 4$ , tegangan lateral dapat diilustrasikan pada Gambar 6 dinyatakan dengan rumus:

$$\sigma_a = \gamma H \left[ 1 - \left( \frac{4c}{\gamma H} \right) \right] \quad (11)$$

dengan  $c$  = kohesi ( $\text{kN/m}^2$ ),  $\gamma$  = berat jenis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $H$  = tinggi potongan (m).



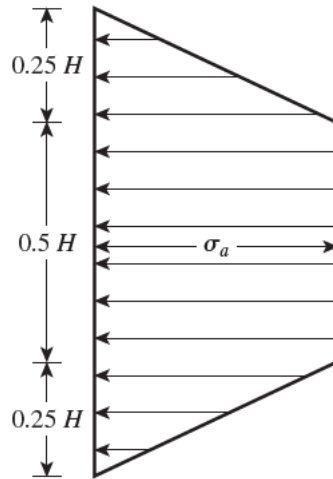
Gambar 6. Tegangan tanah lateral pada tanah lempung lunak sampai sedang

(Sumber: Das, 2002)

Dan tegangan tanah lateral untuk jenis tanah lempung keras dengan kondisi  $\frac{\gamma H}{c} \leq 4$ , tegangan lateral dapat diilustrasikan pada Gambar 7 dinyatakan dengan rumus:

$$\sigma_a = 0.2\gamma H \text{ sampai } 0.4\gamma H \quad (12)$$

dengan  $\gamma$  = berat jenis ( $\text{kN/m}^3$ ),  $H$  = tinggi potongan (m).



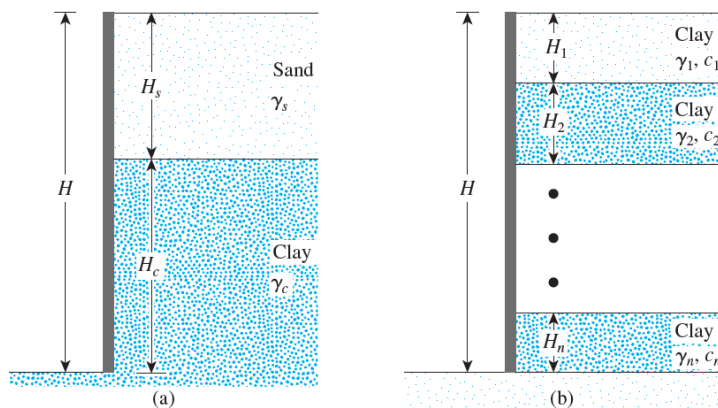
Gambar 7. Tegangan tanah lateral pada tanah lempung keras

(Sumber: Das, 2002)

Seringkali lapisan pada tanah merupakan lapisan yang memiliki beberapa jenis tanah dari pasir hingga lempung, terutama untuk galian dalam. Peck (1943) dalam Das (2002) merumuskan pencarian nilai kohesi rata-rata dapat dirumuskan:

$$c_{av} = \frac{1}{2H} [\gamma_s K_s H_s^2 \tan \phi_s + (H - H_s) n' q_u] \quad (13)$$

dengan  $H$  = tinggi total potongan (m),  $\gamma_s$  = berat jenis pasir ( $\text{kN/m}^3$ ),  $H_s$  = tinggi lapisan pasir (m),  $K_s$  = koefisien tanah lateral pada pasir,  $\phi_s$  = sudut geser pasir ( $^\circ$ ),  $q_u$  = kuat tekan *undrained* lempung ( $\text{kN/m}^2$ ),  $n'$  = koefisien *failure* (0.5 sampai 1).



Gambar 8. Lapisan tanah beragam pada *braced-cut*

(Sumber: Das, 2002)

Berdasarkan Gambar 8a berat jenis rata-rata pada lapisan tanah beragam dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\gamma_a = \frac{1}{H} [\gamma_s H_s + (H - H_s) \gamma_c] \quad (14)$$

dengan  $\gamma_c$  = berat jenis dari lapisan lempung.

