

SENSITIVITY ANALYSIS OF PILE FOUNDATIONS UNDER BRIDGE ABUTMENTS ON HIGH SLOPE AREAS (CASE STUDY IN BESAKIH, BALI)

Danang Setiya Raharja*

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya

Jl. Dukuh Kupang XX No. 54, Kota Surabaya, 60225, Jawa Timur, Indonesia

E-mail: raharja.ds@uwks.ac.id*

(*) Penulis Koresponden

ABSTRAK: Analisis kestabilan lereng dapat dilakukan dengan menggunakan metode kesetimbangan batas dan metode elemen hingga dengan hasil yang relatif sama. Pada kasus lereng yang diperkuat dengan tiang pancang anti longsor, perlu menggunakan metode analisis yang tepat karena keseimbangan gaya dan momen perlu dipenuhi. *Metode Morgenstern-Price* menjadi salah satu pilihan terbaik untuk menganalisis kasus ini. Studi ini bertujuan untuk melakukan analisa sensitivitas fondasi tiang bor yang memperkuat lereng tinggi dan menopang abutmen jembatan dilakukan dengan menggunakan studi kasus di Jembatan Besakih, Bali. Faktor panjang dan jarak tiang fondasi pada arah melintang jalan dipilih untuk melihat sensitivitasnya terhadap faktor keamanan stabilitas lereng. Faktor panjang fondasi tiang pancang divariasikan antara 20 m sampai 26 m dengan interval 1 m. Sebagai perbandingan, faktor jarak tanam divariasikan antara 1,7 m hingga 2,3 m dengan interval 0,1 m. Hasil analisis terhadap sepuluh variasi model menunjukkan bahwa faktor panjang tiang tidak sensitif, sedangkan faktor jarak cukup sensitif terhadap kestabilan lereng. Jarak antar tumpukan yang semakin kecil akan menghasilkan FS yang lebih baik dengan pola parabola.

KATA KUNCI : analisa sensitivitas, anti-*slide pile*, metode kesetimbangan batas, stabilitas lereng

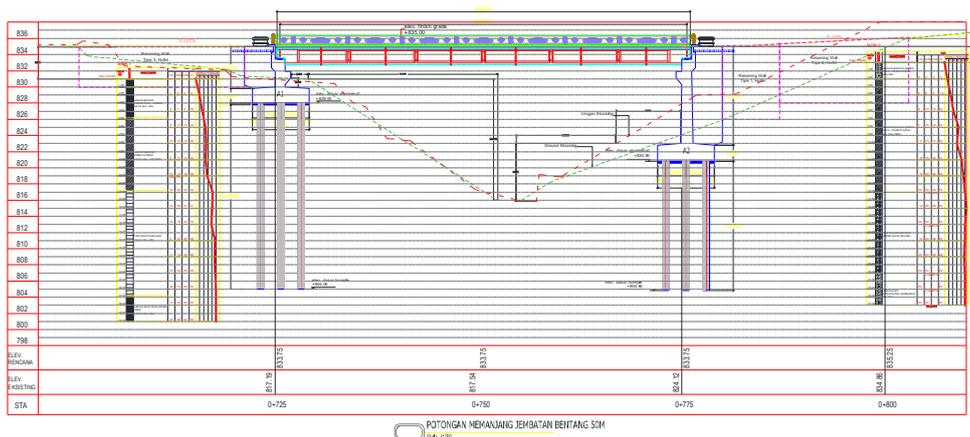
1. PENDAHULUAN

Metode analisa sensitivitas tiang fondasi pada area lereng yang cukup tinggi memiliki pendekatan yang sesuai dengan analisa stabilitas lereng. Tiang fondasi memiliki fungsi ganda yaitu sebagai penyalur beban dari abutment jembatan kemudian disalurkan ke lapisan tanah keras dan sebagai penahan atau pemotong bidang keruntuhan lereng sehingga bisa meningkatkan nilai faktor keamanan stabilitasnya. Beberapa metode analisa stabilitas lereng meliputi metode irisan dalam kerangka kesetimbangan batas (*limit equilibrium*), elemen hingga (*finite element*) dan beda hingga (*finite difference*). Ketiga metode tersebut umumnya dilakukan dengan menggunakan program bantu komputer. Hasil analisa sensitivitas parameter tanah dan timbunan pada suatu lereng alam di Kuala Lumpur menunjukkan persentase faktor keamanan stabilitas dari kedua metode (metode kesetimbangan batas dan elemen hingga) memiliki kecocokan yang sangat baik satu dengan lainnya (Agam dkk., 2016). Analisa sensitivitas faktor keamanan lereng menggunakan metode beda hingga menunjukkan bahwa faktor tinjauan tinggi lereng dan kemiringan (sudut) lereng memberikan pengaruh yang besar terhadap nilai FK, sedangkan kohesi dan sudut geser dalam memiliki pengaruh yang relatif serupa (Cheng & Jiang, 2012).

