

ANALISA STABILITAS DINDING PENAHAN TANAH (*RETAINING WALL*) AKIBAT BEBAN DINAMIS DENGAN SIMULASI NUMERIK

Oscar Fithrah Nur¹, Abdul Hakam²

ABSTRAK

Penggunaan simulasi numerik dalam menganalisa beban dinamis pada struktur dinding penahan tanah diperkenalkan disini. Analisa yang dilakukan didasarkan pada rumusan konvensional dan simulasi dengan menggunakan *software* komputer. Dinding penahan tanah diberikan perpindahan dan frekuensi getaran, sebagai simulasi dari beban dinamis di lapangan. Pada tahap awal, dihitung stabilitas dinding penahan tanah (*retaining wall*) dalam kondisi statis dengan menggunakan metode perhitungan stabilitas dinding penahan tanah yang biasa digunakan. Dinding penahan tanah dapat dikatakan stabil, apabila angka keamanan yang diperoleh di atas batas yang diambil. Selanjutnya dilakukan simulasi dengan menggunakan program PLAXIS. Dari simulasi ini diperoleh grafik perpindahan terhadap waktu, kecepatan terhadap waktu dan percepatan terhadap waktu. Kemudian perhitungan dilanjutkan dengan menganalisa stabilitas dinamis dinding penahan dengan dua variasi sudut keruntuhan, yaitu $\alpha = 45 + \phi/2$ dan $\alpha = \phi$. Terakhir analisa dilakukan dengan menggunakan metode *Mononobe-Okabe* untuk mengetahui stabilitas dinamis dinding penahan.

Kata Kunci : Dinamika tanah, dinding penahan tanah, stabilitas dinamis.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gempa merupakan salah satu peristiwa alam yang sudah dikenal orang. Gempa terjadi sebagai akibat dari pelepasan energi yang terakumulasi sebelumnya untuk jangka waktu tertentu. Bila massa batuan/ tanah pada struktur di kulit bumi tidak sanggup lagi menahan akumulasi energi di dalam bumi, maka massa batuan/ tanah pada struktur tersebut akan meledak yang kemudian menyebarkan getaran dan gelombang ke segala arah sampai tercipta suatu keseimbangan baru. Kerusakan struktur tanah sebagai akibat langsung dari beban gempa adalah seperti menurunnya daya dukung tanah di bawah pondasi, keruntuhan pada dinding penahan tanah dan keruntuhan pada abutmen jembatan. Sedangkan akibat tidak langsungnya adalah seperti kerusakan bangunan akibat getaran yang ditransmisikan dari tanah ke struktur. Oleh karena itu, struktur perlu direncanakan dan dianalisis terhadap gempa yang mungkin terjadi di masa yang akan datang.

Kondisi di atas sama halnya dengan beban dinamis pada struktur yang berasal dari getaran mesin yang sedang beroperasi. Getaran yang dihasilkan mesin tersebut bisa merusak struktur, bahkan dapat membahayakan jiwa manusia. Agar hal ini tidak terjadi, maka kita perlu mengetahui stabilitas dari struktur tersebut untuk menahan beban dinamis yang bekerja padanya.

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas, e-mail: oscar@ft.unand.ac.id

² Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas, e-mail: ahakam@ft.unand.ac.id

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari stabilitas dinamis dari dinding penahan tanah (*retaining wall*) dengan menggunakan analisa numerik. Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui stabilitas dinamis dari dinding penahan tanah (*retaining wall*) menurut hasil analisa numerik dan membandingkan dengan hasil metoda empiris.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Dimensi ditetapkan sesuai dengan permasalahan yang telah diberikan.
2. Pengecekan angka keamanan (*safety factor*) dari dinding penahan tanah (*retaining wall*).
3. Memprediksi perpindahan yang terjadi dan menganalisa keruntuhan pada model dinding penahan tanah (*retaining wall*) akibat beban dinamis.
4. Hasil analisis dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium dan catatan yang terdapat di referensi.

2. DASAR TEORI

2.1 Dinamika Tanah

Ketetapan propertis dinamik tanah merupakan hal yang tidak mudah dalam menyelesaikan permasalahan-permasalahan gempa di bidang geoteknik. Ada banyak cara yang mungkin dilakukan di lapangan dan di laboratorium untuk menentukan propertis dinamik tanah, dimana masing-masingnya memiliki kelebihan dan keterbatasan untuk masalah yang lebih spesifik lagi. Sejumlah parameter disain pergerakan diwajibkan dalam tahap konseptual proyek skala besar untuk disain pondasi dan estimasi biaya yang diperlukan.

Propertis tanah yang mempengaruhi penjarangan gelombang dan kejadian lainnya adalah kekakuan, peredam, angka *Poisson* dan berat jenis. Dalam hal ini, kekakuan dan peredam sangat penting dan perlu dilakukan evaluasi dalam permasalahan gempa secara geoteknik.

2.1.1 Karakteristik Umum Geoteknik

Untuk melakukan analisa gerakan pada pondasi dan kasus gempa dalam teknik sipil diperlukan karakteristik dari propertis dinamik tanah. Dalam menganalisis beban dinamik pada struktur bangunan juga diperlukan ilmu tentang respon sistem struktur tanah terhadap beban dinamik, yang dikenal dengan propertis dinamik tanah.