Jika ada beberapa lapisan seperti Gambar 8b, nilai kohesi rata-rata dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$c_{av} = \frac{1}{H} (c_1 H_1 + c_2 H_2 + \dots + c_n H_n) \quad (15)$$

Dengan  $c_1, c_2, \dots, c_n$  = nilai kohesi pada lapisan 1,2,...,n,  $H_1, H_2, \dots, H_n$  = tebal lapisan 1,2,...,n.

Maka dapat dihitung berat jenis rata-rata

$$\gamma_{av} = \frac{1}{H} (\gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 + \dots + \gamma_n H_n) \quad (16)$$

### Stabilitas *bottom heave*

*Braced-cut* pada tanah dapat membuat bagian dasar tanah menjadi tidak stabil. Terzaghi (1943) dalam Braja (2002) menganalisa factor keamanan untuk *braced-cut* pada galian dalam, dirumuskan:

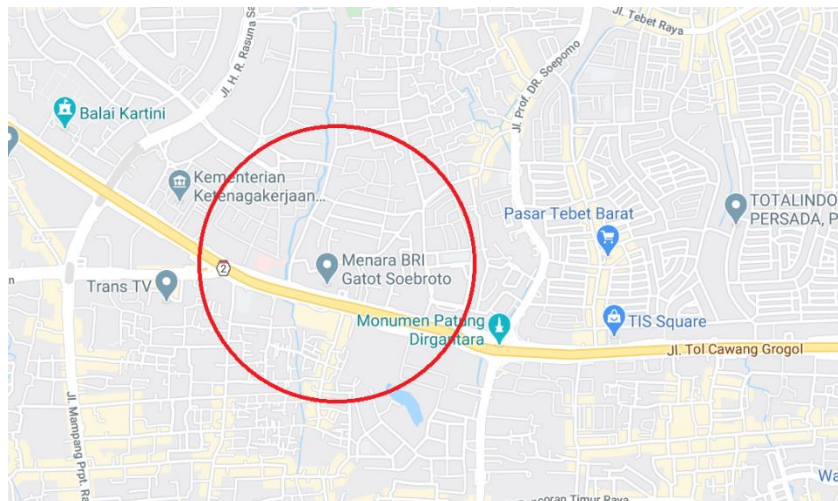
$$FS = \frac{5.14 c_{av} \left( 1 + \frac{0.2 B''}{L} \right) + \frac{c_{av} H}{B'}}{\gamma_a H + q} \quad (17)$$

Dengan ketentuan  $B' = T$  jika  $T \leq B/\sqrt{2}$ ;  $B' = B/\sqrt{2}$  jika  $T > B/\sqrt{2}$ ;  $B'' = \sqrt{2} B'$

dengan FS = faktor keamanan *base heave*, T = tinggi lapsain *base heave* (m),  $c_{av}$  = kohesi *undrained* rata-rata,  $\gamma$  = berat jenis tanah, q = beban luar.

## 2. METODE PENELITIAN

### Wilayah penelitian



Gambar 9. Wilayah penelitian

### Data yang digunakan

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini hanya menggunakan data sekunder yang diperoleh dari instansi-instansi terkait penelitian ini. Adapun data sekunder yang digunakan sebagai berikut:

1. Data *shop drawing*
2. Data sondir

3. Data *borlog*
4. Data laboratorium

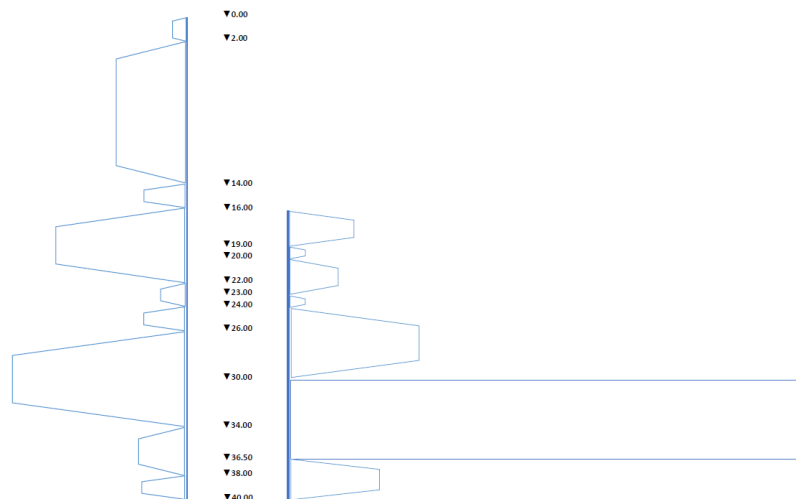
### Analisis Data

1. Memperhitungkan dan memodelkan tegangan tiap lapisan tanah
2. Memperhitungkan dan memodelkan tegangan lapisan tanah rata-rata
3. Menghitung beban resultan pada masing-masing strut dan *wales*
4. Melakukan pengecekan terhadap stabilitas *bottom heave*

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN.

### Perhitungan tegangan aktif pasif tiap lapisan galian dalam

Perhitungan tegangan aktif pasif tiap lapisan disini berdasarkan dengan teori Peck (1969) tentang tegangan lateral untuk jenis tanah seragam. Mayoritas lapisan tanah merupakan lapisan tanah lempung keras sehingga diagram tegangan berbentuk trapesium sama kaki namun pada tanah pasif lapisan 30-36,5m terdapat lapisan pasir sehingga menghasilkan diagram tegangan persegi.



Gambar 10. Diagram tegangan tiap lapisan galian dalam

### Perhitungan tegangan aktif pasif rata-rata galian dalam

Perhitungan tegangan aktif pasif tiap lapisan disini berdasarkan dengan teori Peck (1969) dalam Braja (2002) tentang tegangan lateral untuk jenis tanah non-seragam. Mayoritas data pada Tabel 1 dan Tabel 2 didapat dengan menggunakan korelasi namun ada sedikit data yang didapat dari data hasil laboratorium.

Tabel 1. Data kohesi dan berat jenis rata-rata untuk tanah aktif

Depth (m)	High (m)	N-SPT	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma H$ (kN/m)	cH (kN/m)
0	2	6	3,60	7,00	14	7,2
2	12	15	22,00	4,00	48	264
14	2	40	24,00	10,70	21,4	48
16	6	50	30,00	11,20	67,2	180
22	2	23	13,80	8,50	17	27,6
24	2	39	23,40	10,65	21,3	46,8
26	8	50	30,00	11,20	89,6	240
34	4	24	14,40	8,00	32	57,6
38	2	50	30,00	11,20	22,4	60
40						
Total	40				332,9	931,2



Keterangan: *High* merupakan selisih dari kolom *Depth*

Nilai kohesi rata-rata:

$$c_{ava} = \frac{1}{H} (\Sigma cH) = \frac{1}{40} (931,2) = 23,28 \text{ kN/m}^2$$

Nilai berat jenis rata-rata:

$$\gamma_{ava} = \frac{1}{H} (\Sigma \gamma H) = \frac{1}{40} (332,9) = 8,3325 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{\gamma_{ava \times H}}{c_{ava}} = \frac{8,3325 \times 40}{23,28} = 14,29983$$

Karena,  $\frac{\gamma_{ava \times H}}{c_{ava}} > 4$

$$\text{Maka, } \sigma_{ava} = \gamma_{ava} H \left[ 1 - \left( \frac{4c_{ava}}{\gamma_{ava} H} \right) \right] = 8,3325 \times 40 \left[ 1 - \left( \frac{4 \times 23,28}{8,3325 \times 40} \right) \right] = 239,78 \text{ kN/m}^2$$

Tabel 2. Data kohesi dan berat jenis rata-rata untuk tanah pasif

<i>Depth</i> (m)	<i>High</i> (m)	N-SPT	c (kN/m <sup>2</sup> )	γ (kN/m <sup>3</sup> )	γH (kN/m)	cH (kN/m)
16	3	50	30,00	11,20	33,6	90
19	1	39	23,40	10,65	10,65	23,4
20	3	24	14,40	6,90	20,7	43,2
23	1	36	21,60	10,50	10,5	21,6
24	6	48	28,80	11,10	66,6	172,8
30	6,5	50	0,00	13,20	85,8	-
36,5	3,5	50	30,00	13,20	46,2	105
40						
Total	24				274,05	456