Haskell dkk. (2012) melakukan analisa sensitivitas tiang fondasi terhadap beban pseudo-statik gempa pada lapisan tanah yang memiliki potensi likuefaksi serta pergeseran lateral (*lateral spreading*). Analisa secara komprehensif dilakukan dengan penyederhanaan model (*simplified pseudo-statik analysis method*). Variasi parameter tiang tidak memberikan pengaruh yang signifikan, namun ketidakpastian parameter tanah yang diperoleh dari hasil korelasi data N-SPT menjadi faktor yang sangat berpengaruh terhadap kegagalan tiang fondasi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisa sensitivitas fondasi tiang bor yang memperkuat lereng tinggi dan menopang abutmen jembatan dilakukan dengan menggunakan studi kasus di Jembatan Besakih, Bali. Analisa stabilitas lereng akan menggunakan program bantu komputer metode kesetimbangan batas. Lereng yang di analisa adalah lereng alam yang menjadi lokasi dudukan / abutment jembatan jalan raya dengan fondasi tiang. Fokus pengamatan yaitu pada pengaruh faktor panjang dan spasi (arah melintang jalan) tiang fondasi. Jenis tiang fondasi yang digunakan adalah tiang bor (*bored pile*). Tinjauan hanya dilakukan pada satu sisi abutment, yaitu abutment nomor 1 (lihat **Gambar 1**).

SENSITIVITY ANALYSIS OF PILE FOUNDATIONS UNDER BRIDGE ABUTMENTS ON HIGH SLOPE AREAS (CASE STUDY IN BESAKIH, BALI)

(Danang Setiya Raharja)



Gambar 1. Potongan penampang memanjang jembatan Besakih

2. Material dan Metode Penelitian

2.1 Parameter Tanah dan Pembebanan

Parameter tanah yang digunakan untuk analisa stabilitas suatu lereng meliputi *unit weight* (γ), *undrained shear strength* (S_u), *cohesion* (c'), *internal friction angle* (ϕ'), *soil modulus* (E), dan *poisson's ratio* (ν). Parameter tersebut diperoleh dari hasil pengujian laboratorium dan dikombinasikan dengan korelasi empirik dari nilai N-SPT sesuai (Look, 2007) dan (Warman, 2019). Data bor yang menjadi acuan adalah bor-1 seperti yang ditunjukkan pada sisi kiri di Gambar 1. Detail nilai pada setiap parameter dan lapisan tanah beserta jenis tanahnya disajikan pada **Tabel 1**. Pada 12 m awal dari permukaan tanah berupa tanah lanau kepasiran bergradasi halus dengan nilai N berkisar antara 10-20 blows/feet, diikuti 12 m berikutnya (hingga kedalaman 25 m) berupa tanah pasir kasar kelanauan dengan nilai N rata-rata 40 blows/feet, dan di bawahnya berupa tanah pasir yang tersementasi dengan nilai N lebih dari 50 blows/feet.

Beban yang diperhitungkan pada analisa meliputi beban dari struktur jembatan, beban lalu lintas, dan beban gempa. Beban struktur atas dengan berbagai macam kombinasi yang disalurkan kepada abutment melalui peletakan sebesar 824 kN/m (tegak lurus jalan). Beban lalu lintas yang diambil sebesar 15 kN/m² karena

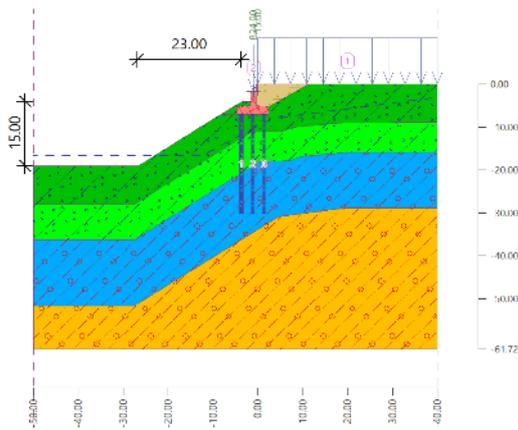
pertimbangan jalan kelas I. Beban gempa untuk lokasi Besakih di pulau Bali diambil nilai PGA sesuai peta gempa Indonesia 2017 sebesar 0,45 g. Parameter yang dimasukkan ke dalam program bantu untuk menjadi beban pseudo-statik adalah faktor percepatan horizontal (k_h) yang nilainya sebesar 0,5 x PGA sehingga diperoleh k_h 0,225 g.

2.2 Geometri Model

Analisa sensitivitas tiang fondasi pada lereng ini menggunakan geometri penampang dua dimensi (2D). Area yang ditinjau adalah abutmen 1 dimana secara posisi berada di sebelah kiri sehingga lereng akan mengarah ke sisi kanan. Namun, karena keterbatasan program bantu yang tidak bisa menyimulasikan lereng ke sisi kanan, geometri dari abutment 1 dan lerengnya dicerminkan sehingga penampang model menjadi seperti pada **Gambar 2**.