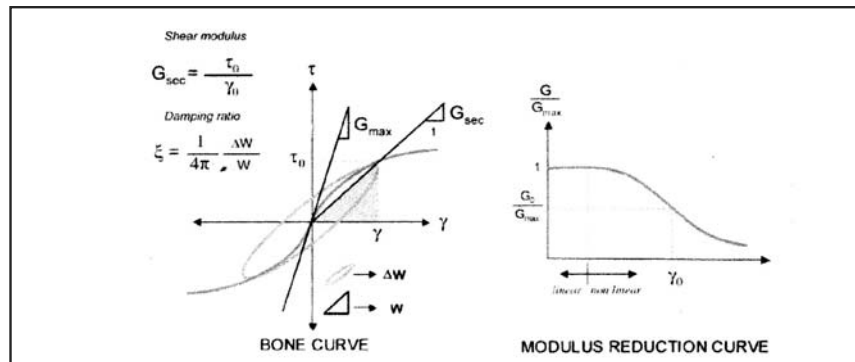
Respon tanah terhadap beban yang bergerak sangat dipengaruhi oleh propertis mekaniknya. Propertis mekanik yang diperlukan dalam mempelajari penjarangan gelombang, adalah modulus geser (G), rasio redaman (λ), dan rasio *Poisson* (ν). Propertis mekanik jenis ini disebut dengan "propertis dinamik tanah", walaupun juga digunakan dalam banyak kasus yang bukan dinamik.

2.1.2 Modulus Geser dan Redaman

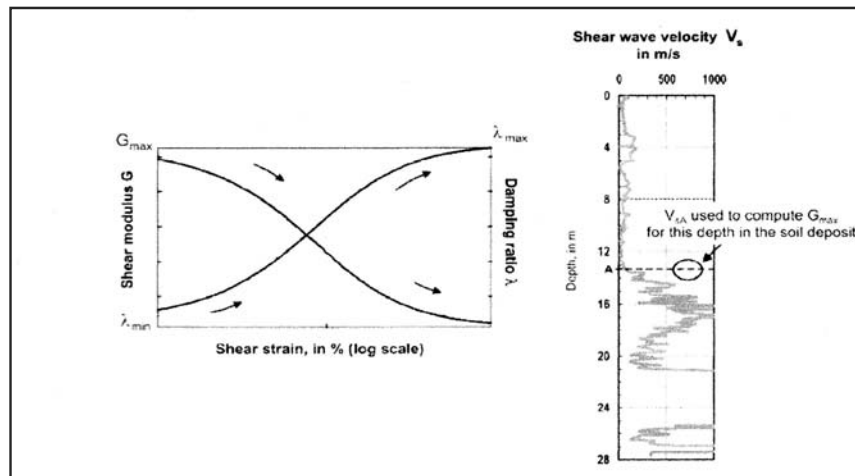
Propertis dinamik tanah juga memerlukan sebuah sumber energi aktif untuk meningkatkan massa tanah dan atau mempengaruhi gelombang terukur. Percobaan *geophysical* menyebarkan gelombang seismik pada tanah dengan tegangan rendah (dibawah 10^{-3} %), sehingga memungkinkan satuan tegangan secara sederhana. Tegangan rendah ini mengikuti teori elastis untuk menyamakan satuan dengan propertis mekanik. Pada tingkat tegangan menengah ($\sim 10^{-2}$ %) responnya menjadi non-

linier, untuk tingkat tegangan tinggi ($\sim 10^{-1} \% - 5\%$) perilaku dinamik tanah sisa non-linier dan akan mulai mengalami perpindahan permanen (plastis) dan segera mencapai kondisi tidak stabil. Untuk menggambarkan perilaku tegangan beban keseluruhan pada tanah diperlukan pengembangan *in-situ* dan percobaan laboratorium secara spesifik direncanakan (didisain) sesuai dengan tingkatan tegangan yang mempengaruhi setiap bagian material.

Grafik penurunan modulus geser biasanya ditunjukkan oleh modulus geser normal G/G_{max} . Pada saat tanah kehilangan kekakuan dengan amplitudo tegangan, kemampuannya untuk meredam gaya dinamik menurun. Hubungan antara tegangan geser dan redaman adalah hubungan invers dengan kurva G/G_{max} . Redaman lebih sering disebut rasio redaman (λ).



Gambar 1. Kurva Modulus Geser



Gambar 2. Kurva Regangan Geser – Modulus Geser

2.2 Teori Getaran

2.2.1 Sistem Satu Derajat Kebebasan (Single Degree of Freedom System)

Secara umum jumlah derajat kebebasan dari suatu sistem sama dengan variabel bebas yang dibutuhkan untuk menentukan posisi semua bagian sistem pada waktu tertentu.

2.2.1.1 *Getaran Bebas Tak Tereadam*

Gambar 3 menunjukkan sebuah pondasi yang diletakkan pegas dibawahnya. Beban W menunjukkan berat pondasi ditambah dengan beban yang ditahan oleh pondasi tersebut. Bila luas

permukaan pondasi didefinisikan dengan A , maka intensitas penyaluran beban ke tanah dasar dinyatakan dengan :