Keterangan: *High* merupakan selisih dari kolom *Depth*

Nilai kohesi rata-rata:

$$c_{avp} = \frac{1}{H} (\Sigma cH) = \frac{1}{40} (456) = 19 \text{ kN/m}^2$$

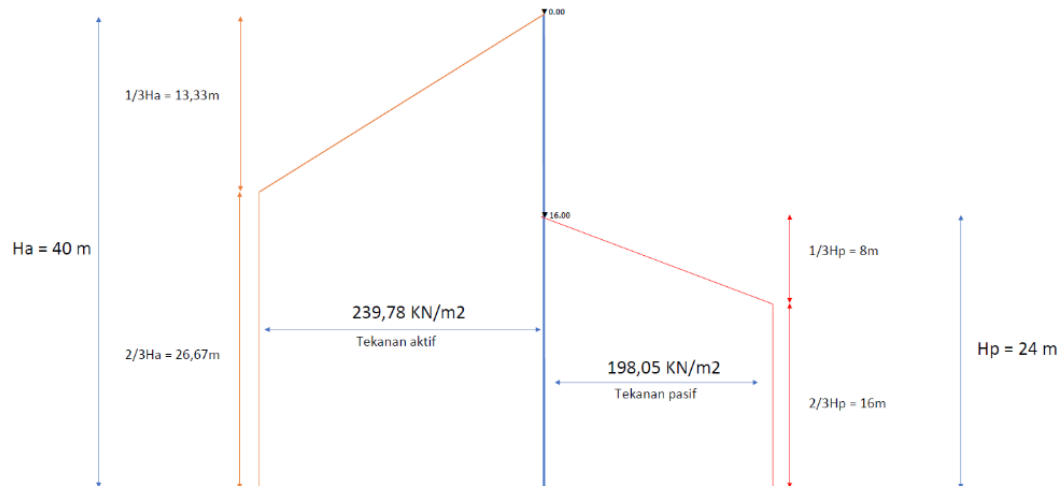
Nilai berat jenis rata-rata:

$$\gamma_{avp} = \frac{1}{H} (\Sigma \gamma H) = \frac{1}{40} (274,05) = 11,4188 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{\gamma_{avp \times H}}{c_{avp}} = \frac{11,4188 \times 24}{19} = 14,4237$$

Karena,  $\frac{\gamma_{avp \times H}}{c_{avp}} > 4$

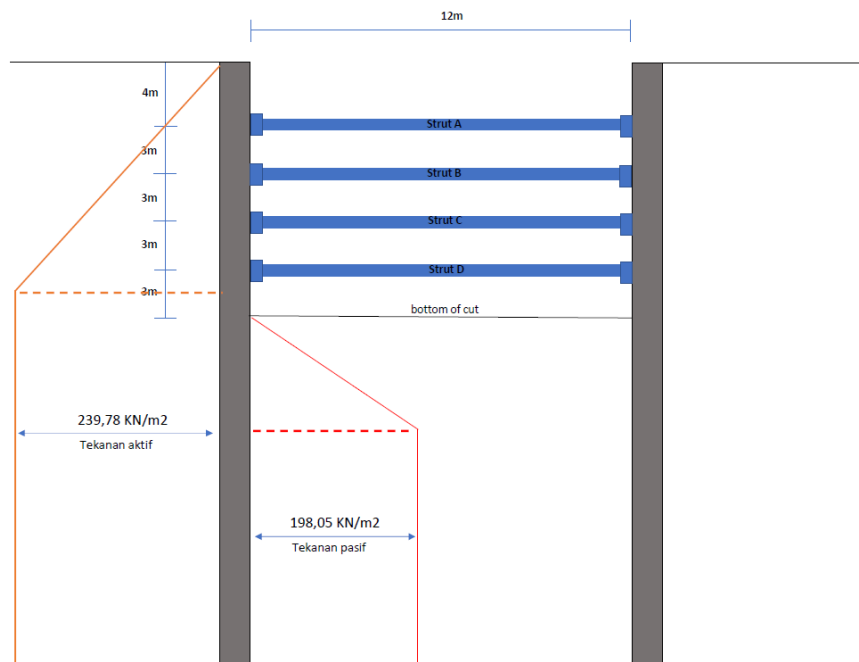
$$\text{Maka, } \sigma_{avp} = \gamma_{avp} H \left[ 1 - \left( \frac{4c_{avp}}{\gamma_{avp} H} \right) \right] = 11,4188 \times 24 \left[ 1 - \left( \frac{4 \times 19}{11,4188 \times 24} \right) \right] = 198,05 \text{ kN/m}^2$$