Tabel 1. Parameter tanah dasar sesuai data bor-1

Soil Description	Soil Type	N-SPT design	γ (kN/m ³)	S_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)	ν
Lanau kepasiran halus	C	10	17	60	6	20	8	0,32
Lanau kepasiran halus	C	20	17	120	12	20	15	0,32
Pasir kasar kelanauan	S	40	17,5	240	10	35	25	0,31
Pasir sementasi padat	S	50	18	300	15	38	30	0,30



Gambar 2. Geometri penampang tiang fondasi abutment pada lereng



Gambar 3. Penampang tiang bor diameter 80 cm

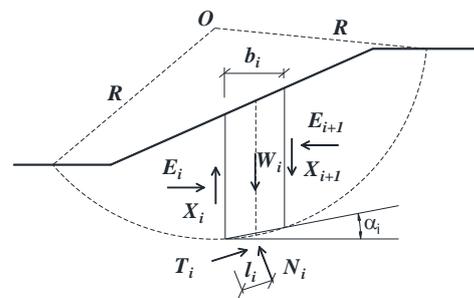
Tiang fondasi yang digunakan adalah ting bor dengan diameter 80 cm. Tulangan utama yang digunakan adalah besi ulir diameter 25 mm sejumlah 16 buah dengan tulangan sengkang berbentuk spiral digunakan besi ulir diameter 13 mm spasi 125 mm. Tebal selimut beton yang diterapkan adalah 70 mm (**Gambar 3**). Panjang tiang bor akan menjadi faktor yang akan ditinjau sensitivitasnya terhadap faktor keamanan stabilitas lereng. Tiang bor akan dipasang tepat di bawah struktur abutment sebanyak 3 baris dengan spasi 2,5 m. Spasi antar tiang pada arah masuk bidang gambar (tegak lurus arah jalan) akan menjadi faktor kedua yang akan ditinjau terhadap stabilitas lereng.

Lereng di belakang abutment memiliki dimensi tinggi 15 m dan lebar 23 m, atau setara dengan kemiringan 1:1,5. Profil stratigrafi lapisan tanah dimodelkan mengikuti bentuk permukaan lereng sebagai bentuk justifikasi atas ketidakpastian karena hanya tersedia 1 data bor pada area puncak lereng seperti yang terlihat pada **Gambar 1**. Keterangan setiap lapisan tanah mengikuti urutan data yang tersedia pada **Tabel 1**.

2.3 Limit Equilibrium Method

Analisa kesetimbangan batas atau umumnya disebut dengan istilah dalam bahasa Inggris

berupa *Limit Equilibrium Method* (LEM) memerlukan asumsi bidang longsor dari lereng. Kemudian masa tanah di atas bidang longsor asumsi tersebut dibagi menjadi blok-blok dengan garis potongan yang selalu vertikal, atau umumnya metode ini disebut sebagai metode irisan (*slice method*). Bentuk geometri dari bidang longsor bisa berupa lingkaran (*circular*) atau segi banyak (*polygon*). Pada penelitian ini akan digunakan model longsor *circular*. Gaya-gaya yang terbentuk akibat dari berat tanah (gravitasi) serta kuat geser tanah akan saling berinteraksi pada setiap blok tanah tadi. Perbandingan antara besarnya gaya pendorong terhadap gaya penahan inilah yang diformulasikan untuk mendapatkan nilai faktor keamanan lereng pada metode LEM. Skema metode LEM disajikan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Skema longsor lereng berbentuk *circular* dengan metode irisan (Geo5 Manual, 2023)

Parameter X_i dan E_i adalah gaya geser dan normal yang bekerja pada setiap blok. Sedangkan parameter T_i dan N_i adalah gaya geser dan normal pada bidang kontak dasar setiap blok dengan tanah yang tidak bergerak. Parameter W_i adalah gaya berat dari setiap blok yang diakibatkan tarikan gaya gravitasi (g) terhadap masa suatu benda (m), dimana secara notasi persamaan (1).

$$W = m \times g \quad (1)$$

Metode irisan dengan bidang longsor *circular* terdiri dari beberapa jenis metode berdasarkan nama penemunya, antara lain *Fellenius/Petterson*, *Bishop*, *Spencer*, *Janbu*, *Morgenster-Price*, *Shahunyants*, dan *ITF Method* (Geo5 Manual, 2023). Perbedaan dari setiap metode tersebut terletak pada asumsi yang diambil dalam membuat formulasi

SENSITIVITY ANALYSIS OF PILE FOUNDATIONS UNDER BRIDGE ABUTMENTS ON HIGH SLOPE AREAS (CASE STUDY IN BESAKIH, BALI)

(Danang Setiya Raharja)

kesetimbangan gaya dan momen yang bekerja pada setiap blok tanah di atas bidang longsor.