$$q = \frac{W}{A} \tag{1}$$

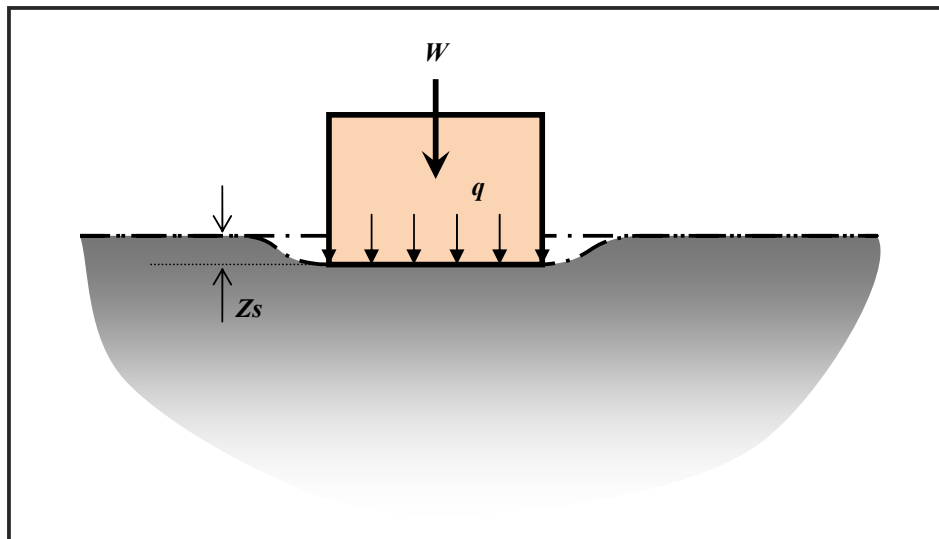
Akibat dari beban W , maka akan terjadi perpindahan Z_s , dengan persamaan :

$$Z_s = \frac{W}{k} \tag{2}$$

dimana k adalah konstanta pegas.

Nilai koefisien reaksi tanah dasar k_s diperoleh dari persamaan :

$$k_s = \frac{q}{Z_s} \tag{3}$$



Gambar 3. Getaran Bebas Sistem Massa – Pegas Tanpa Redaman

Jika pondasi dalam posisi setimbang diberi beban, maka sistem akan bergetar. Persamaan gerak dari pondasi yang diberi beban sejauh z didapat dari Hukum II Newton, selanjutnya ditulis :

$$(W/g) z'' + k z = 0 \tag{4}$$

atau :

$$z'' + (k/m) z = 0 \tag{5}$$

dimana g adalah percepatan gravitasi, $z'' = \frac{d^2 z}{dt^2}$, t adalah waktu dan m adalah massa ($m = W/g$).

Untuk menyelesaikan persamaan (5) gunakan persamaan berikut

$$z = A_1 \cos(\omega_n t) + A_2 \sin(\omega_n t) \tag{6}$$

dimana A_1 dan A_2 adalah konstanta, ω_n adalah frekuensi sirkular natural tak teredam.

Hasil dari substitusi persamaan (6) ke persamaan (5), diperoleh :

$$\omega_n^2 (A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t) + (k/m) (A_1 \cos \omega_n t + A_2 \sin \omega_n t) = 0 \tag{7}$$

atau :

$$\omega_n = \pm \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/dtk)} \tag{8.a}$$

Dan frekuensi natural tak teredam adalah :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{rad/dtk atau Hz}) \quad \dots\dots\dots (8.b)$$

Frekuensi natural tak teredam dapat digambarkan dalam bentuk lain dengan mensubstitusikan W/g untuk m dan Z_s untuk W/k . Sehingga, diperoleh :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{Z_s}} \quad (\text{rad/dtk atau Hz}) \quad (9)$$

Dari hal di atas, dapat dilihat bahwa untuk getaran tak teredam dari sistem satu derajat kebebasan, gerakan yang terjadi adalah gerakan harmonis dengan frekuensi natural f_n .

Jika perpindahan dan kecepatan pada saat $t = 0$ adalah z_0 dan \dot{z}_0 , selanjutnya diperoleh nilai A_1 dan A_2 sebagai berikut :

$$A_1 = z_0 \quad ; \quad A_2 = \dot{z}_0 / \omega_n \quad (10)$$

2.2.1.2 *Getaran Bebas dengan Redaman*

Bagian matematis yang paling sederhana adalah redaman *viscous* atau *dashpot*, seperti pada **Gambar 3**. Gaya redaman berbanding lurus dengan kecepatan \dot{z} dan mempunyai nilai yang dapat dihitung dari koefisien redaman *viscous* (c) dengan satuan $\text{kg}/(\text{m/dtk})$ atau kg.dtk/m . Redaman mempunyai suatu gaya yang berlawanan gerak terhadap massa.

Untuk sistem getaran bebas pada Gambar 3, persamaan gerak differensial dapat diperoleh dengan menggunakan Hukum II Newton dengan mengukur perpindahan dari posisi diam. Perpindahan positif akan menghasilkan suatu gaya pegas yang beraksi terhadap massa dalam arah negatif.

Penjumlahan dari gaya vertikal akan menghasilkan persamaan :

$$m \ddot{z} + c \dot{z} + k z = 0 \quad (11)$$

Untuk getaran bebas, dimisalkan $z = A e^{rt}$ disubstitusikan ke persamaan (11), diperoleh :

$$r^2 + (c/m)r + (k/m) = 0 \quad (12)$$

dimana solusi dari persamaan (12) :

$$r = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m}} \quad (13)$$

Ada tiga kondisi yang harus dipertimbangkan untuk persamaan (13), yaitu :

1. Jika $c/2m > \sqrt{k/m}$, maka nilai akar-akar dari persamaan (12) adalah real dan bernilai positif. Atau dengan kata lain, nilai r pada persamaan (13) adalah real dan bernilai positif. Mengacu pada kasus *overdamping*.

2. Jika $c/2m = \sqrt{k/m}$, maka $r = -c/2$. Mengacu pada kasus *critical damping*.
Sehingga untuk kasus ini, nilai redaman $c = c_c = 2\sqrt{km}$ (14)

3. Jika $c/2m < \sqrt{k/m}$, maka nilai akar-akar dari persamaan (12) menjadi bilangan kompleks, dimana $r = -\frac{c}{2m} \pm i \left(\sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}} \right)$. Mengacu pada kasus *underdamping*.