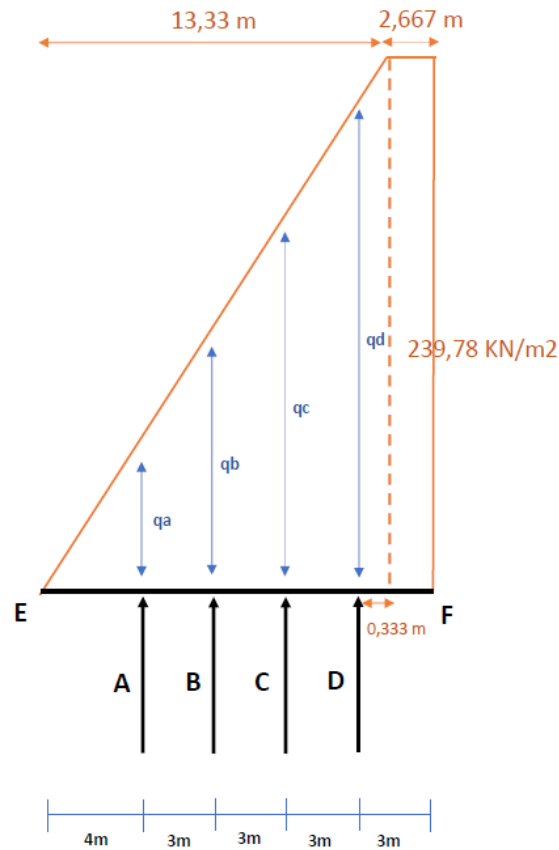
Gambar 11. Diagram tegangan aktif pasif rata-rata

### Perhitungan resultan gaya tiap strut dan wales

Analisa perhitungan analisis ini didasari oleh metode *slope deflection*. Penelitian ini mencari resultan gaya yang dihasilkan pada tiap *strut* dan *wales* akibat tegangan lateral tanah rata-rata.



Gambar 12. Sketsa tegangan pada *D-wall* dan *strut-beam*



Gambar 13. Perletakan pada *strut-beam*

Mencari besar  $q_a, q_b, q_c, q_d$

$$q_a = \frac{293,78 \times 4}{13,333} = 71,934 \text{ kN/m}^2$$

$$q_b = \frac{293,78 \times 7}{13,333} = 125,8876 \text{ kN/m}^2$$

$$q_c = \frac{293,78 \times 10}{13,333} = 179,8394 \text{ kN/m}^2$$

$$q_d = \frac{293,78 \times 13}{13,333} = 233,786 \text{ kN/m}^2$$

Beban pada bentang EA dan DF disuperposisi menjadi

$$\text{Beban EA} = \frac{1}{2} \times 4 \times 71,934 \times \left(\frac{1}{3} \times 4\right) = 191,824 \text{ kNm/meter of wall}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban DF} &= \frac{1}{2} \times 0,333 \times (293,78 - 233,786) \times \left(\frac{2}{3} \times 0,333\right) + 233,786 \times 0,333 \times \left(\frac{1}{2} \times 0,33\right) \\ &\quad + 239,78 \times 2,667 \times \left(\frac{1}{2} \times 2,667 + 0,333\right) \\ &= 1079,01 \text{ kNm/meter of wall} \end{aligned}$$

Persamaan *Slope Deflection* untuk setiap *member*:

Bentang AB

$$\begin{aligned}
 M_{AB} &= \frac{2EI}{L} (2\theta_A + \theta_B) \pm FEM \\
 &= \frac{2EI}{3} (2\theta_A + \theta_B) + \left( -\frac{1}{12} \times 71,934 \times 3^2 \right) + \left( -\frac{1}{30} \times (125,8876 - 71,934) \times 3^2 \right) \\
 &= \frac{2EI}{3} (2\theta_A + \theta_B) - 70,1366 \\
 M_{BA} &= \frac{2EI}{L} (\theta_A + 2\theta_B) \pm FEM \\
 &= \frac{2EI}{3} (\theta_A + 2\theta_B) + \left( \frac{1}{12} \times 71,934 \times 3^2 \right) + \left( \frac{1}{20} \times (125,8876 - 71,934) \times 3^2 \right) \\
 &= \frac{2EI}{3} (\theta_A + 2\theta_B) + 78,2296
 \end{aligned}$$

Bentang BC

$$\begin{aligned}
 M_{BC} &= \frac{2EI}{L} (2\theta_B + \theta_C) \pm FEM \\
 &= \frac{2EI}{3} (2\theta_B + \theta_C) + \left( -\frac{1}{12} \times 125,8394 \times 3^2 \right) + \left( -\frac{1}{30} \times (179,8394 - 125,8876) \times 3^2 \right) \\
 &= \frac{2EI}{3} (2\theta_B + \theta_C) - 110,6 \\
 M_{CB} &= \frac{2EI}{L} (\theta_B + 2\theta_C) \pm FEM \\
 &= \frac{2EI}{3} (\theta_B + 2\theta_C) + \left( \frac{1}{12} \times 125,8394 \times 3^2 \right) + \left( \frac{1}{20} \times (179,8394 - 125,8876) \times 3^2 \right) \\
 &= \frac{2EI}{3} (\theta_B + 2\theta_C) + 118,694
 \end{aligned}$$

Bentang CD

$$\begin{aligned}
 M_{CD} &= \frac{2EI}{L} (2\theta_C + \theta_D) \pm FEM \\
 &= \frac{2EI}{3} (2\theta_C + \theta_D) + \left( -\frac{1}{12} \times 179,8394 \times 3^2 \right) + \left( -\frac{1}{30} \times (233,786 - 179,8394) \times 3^2 \right) \\
 &= \frac{2EI}{3} (2\theta_C + \theta_D) - 151,063 \\
 M_{DC} &= \frac{2EI}{L} (\theta_C + 2\theta_D) \pm FEM \\
 &= \frac{2EI}{3} (\theta_C + 2\theta_D) + \left( \frac{1}{12} \times 179,8394 \times 3^2 \right) + \left( \frac{1}{20} \times (233,786 - 179,8394) \times 3^2 \right) \\
 &= \frac{2EI}{3} (\theta_C + 2\theta_D) + 159,1556
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan metode *boundary condition* didapat nilai momen sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 M_{AB} &= \frac{2EI}{3} (2 \times -141,5188 + 100,507) - 70,136 \\
 &= -191,824 \text{ kNm/meter of wall} \\
 M_{BA} &= \frac{2EI}{3} (-141,5188 + 2 \times 100,507) + 78,2296 \\
 &= 117,893 \text{ kNm/meter of wall}
 \end{aligned}$$

$$M_{BC} = \frac{2EI}{3} (2 \times 100,507 - 211,955) - 110,6$$

$$= -117,893 \text{ kNm/meter of wall}$$

$$M_{CB} = \frac{2EI}{3} (100,507 - 2 \times 211,955) + 118,694$$

$$= -96,908 \text{ kNm/meter of wall}$$

$$M_{CD} = \frac{2EI}{3} (2 \times -211,955 + 795,868) - 151,063$$

$$= 96,908 \text{ kNm/meter of wall}$$

$$M_{DC} = \frac{2EI}{3} (-211,955 + 2 \times 795,868) + 159,1556$$

$$= 1079,01 \text{ kNm/meter of wall}$$

Mencari reaksi vertikal pada tiap *strut*:

$$A_{kiri} = \frac{1}{2} \times 4 \times 71,934 = 143,868 \text{ kN/m}$$

$$A_{kanan} = -\left(\frac{-191,824 + 117,893}{3}\right) + \left(\frac{71,934 \times 3}{2}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \times 3 \times (125,8876 - 71,934)\right) = 159,5212 \text{ kN/m}$$