Metode *Fellenius/Petterson* merupakan metode pertama sekaligus yang paling sederhana. Metode ini hanya memenuhi kesetimbangan momen dan tidak mempertimbangkan kesetimbangan gaya. Karena hal ini, metode ini tidak baik jika digunakan untuk mengevaluasi stabilitas lereng, apalagi yang diperkuat dengan struktur seperti tiang atau *soil nailing*. Metode *Fellenius/Petterson* ini tetap dipertahankan pada program sebagai bentuk penghargaan dan untuk pembelajaran dalam memahami konsep perhitungan stabilitas lereng dengan metode irisan. Persamaan untuk mendapatkan faktor keamanan metode ini sebagai berikut:

$$FS = \frac{1}{\sum W_i \sin \alpha_i} \sum [c_i l_i + (N_i - u_i l_i) \tan \varphi_i] \quad (7)$$

Keterangan:

- u_i = tekanan air pori di dalam blok
 c_i, φ_i = parameter tanah kondisi efektif
 W_i = berat blok
 N_i = gaya normal pada segmen dari garis longsor
 α_i = kemiringan segmen dari garis longsor
 l_i = panjang segmen dari garis longsor

Metode Bishop hanya memenuhi kesetimbangan momen dan gaya arah vertikal, namun mengasumsikan kesetimbangan gaya arah horizontal sama dengan nol. Metode ini cukup baik digunakan untuk peninjauan awal suatu stabilitas lereng, akan tetapi tidak bisa digunakan untuk lereng yang diperkuat dengan tiang.

$$N_i = N'_i + U_i \quad (2)$$

$$T_i = (N_i - U_i) \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = N'_i \tan \varphi_i + c_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} \quad (3)$$

$$N'_i + U_i - W_i \cos \alpha_i + K_h W_i \sin \alpha_i + F_y \cos \alpha_i - F_x \sin \alpha_i + E_{i+1} \sin(\alpha_i - \delta_{i+1}) - E_i \sin(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (4)$$

$$N'_i \frac{\tan \varphi_i}{FS} + \frac{c_i}{FS} \frac{b_i}{\cos \alpha_i} - W_i \sin \alpha_i - K_h W_i \cos \alpha_i + F_y \sin \alpha_i + F_x \cos \alpha_i - E_{i+1} \cos(\alpha_i - \delta_{i+1}) + E_i \cos(\alpha_i - \delta_i) = 0 \quad (5)$$

$$E_{i+1} \cos \delta_{i+1} \left(Z_{i+1} - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_{i+1} \sin \delta_{i+1} \frac{b_i}{2} - E_i \cos \delta_i \left(Z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - E_i \sin \delta_i \frac{b_i}{2} + M1_i - K_h W_i (y_M - y_{g_i}) = 0 \quad (6)$$

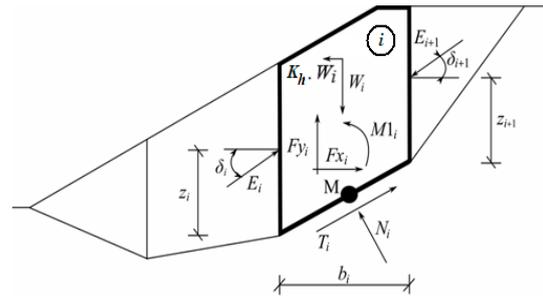
$$FS = \frac{1}{\sum W_i \sin \alpha_i} \sum \frac{c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \varphi_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \varphi_i \sin \alpha_i}{FS}} \quad (8)$$

Keterangan:

b_i = lebar arah horizontal blok

Metode *Spencer, Janbu*, dan *Morgenster-Price* merupakan metode yang memenuhi ketiga kesetimbangan gaya serta bisa mengakomodir pola longoran *circular* sekaligus *polygon*. Sedangkan metode *Shahunyants* dan *ITF Method* dikhususkan untuk analisa dengan pola longoran *polygon*.

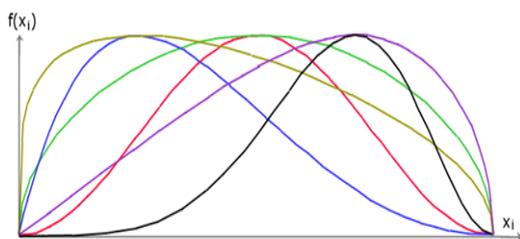
Metode *Morgenster-Price* dipilih pada artikel ini karena pertimbangan keandalannya untuk menganalisa berbagai variasi pada lereng dengan fungsi yang dikenal dengan istilah *Half-sine function* $f(x_i)$ (**Gambar 6**). Setiap blok diasumsikan memberikan kontribusi gaya yang sama seperti pada metode *Spencer*. Perbedaannya terletak pada poin ke-4 dari asumsi-asumsi berikut:



Gambar 5. Skema kesetimbangan setiap blok pada metode *Morgenster-Price* (Geo5 Manual, 2023)

1. Pembagian blok selalu menggunakan garis vertikal;

2. Garis gaya berat setiap blok (W_i) diletakkan pada bagian tengah garis keruntuhan pada setiap segmen dinotasikan dengan M (lihat **Gambar 5**);
3. Gaya normal (N_i) bekerja pada pusat segmen setiap blok pada titik M;
4. Kemiringan garis gaya E_i antar blok memiliki nilai yang berbeda pada setiap blok (δ_i) dan pada titik akhir permukaan blok bernilai $\delta = 0$.