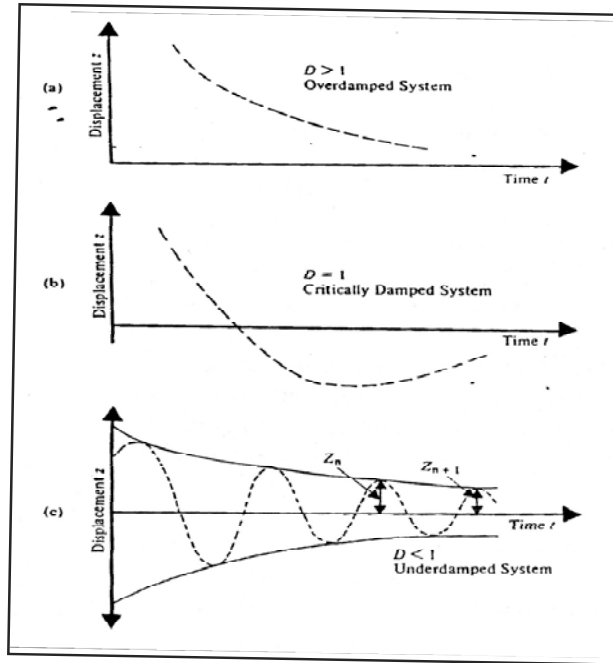
Selanjutnya rasio redaman D dapat didefinisikan dengan persamaan :

$$D = c/c_c = c/\sqrt{2km} \quad (15)$$

Dengan menambahkan rasio redaman D , maka persamaan (13) dapat ditulis menjadi :

$$r = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m}} = \omega_n \left(-D \pm \sqrt{D^2 - 1} \right) \quad (16)$$

dimana $\omega_n = \sqrt{k/m}$



Gambar 4. Getaran Bebas dengan Redaman (a) *overdamping* (redaman super kritis) ; (b) *critical damping* (redaman kritis) dan (c) *underdamping* (redaman sub kritis)

Pengaruh adanya redaman adalah berkurangnya amplitudo getaran secara bertahap terhadap fungsi waktu.

2.3 Teori Tekanan Tanah Menurut Mononobe-Okabe

2.3.1 Tekanan Tanah Aktif menurut Mononobe-Okabe

Pada tahun 1776, *Coulomb* memperkenalkan persamaan tekanan tanah aktif (P_A) untuk dinding penahan tanah (*retaining wall*) pada tanah urugan kering tak berkoheisi, sebagai berikut :

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma H^2 K_A \quad (17)$$

dimana :

P_A = gaya aktif per satu satuan panjang dinding

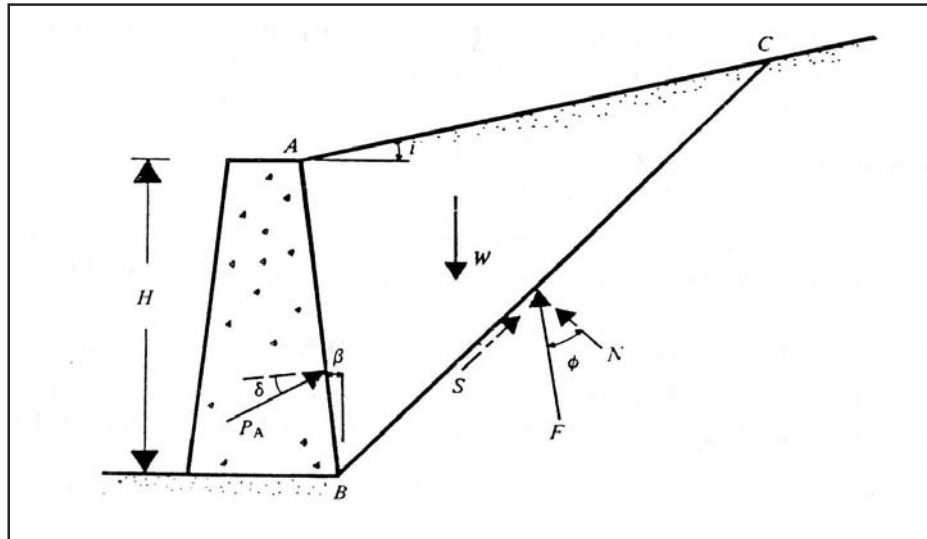
γ = berat volume tanah

H = tinggi *retaining wall*

K_A = koefisien tekanan aktif tanah

$$K_A = \frac{\cos^2(\phi - \beta)}{\cos^2 \beta \cos(\delta + \beta) \left[1 + \left(\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - i)}{\cos(\delta + \beta) \cos(\beta - i)} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^2} \quad (18)$$

- dimana : ϕ = sudut geser tanah
 δ = sudut geser dinding
 β = kemiringan dinding terhadap bidang vertikal
 i = kemiringan dinding terhadap bidang horizontal



Gambar 5. Tekanan Tanah Aktif Coulomb

Persamaan tekanan tanah aktif **Coulomb** bisa dimodifikasi untuk menghitung koefisien percepatan vertikal dan horizontal yang disebabkan oleh gempa. Modifikasi ini secara umum dianggap sebagai *Mononobe-Okabe analysis* (Mononobe, 1929; Okabe, 1926).

Penyelesaian *Mononobe-Okabe* berdasarkan asumsi sebagai berikut :

1. Keruntuhan terjadi sepanjang garis keruntuhan BC pada gambar.
2. Perpindahan pada dinding cukup untuk menghasilkan tekanan aktif minimum.
3. Nilai kuat geser pada tanah tak berkohesi diperoleh dengan persamaan

$$s = \sigma' \tan \phi \quad (19)$$

dimana σ' adalah tegangan efektif tanah dan s adalah kekuatan geser tanah.