$$A = A_{kiri} + A_{kanan} = 143,868 + 159,5212 = 303,3892 \text{ kN/m}$$

$$B_{kiri} = -\left(\frac{-191,824 + 117,893}{3}\right) + \left(\frac{71,934 \times 3}{2}\right) + \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} \times 3 \times (125,8876 - 71,934)\right) = 137,2109 \text{ kN/m}$$

$$B_{kanan} = -\left(\frac{-117,893 - 96,908}{3}\right) + \left(\frac{125,8876 \times 3}{2}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \times 3 \times (179,8394 - 125,8876)\right) = 287,4076 \text{ kN/m}$$

$$B = B_{kiri} + B_{kanan} = 137,2109 + 287,4076 = 424,6185 \text{ kN/m}$$

$$C_{kiri} = \left(\frac{-117,893 - 96,908}{3}\right) + \left(\frac{125,8876 \times 3}{2}\right) + \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} \times 3 \times (179,8394 - 125,8876)\right) = 171,1829 \text{ kN/m}$$

$$C_{kanan} = -\left(\frac{96,908 + 1079,01}{3}\right) + \left(\frac{179,8394 \times 3}{2}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} \times 3 \times (233,786 - 179,8394)\right) = -95,2403 \text{ kN/m}$$

$$C = C_{kiri} + C_{kanan} = 171,1829 - 95,2403 = 75,9426 \text{ kN/m}$$

$$D_{kiri} = \left(\frac{96,908 + 1079,01}{3}\right) + \left(\frac{179,8394 \times 3}{2}\right) + \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} \times 3 \times (233,786 - 179,8394)\right) = 715,6784 \text{ kN/m}$$

$$D_{kanan} = (239,78 \times 2,667) + (233,786 \times 0,333) + \left(\frac{1}{2} \times 0,333 \times (239,78 - 233,786)\right) = 718,343 \text{ kN/m}$$

$$D = D_{kiri} + D_{kanan} = 715,6784 + 718,343 = 1434,0214 \text{ kN/m}$$

Beban *strut* pada level yang ditunjukkan oleh subskrip:

*Horizontal spacing, s D-wall* = 3m

$$P_A = A \times s = 303,3892 \times 3 = 910,1676 \text{ kN}$$

$$P_B = B \times s = 424,6185 \times 3 = 1273,8555 \text{ kN}$$

$$P_C = C \times s = 75,9426 \times 3 = 227,8278 \text{ kN}$$

$$P_D = D \times s = 1434,0214 \times 3 = 4302,0642 \text{ kN}$$

*Wales* pada level *strut* A memikul beban 910,1676 kN dari *strut* A. Beban ini didistribusikan sepanjang 3 m, sehingga:

$$\text{Beban mati merata} = 910,1676/3 = 303,3892 \text{ kN/m}$$

$$M \text{ pada } \textit{Wales} \text{ A} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{10} \times 303,3892 \times 3^2 = 182,0335 \text{ kNm}$$

*Wales* pada level *strut* B memikul beban 1273,8555 kN dari *strut* B. Beban ini didistribusikan sepanjang 3 m, sehingga:

$$\text{Beban mati merata} = 1273,8555/3 = 424,6185 \text{ kN/m}$$

$$M \text{ pada } \textit{Wales} \text{ B} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{10} \times 424,6185 \times 3^2 = 254,7711 \text{ kNm}$$

*Wales* pada level *strut* C memikul beban 227,8278 kN dari *strut* C. Beban ini didistribusikan sepanjang 3 m, sehingga:

$$\text{Beban mati merata} = 227,8278/3 = 75,9426 \text{ kN/m}$$

$$M \text{ pada } \textit{Wales} \text{ C} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{10} \times 75,9426 \times 3^2 = 45,5656 \text{ kNm}$$

*Wales* pada level *strut* D memikul beban 4302,0642 kN dari *strut* D. Beban ini didistribusikan sepanjang 3 m, sehingga:

$$\text{Beban mati merata} = 4302,0642/3 = 1434,0214 \text{ kN/m}$$

$$M \text{ pada } \textit{Wales} \text{ D} = \frac{2}{3} \times \frac{1}{10} \times 1434,0214 \times 3^2 = 860,4128 \text{ kNm}$$