Gambar 6. Grafik *Half-sine function* dari metode Morgenster-Price (Geo5 Manual, 2023)

Pemilihan nilai kemiringan gaya E_i yang berbeda pada setiap blok ini dibantu oleh *Half-sine function* $f(x_i)$ secara otomatis.

Persamaan (2) merupakan hubungan antara nilai efektif dan total dari gaya normal yang bekerja pada bidang longsor. Persamaan (3) merupakan kondisi Mohr-Coulomb yang merepresentasikan hubungan antara gaya normal dan geser pada blok tertentu dari bidang longsor (N_i dan T_i). Persamaan (4) adalah kesetimbangan gaya pada arah tegak lurus garis longsor setiap blok. Persamaan (5) merupakan kesetimbangan gaya sepanjang bidang longsor setiap blok. Persamaan (6) adalah kesetimbangan momen pada titik M. Besarnya nilai faktor keamanan diperoleh dari hasil kombinasi kelima persamaan tersebut dan proses iterasi.

2.4 Faktor Analisa Sensitivitas Tiang Fondasi

Variasi faktor yang digunakan pada analisa sensitivitas meliputi panjang dan spasi tiang fondasi pada arah melintang jalan. Dalam melakukan analisa sensitivitas perlu ditentukan terlebih dahulu nilai tengah atau nilai acuan. Variasi faktor kemudian diambil dengan interval tertentu pada nilai di atas dan di bawahnya nilai acuan tadi. Nilai acuan untuk faktor panjang tiang fondasi adalah 23 m, sedangkan untuk spasi tiang fondasi adalah 2 m. Jumlah variasi yang

digunakan adalah 3 nilai di atas dan di bawah acuan. Interval nilai yang diambil untuk faktor panjang adalah 1 m dan untuk faktor spasi adalah 0,1 m. Penjabaran detail setiap variasi dan nama (ID) setiap model disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Variasi model untuk analisa sensitivitas tiang fondasi pada lereng

Faktor Panjang		Faktor Spasi	
ID Model	Panjang (m)	ID Model	Spasi (m)
L20	20	S170	1,7
L21	21	S180	1,8
L22	22	S190	1,9
L23	23	S200	2,0
L24	24	S210	2,1
L25	25	S220	2,2
L26	26	S230	2,3

Pada saat menjalankan analisa dengan faktor panjang, maka spasi yang digunakan adalah nilai spasi acuan yaitu 2 m. Kondisi sebaliknya juga dilakukan hal yang sama, dimana ketika menjalankan analisa faktor spasi maka nilai panjang tiang fondasi yang diterapkan pada model yaitu 23 m.

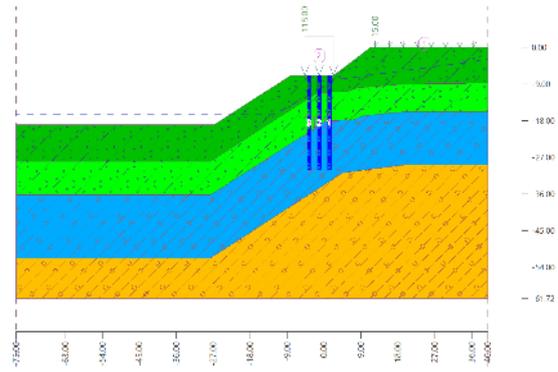
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Seperti yang terlihat pada **Gambar 2**, fondasi tiang bor berada pada lereng yang cukup tinggi. Analisa sensitivitas tiang bor yang ditinjau adalah faktor panjang dan spasi pada arah melintang jalan terhadap nilai faktor keamanan (FK atau FS) dari lereng. Oleh karena itu, tiang fondasi bor ini seolah berfungsi sebagai struktur perkuatan lereng yang berupa *anti-slide pile*, sehingga yang berpengaruh adalah kapasitas lateral.