4. Pada saat runtuh, kuat geser terjadi sepanjang garis keruntuhan.
5. Tanah di belakang dinding penahan tanah (*retaining walls*) dianggap kaku.

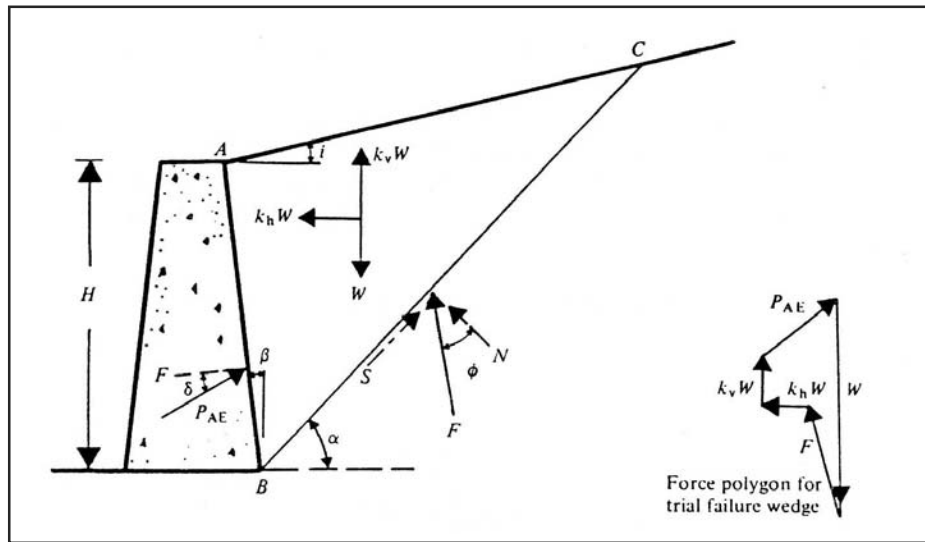
Gaya-gaya yang diperhitungkan dalam solusi *Mononobe-Okabe* ditunjukkan pada **Gambar 6**. Garis AB adalah bagian belakang *retaining wall* dan ABC adalah bagian tanah yang akan mengalami keruntuhan. Gaya pada bagian yang runtuh per satu satuan panjang dinding adalah :

1. berat sendiri bagian yang runtuh (W)
2. gaya aktif (P_{AE})
3. resultan gaya geser dan normal sepanjang bidang runtuh F
4. $k_h W$ dan $k_v W$, momen inersia dalam arah horizontal dan vertikal, dimana;

$$k_h = \frac{\text{percepatan gempa dari komponen horizontal}}{g} \quad (20)$$

$$k_v = \frac{\text{percepatan gempa dari komponen vertikal}}{g} \quad (21)$$

dimana g adalah percepatan gravitasi.



Gambar 6. Asal Mula Persamaan *Mononobe-Okabe*

Gaya aktif ditentukan dari analisis lapisan yang digambarkan dalam persamaan berikut :

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{AE} \quad (22)$$

dimana :

K_{AE} = koefisien tekanan tanah aktif dengan pengaruh gempa.

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \beta)}{\cos \theta \cos^2 \beta \cos(\delta + \beta + \theta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(i - \beta)}} \right]^2} \quad (23)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{k_h}{(1 - k_v)} \right]$$

2.3.2 Tekanan Tanah Pasif menurut Mononobe-Okabe

Gaya pasif per satuan panjang dinding akibat gempa adalah sebagai berikut :

$$P_{PE} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{PE} \quad (24)$$

dimana :

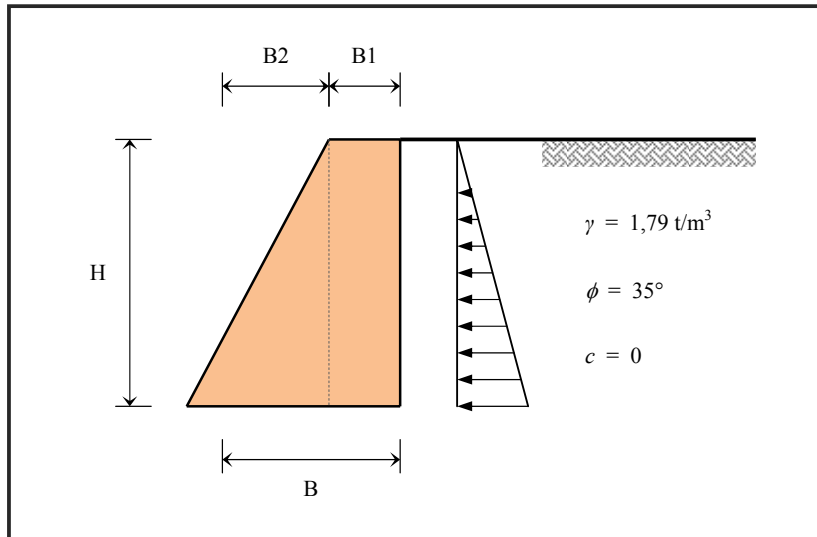
K_{PE} = koefisien tekanan tanah pasif dengan pengaruh gempa.

$$K_{PE} = \frac{\sin^2(\beta + \theta - \phi)}{\cos \theta \sin^2 \beta \sin(\delta + \beta + \theta - 90) \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \theta + \alpha)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(\alpha - \beta)}} \right]^2} \quad (25)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{k_h}{(1 - k_v)} \right]$$

3. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Gambar di bawah ini merupakan contoh kasus dari dinding penahan tanah (*retaining wall*) yang akan dianalisis.