### Perhitungan safety factor pada *bottom heave*

Analisa perhitungan analisis ini didasari oleh teori Terzaghi (1943). Penelitian ini mencari faktor keamanan untuk *braced-cut* pada galian dalam.

$$FS = \frac{5.14c_{av} \left( 1 + \frac{0.2B''}{L} \right) + \frac{c_{av}H}{B'}}{\gamma_a H + Q}$$

$$T = 24 \text{ m}$$

$$\frac{B}{\sqrt{2}} = \frac{12}{\sqrt{2}} = 8,4853 \text{ m}$$

Maka,

$$T > \frac{B}{\sqrt{2}}$$

Didapat,

$$B' = \frac{B}{\sqrt{2}} = \frac{12}{\sqrt{2}} = 8,4853 \text{ m}$$

$$B'' = \sqrt{2} \times B' = \sqrt{2} \times 8,4853 = 12 \text{ m}$$

$$FS = \frac{5,14(23,28) \left( 1 + \frac{0,2(12)}{32} \right) + \frac{(23,28)(16)}{8,4853}}{(8,3325)(16) + 0}$$

$$= 1,2941 > 1,2$$

Stabilitas galian pada *bottom heave* dinyatakan aman karena  $FS > FK$  yaitu 1,2.

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan, diperoleh kesimpulan berupa:

1. Berdasarkan hasil pengolahan data, didapati bahwa potensi dan tekanan yang diberikan oleh lapisan pasir jauh lebih besar (373,5683 kN) yaitu pada lapisan 6 pada tanah pasif dengan kedalaman 30-36,5 m.
2. Beban yang ditanggung pada setiap strut berbeda tergantung dengan tegangan tanah yang didistribusikan pada lapisan tersebut. Selain itu, jarak *horizontal spacing* antar *strut* juga mempengaruhi beban yang ditanggung, semakin besar jaraknya maka akan semakin besar juga beban yang ditanggung. Dari perhitungan beban *strut* ini didapat beban masing-masing strut sebagai berikut:  
*Strut A* = 910,1676 Kn  
*Strut B* = 1273,855 kN  
*Strut C* = 227,8278 kN  
*Strut D* = 4302,0642 kN
3. Beban yang dipikul oleh masing-masing strut akan didistribusikan terhadap *wales* tiap *strut* berupa momen. Beban tersebut dianggap beban merata dengan *horizontal spacing* sebagai panjangnya. Dari perhitungan momen yang didistribusikan terhadap *wales* masing-masing sebagai berikut:  
*Wales A* = 182,0335 kN  
*Wales B* = 254,7711 kN  
*Wales C* = 45,5656 kN  
*Wales D* = 860,4128 kN
4. *Safety factor* pada *bottom heave* dengan tebal 24 m dinyatakan aman karena diatas batas faktor keamanan yaitu 1,2.

### Saran

1. Penanganan terhadap penurunan dari *D-wall* dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti memperbesar dimensi dinding, memperdalam dinding atau dinding sampai menyentuh tanah keras, menggunakan *support system* yang salah satunya adalah dengan *strut-beam*.
2. Dalam perencanaan suatu proyek, sebaiknya dilakukan pengecekan tanah juga di luar dari tanah proyek, karena setiap titik bisa memiliki lapisan tanah yang berbeda dan dapat mempengaruhi besar tegangan yang diterima oleh *D-wall*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Hardiyatmo, H. C. *Teknik Pondasi 2*. Yogyakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 1996.
- Hardiyatmo, H. C. *Analisis dan Perancangan Fondasi I*. Vol. Edisi Ketiga. Yogyakarta: Gajah Mada Universitas Press, 2011.
- M.Das, B. *Principles of Geotechnical Engineering*. 5th. 2002.
- M.Das, B. *Principles of Geotechnical Engineering*. 8<sup>th</sup>. 2002.
- SNI Geoteknik 8460:2017 *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.
- Wu, Minger. "Analytical method for the lateral buckling of the struts in beam string structures." *Engineering Structures* 30 (2008): 2301-2310.
- Zhang, Wengang. "Estimation of strut forces for braced excavation in granular soils from numerical analysis and case histories." *Computers and Geotechnics* October 2018 (2019): 286-295.