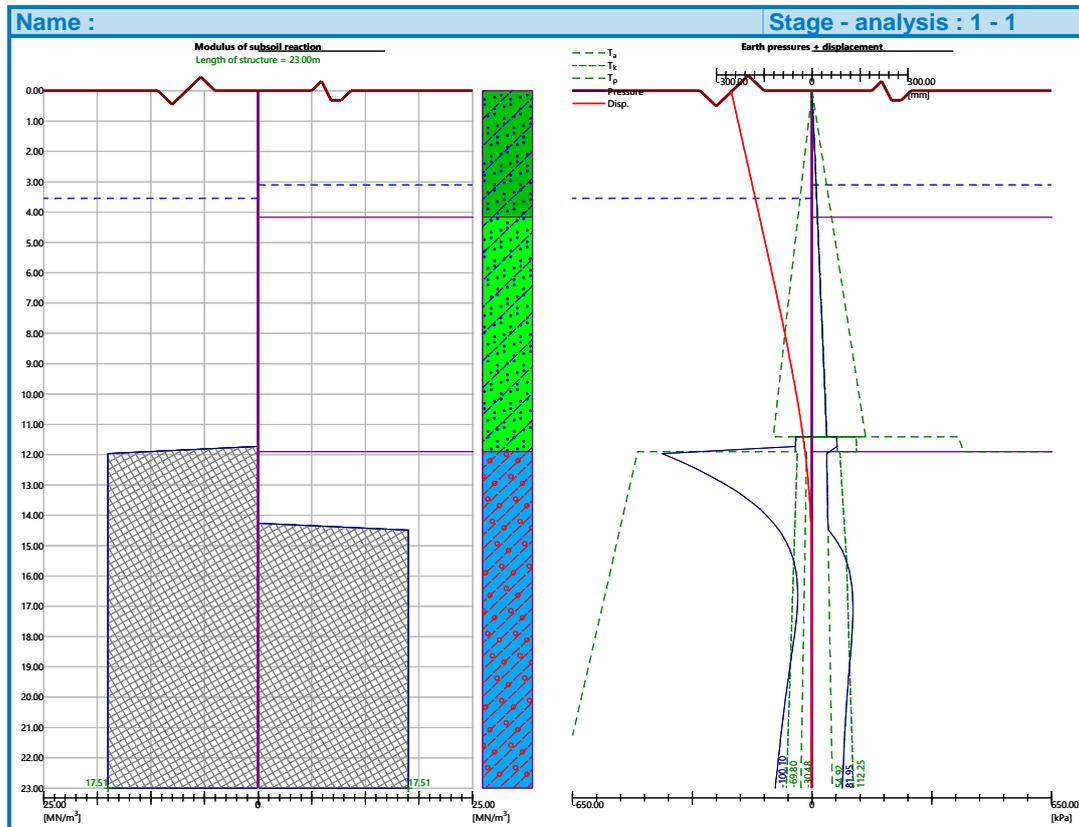
SENSITIVITY ANALYSIS OF PILE FOUNDATIONS UNDER BRIDGE ABUTMENTS ON HIGH SLOPE AREAS (CASE STUDY IN BESAKIH, BALI)

(Danang Setiya Raharja)

Analisa stabilitas lereng akan dilakukan pada modul *slope stability*, namun untuk bisa mendapatkan parameter kapasitas geser tiang (V_u) perlu dilakukan analisa dengan modul *anti-slide pile* terlebih dahulu. Karena keterbatasan modul *anti-slide pile* yang tidak bisa melakukan perhitungan pada tiang yang tertanam seperti pada **Gambar 2**, maka diperlukan penyederhanaan model dengan menghilangkan terlebih dahulu struktur abutment sehingga posisi tiang bisa tepat pada permukaan lereng (lihat **Gambar 8**). Model lereng yang sudah disederhanakan ini kemudian diambil tiang yang baris tengah untuk ditinjau pada modul *anti-slide pile* sehingga diperoleh geometri model hasil ekstraksi pada **Gambar 10**. Baris tengah (ke-2) diambil karena nilainya diasumsikan dapat mewakili nilai rata-rata dari bari ke-1 dan ke-3 dari tiang fondasi.



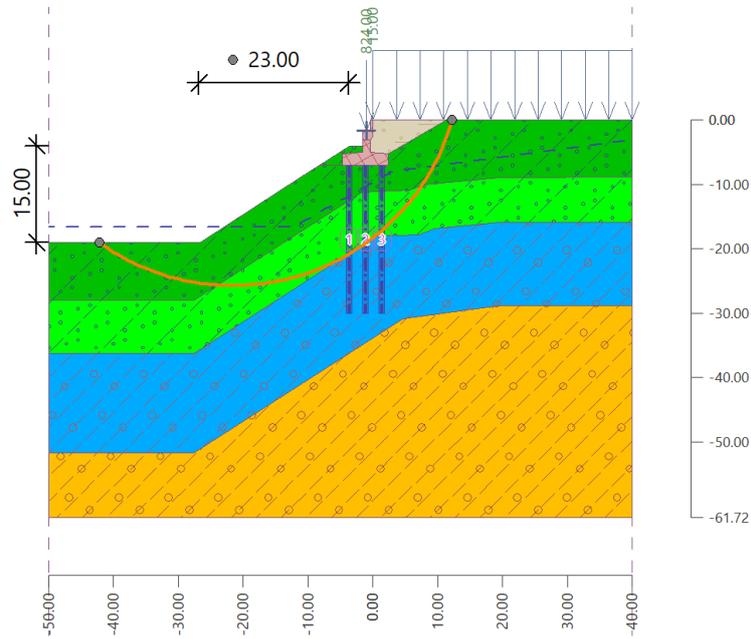
Gambar 8. Model lereng dengan 3 baris *anti-slide pile* yang disederhanakan