Gambar 7. Contoh Kasus

Data Tanah :

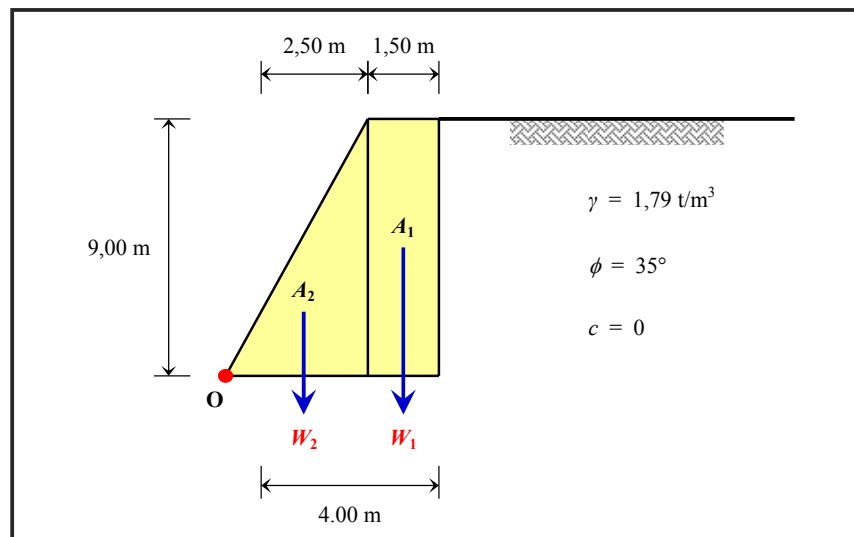
- Tanah pengisi = pasir lepas
- Sudut geser (ϕ) = 35°
- Berat jenis beton (γ_c) = $2,40 \text{ t/m}^3$
- Berat jenis tanah (γ_s) = $1,79 \text{ t/m}^3$
- Koef. gempa (K_h) = percepatan gempa (a_g) = $0,05g$
- Percepatan gravitasi (g) = $9,81 \text{ m/dt}^2$

Dimensi Dinding Penahan Tanah :

- B = $4,00 \text{ m}$
- H = $9,00 \text{ m}$
- B1 = $1,50 \text{ m}$
- B2 = $2,50 \text{ m}$

A. Stabilitas Eksternal

1. Perhitungan Berat dan Gaya pada Dinding Penahan Tanah



Tabel 1. Perhitungan Berat Dinding Penahan Tanah dan Momen Tahanan terhadap titik O

No.	Uraian Perhitungan Berat Dinding	Berat Dinding (ton)	Lengan Momen (m)	Momen Tahanan (ton.m)
1.	$W_1 = 2,40 \times (1,50 \times 9,0)$	32,40	3,25	105,30
2.	$W_2 = 2,40 \times (\frac{1}{2} \times 2,50 \times 9,0)$	27,00	1,67	45,00
Total		59,40		150,30

Keterangan :

$W_i = \gamma_c A_i$, merupakan berat dari dinding penahan tanah (*retaining wall*) persatuan panjang dinding, γ_c adalah berat volume dinding yang terbuat dari beton ($\gamma_c = 2.40 \text{ t/m}^3$) dan A_i adalah luas penampang dari bagian-bagian dinding penahan tanah.

2. Perhitungan Tekanan Tanah

Tekanan tanah aktif di belakang dinding penahan tanah (*retaining wall*), dihitung berdasarkan metode *Rankine*, yaitu sebagai berikut :

$$K_a = \tan^2 (45 - \phi/2) = \tan^2 [45 - (35/2)] = 0,270$$

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 = \frac{1}{2} (0,27) (1,79) (9,0^2) = 19,574 \text{ ton}$$

3. Resume Beban-Beban dan Gaya-Gaya yang Bekerja pada Dinding Penahan Tanah

Tabel 2. Resume Beban-Beban dan Gaya-Gaya yang Bekerja pada Dinding Penahan Tanah

No.	Beban	Nilai Beban (ton)	Lengan Momen (m)	M_o (ton.m)	M_R (ton.m)
1.	W_1	32,400	3,250	–	105,30
2.	W_2	27,000	1,667	–	45,00
3.	P_a	19,574	3,000	58,722	–

4. Faktor Keamanan untuk Dinding Penahan Tanah

a). Faktor Keamanan terhadap Guling (*Overtuning*)

$$SF (\text{overtuning}) = \frac{\sum M_R}{\sum M_o} = \frac{105,30}{45,00} = 2,56$$

b). Faktor Keamanan terhadap Geser (*Sliding*)

$$SF (\text{sliding}) = \frac{\sum V \tan (k_1 \phi)}{P_a} = \frac{(59,40) \tan [(2/3)(35)]}{19,574} = 1,31$$

c). Faktor Keamanan terhadap Daya Dukung (*Bearing Capacity*)

Kapasitas dukung ultimit dihitung menggunakan persamaan *Terzaghi* dengan asumsi bahwa dinding penahan tanah merupakan pondasi memanjang.

Tabel 3. Nilai-Nilai Faktor Kapasitas Daya Dukung Terzaghi

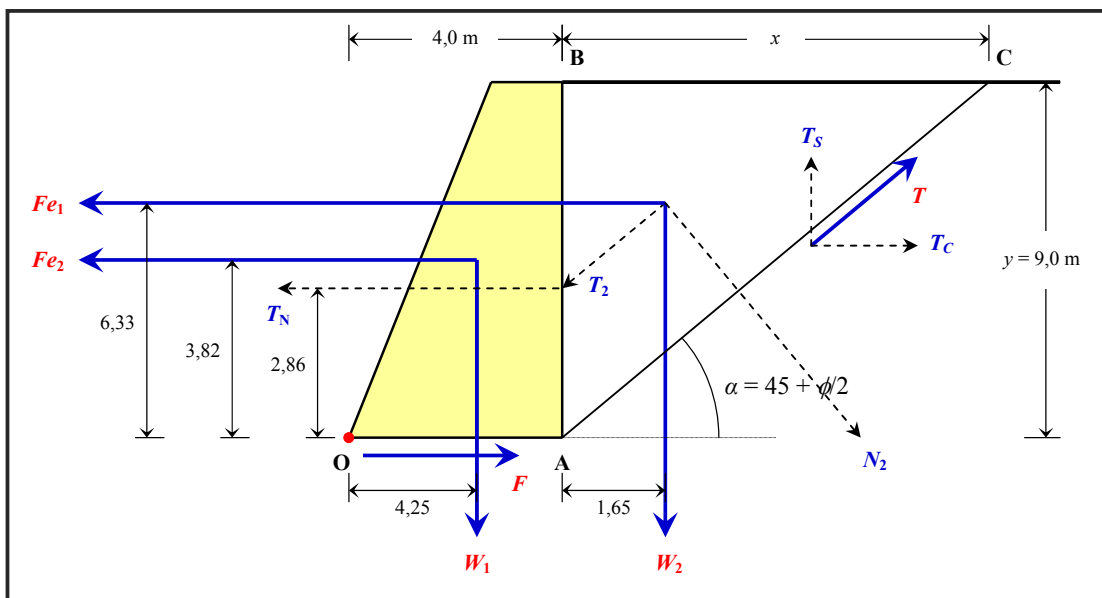
ϕ	Keruntuhan Geser Umum			ϕ	Keruntuhan Geser Umum		
	N_c	N_q	N_γ		N_c	N_q	N_γ
0	5,7	1,0	0,0	25	25,1	12,7	9,7
5	7,3	1,6	0,5	30	37,2	22,5	19,7
10	9,6	2,7	1,2	35	57,8	41,4	42,4
15	12,9	4,4	2,5	40	95,7	81,3	100,4
20	17,7	7,4	5,0	45	172,3	173,3	297,5

Untuk $\phi = 35^\circ$, dari Tabel 3, diperoleh :

- $N_q = 41,40$ dan $N_\gamma = 42,20$
- $q_u = q N_q + \frac{1}{2} B \gamma N_\gamma = (0,0) (41,40) + \frac{1}{2} (4,0) (1,79) (42,20) = 151,076 \text{ t/m}^2$
- $q_{max} = \frac{V}{B} + \frac{1}{12B} = \frac{59,40}{4,0} + \frac{1}{12(4,0)} = 14,871 \text{ t/m}^2$
- **SF (bearing capacity)** = $\frac{q_u}{q_{max}} = \frac{151,076}{14,781} = 10,61$

B. Stabilitas Dinamis

Stabilitas dinamis dinding penahan tanah dengan sudut keruntuhan $\alpha = 45 + \phi/2$, sebagai berikut :



Panjang bidang runtuhan di belakang dinding penahan tanah :

$$\text{Panjang AC} = r$$

$$\text{Panjang AB} = y$$

$$\text{Panjang BC} = x$$

$$\sin \alpha = \frac{y}{r}$$

$$\sin (45 + \phi/2) = \frac{9}{r}$$

$$r = \frac{9}{\sin(45 + (\phi/2))} = \frac{9}{\sin(45 + (35/2))} = 10,15 \text{ m}$$

$$x = \sqrt{r^2 - y^2} = \sqrt{(10,15)^2 - (9,0)^2} = 4,68 \text{ m}$$

Gaya-gaya-gaya dinamis yang bekerja pada dinding penahan tanah :

$$W_1 = \gamma_1 \times A_1 = 59,40 \text{ t/m}$$

$$W_2 = \gamma_2 \times A_2 = 37,70 \text{ t/m}$$

$$\begin{aligned}
 Fe_1 &= (W_1/g) \times a_g = 2,970 \text{ ton} \\
 Fe_2 &= (W_2/g) \times a_g = 1,885 \text{ ton} \\
 N_2 &= W_2 \cos \alpha = 37,70 (\cos 62,5) = 17,41 \text{ t/m} \\
 T_2 &= W_2 \sin \alpha = 37,70 (\sin 62,5) = 33,44 \text{ t/m} \\
 T &= N_2 \tan \phi = 17,4 (\tan 35) = 12,19 \text{ t/m} \\
 F &= W_1 \tan \phi = 59,4 (\tan 35) = 41,59 \text{ t/m} \\
 T_N &= T_2 \cos \alpha = 33,44 (\cos 62,5) = 15,44 \text{ t/m} \\
 T_C &= T \cos \alpha = 12,19 (\cos 62,5) = 5,63 \text{ t/m} \\
 T_S &= T \sin \alpha = 12,19 (\sin 62,5) = 10,81 \text{ t/m}
 \end{aligned}$$

Tabel 4. Resume Beban-Beban dan Gaya-Gaya yang Bekerja pada Dinding Penahan Tanah

No.	Beban	Nilai Beban (ton)	Lengan Momen (m)	M_O (ton.m)	M_R (ton.m)
1.	W_1	59,4	4,25	–	252,450
2.	T_N	15,44	2,86	44,158	–
3.	Fe_1	2,97	3,82	11,345	–
4.	Fe_2	1,885	6,33	11,932	–
Σ				67,437	252,450