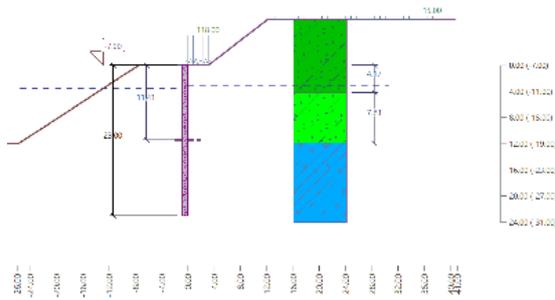
Gambar 7. Distribusi *modulus of subsoil reaction* (kiri) dan tegangan tanah serta pergerakan lateral tiang (kanan)

Slope stability verification (Morgenstern-Price)

Factor of safety = 1.49 < 1.50



Gambar 9. Bidang longsor untuk tinjauan analisa sensitivitas faktor tiang fondasi



Gambar 10. Model hasil ekstraksi baris tengah tiang fondasi pada modul *anti-slide pile*

Hasil analisa kapasitas lateral (geser) tiang fondasi dengan konfigurasi tulangan sesuai **Gambar 3**, diperoleh distribusi tegangan tanah seperti pada **Gambar 7**. **Error! Reference source not found.** dan nilai kapasitas lateral (V_u) tiang terhadap potensi pergeseran tanah yang longsor sebesar 1132 kN (lihat **Gambar 11**).

Verification of cross section in shear:
 Shear reinf. - profile 12.0 mm; spacing 125.0 mm
 $A_{sw} = 2 \times 904.8 = 1809.6 \text{ mm}^2$
 Ultimate shear force:
 $V_{Rd} = 1132.94 \text{ kN} > 525.91 \text{ kN} = V_{Ed}$

Gambar 11. Hasil analisa kapasitas lateral tiang fondasi menggunakan modul *anti-slide pile*

Nilai kapasitas V_u kemudian digunakan sebagai input kapasitas tiang pada model **Gambar 2** menggunakan metode *Morgenstern-Price* untuk analisa kondisi statik dengan tipe garis longsor berbentuk *circular*. Tahap pertama dilakukan dengan konfigurasi faktor rata-rata, yaitu panjang tiang 23 m dan spasi melintang 2 m. Pola garis longsor potensial yang dipilih dengan mempertimbangkan stratigrafi lapisan tanah berdasarkan *engineering judgement* mendapatkan nilai FK sebesar 1,49 (lihat **Gambar 9**). Nilai FK ini sedikit di bawah nilai minimum yang disyaratkan pada SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik. Bidang longsor tersebut memiliki koordinat titik pusat rotasi (O) pada $x=-21,59 \text{ m}$ dan $z=9,35 \text{ m}$ dengan jari-jari (R) sebesar 35,07 m. Pola garis longsor ini yang kemudian digunakan untuk keseluruhan evaluasi analisa sensitivitas tiang fondasi.

Analisa sebanyak sepuluh (10) model sesuai kode (Tabel 2) dilakukan secara bergantian sehingga diperoleh nilai FK seperti pada **Tabel 3**. Faktor panjang tidak sensitif terhadap perubahan faktor keamanan suatu lereng ditunjukkan dengan nilai FK yang selalu sama untuk setiap variasi panjang 20 m hingga 26 m. Sebaliknya, faktor spasi pada arah melintang jalan memiliki sensitivitas yang cukup besar. Spasi yang semakin rapat ($< 2,0 \text{ m}$)

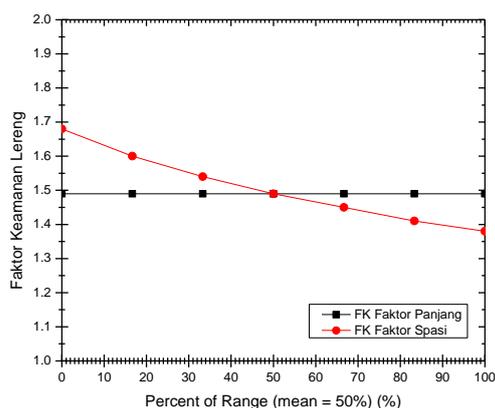
SENSITIVITY ANALYSIS OF PILE FOUNDATIONS UNDER BRIDGE ABUTMENTS ON HIGH SLOPE AREAS (CASE STUDY IN BESAKIH, BALI)

(Danang Setiya Raharja)

menghasilkan nilai FK yang lebih besar dan spasi yang semakin longgar ($> 2,0$ m) menghasilkan nilai FK yang semakin kecil. Pada **Gambar 12** menunjukkan pola pergerakan grafik FK hasil analisa sensitivitas. Nilai FK faktor spasi mengalami peningkatan yang cenderung parabolik (tidak linear) ketika nilai spasi tiang fondasi diperkecil. Besar kemungkinan bahwa jika spasi antar tiang sama dengan diameter (spasi *center to center*) atau dalam arti tiang saling berhimpit, maka nilai FK akan berada dalam kondisi maksimum karena barisan tiang fondasi berfungsi layaknya dinding turap. Namun, hal ini kemungkinan besar tidak menguntungkan secara kapasitas fondasi kelompok tiang (*group pile*) untuk menopang struktur abutment jembatan.

Tabel 3. Nilai FK hasil analisa sensitivitas tiang fondasi pada lereng

Faktor Panjang		Faktor Spasi	
ID Model	FK	ID Model	FK
L20	1,49	S170	1,68
L21	1,49	S180	1,60
L22	1,49	S190	1,54
L23	1,49	S200	1,49
L24	1,49	S210	1,45
L25	1,49	S220	1,41
L26	1,49	S230	1,38



Gambar 12. Sensitivitas faktor panjang dan spasi terhadap nilai faktor keamanan lereng

4. DISKUSI

Penelitian sederhana ini masih memiliki peluang banyak untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi topik-topik penelitian lainnya ke depan. Analisa faktor panjang tiang fondasi terhadap

faktor keamanan lereng pada penelitian ini hanya terbatas pada input kapasitas geser maksimum (V_{rd}). Kapasitas ini sangat bergantung pada konfigurasi tulangan geser saja, belum ada pertimbangan kapasitas lateral tiang di bawah garis longsoran (interaksi antara tiang dan tanah untuk membentuk daya dukung lateral). Hal ini yang dimungkinkan menjadi penyebab faktor panjang tiang tidak sensitif terhadap stabilitas lereng.

Analisa faktor spasi menunjukkan nilai FK yang semakin besar seiring mengecilkan jarak spasi namun justru mungkin akan mengurangi kapasitas *group pile*. Hal ini perlu ditinjau lebih mendalam dengan memperbanyak variasi / kombinasi model dan membandingkan respons faktor spasi terhadap stabilitas lereng dan kapasitas *group pile* secara bersamaan untuk mendapatkan konfigurasi yang paling optimum.

5. KESIMPULAN

Analisa stabilitas lereng dapat dilakukan menggunakan metode *limit equilibrium method* dengan hasil yang relatif sama dengan hasil analisa *finite element method*. Pada kasus lereng yang diperkuat dengan tiang fondasi (*anti-slide pile*) perlu menggunakan metode analisa yang tepat karena kesetimbangan gaya dan momen perlu dipenuhi. Salah satu metode yang sesuai dan digunakan pada penelitian ini yaitu metode **Morgenstern-Price**. Tinjauan sensitivitas fondasi tiang bor terhadap nilai faktor keamanan stabilitas lereng menunjukkan bahwa faktor panjang tiang tidak sensitif sedangkan faktor spasi cukup besar sensitivitasnya. Semakin kecil jarak spasi antar tiang akan menghasilkan nilai FK stabilitas lereng yang semakin besar dengan pola peningkatan yang cukup parabolik dan akan mencapai maksimum saat spasi sama dengan diameter tiang (untuk spasi *center to center*).

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Core Team P2JN Bali khususnya pak I Nyoman Arka yang telah memberikan ijin dan dukungan data-data serta Teknik Sipil ITB khususnya bapak Andhika Sahadewa, Ph.D yang telah memberikan kesempatan akses program Geo5 yang menjadi inti pendukung pada penelitian ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

Agam, M. W., Hashim, M. H. M., Murad, M. I., & Zabidi, H. (2016). Slope Sensitivity Analysis Using Spencer's Method in Comparison with General Limit Equilibrium Method. *Procedia Chemistry*, 19, 651–658.

<https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.066>

Cheng, Y. C., & Jiang, P. (2012). Sensitive Analysis of Factors Affecting Soil Slope Stability. *Applied Mechanics and Materials*, 170–173, 1072–1075. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.170-173.1072>

Geo5 Manual. (2023). *Engineering Manual Book*.

Haskell, J. J. M., Cubrinovski, M., & Bradley, B. A. (2012). Sensitivity analysis and its role in pseudo-static design of pile foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.05.014>

Look, B. G. (2007). *Handbook of geotechnical investigation and design tables*. Taylor & Francis.

Warman, R. S. (2019). *Kumpulan Korelasi Geoteknik dan Fondasi*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga

**SENSITIVITY ANALYSIS OF PILE FOUNDATIONS UNDER BRIDGE
ABUTMENTS ON HIGH SLOPE AREAS (CASE STUDY IN BESAKIH, BALI)**
(Danang Setiya Raharja)

Halaman ini sengaja dikosongkan

Halaman ini sengaja dikosongkan