Faktor keamanan untuk dinding penahan tanah :

a). Faktor Keamanan terhadap Guling (*Overtuning*)

$$\begin{aligned}
 SF_{(overtuning)} &= \frac{\sum M_R}{\sum M_O} = \frac{W_1}{T_N + Fe_1 + Fe_2} = \frac{252,45}{44,158 + 11,345 + 11,932} = \frac{252,45}{67,437} \\
 &= \mathbf{3,74}
 \end{aligned}$$

b). Faktor Keamanan terhadap Geser (*Sliding*)

$$\begin{aligned}
 SF_{(sliding)} &= \frac{T_C + F}{T_N + Fe_1 + Fe_2} = \frac{5,63 + 41,59}{15,44 + 2,97 + 1,885} = \frac{47,22}{20,295} = \mathbf{2,33}
 \end{aligned}$$

c). Faktor Keamanan terhadap Daya Dukung (*Bearing Capacity*)

– Kapasitas daya dukung :

$$q_{max} = \frac{V}{B} + \frac{1}{12B} = \frac{(59,40 + 37,70)}{4,0} + \frac{1}{12(4,0)} = 24,296$$

$$N_q = 41,40$$

$$N_y = 42,20$$

$$q_u = q N_q + \frac{1}{2} B \gamma N_y = (0)(41,40) + \frac{1}{2} (4,0) (1,79) (42,20) = 151,076 \text{ t/m}^2$$

– Faktor keamanan terhadap daya dukung :

$$\begin{aligned}
 SF_{(bearing\ capacity)} &= \frac{q_u}{q_{max}} = \frac{151,076}{24,296} = \mathbf{10,61}
 \end{aligned}$$

Tabel 5. Resume Hasil Perhitungan Angka Keamanan

No.	Jenis Stabilitas	Statis	Mononobe - Okabe	$\alpha = 45 + \phi/2$	$\alpha = \phi$
1.	<i>Overtuning</i> (Guling)	2,56	0,85	3,77	0,90
2.	<i>Sliding</i> (Geser)	1,31	0,61	2,33	1,59
3.	<i>Bearing Capacity</i> (Daya Dukung)	10,16	10,16	6,22	4,98

Dari perhitungan mencari angka keamanan dinding penahan dalam kondisi statis, didapatkan angka keamanan yang besar dari batas angka keamanan yang diambil yaitu 1 – 2. Masing-masing angka keamanan tersebut adalah 2,56 untuk angka keamanan guling, 1,31 untuk angka keamanan geser, dan 10,16 untuk angka keamanan terhadap daya dukung tanah dasar. Perhitungan statis ini dilakukan untuk mengetahui apakah dinding penahan tanah mampu menahan berat sendiri dan gaya aktif tanah di belakangnya.

Perhitungan dilanjutkan dengan mencari angka keamanan dinding dengan pengaruh gempa yang menggunakan metode *Mononobe-Okabe*. Dari perhitungan ini didapatkan angka keamanan guling dan geser dibawah batas yang diambil, tetapi angka keamanan untuk daya dukung tanah dasar berada diatas batas yang diambil. Angka keamanan untuk guling yang diperoleh adalah 0,85 dan untuk geser 0,61. Sedangkan angka keamanan untuk daya dukung tanah dasar adalah 10,16. Setelah dilakukan analisa dengan menggunakan *software*, dilakukan perhitungan untuk mencari stabilitas dinamis dengan dua sudut keruntuhan yaitu $\alpha = 45 + \phi/2$ dan $\alpha = \phi$.

Dari perhitungan dengan sudut keruntuhan $\alpha = 45 + \phi/2$ didapat angka keamanan untuk guling 3,77; sedangkan angka keamanan untuk geser dan daya dukung tanah dasar masing-masing 2,33 dan 6,22. Kemudian dari perhitungan dengan sudut keruntuhan $\alpha = \phi$, angka keamanan yang didapat untuk guling adalah 0,9; sedangkan angka keamanan untuk geser dan daya dukung tanah dasar adalah 1,59 dan 4,98.

Dari hasil keluaran *running* program, terjadi perpindahan horizontal arah X (U_x) sejauh $475,08 \times 10^{-3}$ m dengan besar penambahan perpindahan (dU_x) sebesar $28,56 \times 10^{-6}$ m. Untuk kecepatan maksimum horizontal arah X adalah $62,83 \times 10^{-3}$ m/s dan percepatan maksimum horizontal arah X adalah $212,01 \times 10^{-3}$ m/s².

4. KESIMPULAN

Bedasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil perhitungan stabilitas statis didapatkan hasil bahwa struktur dinding penahan tanah akan stabil terhadap guling, geser dan keruntuhan.
2. Dari hasil perhitungan stabilitas dinamis dengan sudut keruntuhan $\alpha = 45 + \phi/2$ didapatkan hasil bahwa struktur dinding penahan tanah akan stabil terhadap guling, geser dan keruntuhan. Sedangkan dari hasil perhitungan dengan sudut keruntuhan $\alpha = \phi$ dinding penahan tanah akan mengalami guling.
3. Dari hasil perhitungan stabilitas dengan menambahkan pengaruh beban gempa, struktur dinding penahan tanah akan mengalami guling dan geser.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Das, Braja M., (1995), "*Mekanika Tanah*", Jilid 2, Erlangga, Jakarta.
- Das, Braja M., (1984), "*Fundamentals of Soil Dynamics*", Elsevier Science Publishing Co. Inc., New York.

