

# ANALISIS KEGAGALAN PONDASI TIANG KELOMPOK PADA KONSTRUKSI PILAR JEMBATAN

Prayogo Damarhadi N<sup>1)</sup>, Yusep Muslih P<sup>2)</sup>, R. Harya Dananjaya<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Program S1 Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret

<sup>2) 3)</sup> Pengajar Jurusan Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret

Jalan Ir. Sutami No.36A Surakarta 57126. Telp: 0271647069. Email : prayogo28@gmail.com

## Abstract

*A highway bridge construction project using types of spun pile foundation. Before the whole structure of the bridge construction is completed, one of the pillars of the bridge has a failure. The group pile foundation is on a slope with the average slope 18°. The pillar of the bridge undergoes a slope of 10° and move 20 cm in the direction of the river. Analysis about the causes of the failure on bridge pillar foundation using finite element method the program Plaxis 2D. Pile group modeled as a block of concrete with a modulus of composite elasticity between soil and pile. Analysis was conducted on the slope stability before and after the pile group at the point observation in order to know the critical area and the value of safety factor (SF) from the slope. Furthermore, an analysis of the horizontal stress that occurs later than the capacity of the group pile foundation. The analysis shows the SF value before the foundation at the point of observation is 1,218 and after the foundation at the point of observation is 1,222. This shows that the foundation has not effect of the slope stability and landslides that occurred on the slope has no effect on group pile foundation. While the result of the horizontal stress analysis showed that the foundation is not able to withstand horizontal strain which occurs, so make broken on pile foundation.*

**Keywords :** *slope, pile foundation, composite, safety factor, horizontal stress.*

## Abstrak

Sebuah proyek pembangunan jembatan jalan tol menggunakan pondasi tiang pancang jenis *spun pile*. Namun sebelum keseluruhan struktur dari konstruksi jembatan tersebut selesai dikerjakan, salah satu dari pilar jembatan mengalami *failure*. Pondasi tiang kelompok tersebut berada pada lereng dengan kemiringan rata-rata 18°. Pilar jembatan mengalami kemiringan 10° dan bergeser sekitar 20 cm ke arah sungai. Analisis penyebab kegagalan pada pondasi pilar jembatan tersebut menggunakan metode elemen hingga yakni program Plaxis 2D. Pondasi tiang kelompok dimodelkan sebagai sebuah blok beton dengan modulus elastisitas komposit antara tanah dan tiang pancang. Analisis stabilitas lereng dilakukan sebelum dan sesudah adanya pondasi tiang kelompok pada titik tinjauan sehingga diketahui daerah kritis serta nilai *safety factor* (SF) dari lereng. Selanjutnya, dilakukan analisis terhadap tegangan horisontal yang terjadi yang kemudian dibandingkan dengan kapasitas pondasi tiang kelompok. Hasil analisis menunjukkan nilai SF lereng sebelum ada pondasi sebesar 1,218 dan setelah adanya pondasi pada titik tinjauan sebesar 1,222. Hal ini menunjukkan bahwa pondasi tersebut tidak terlalu berpengaruh pada stabilitas lereng dan longsor yang terjadi pada lereng tidak mempunyai pengaruh terhadap pondasi tiang kelompok. Sedangkan hasil analisis terhadap tegangan horisontal menunjukkan bahwa pondasi tidak mampu menahan tegangan horisontal yang terjadi sehingga mengalami patah.

**Kata Kunci :** lereng, pondasi tiang, komposit, *safety factor*, tegangan horisontal.

## PENDAHULUAN

Dalam pembangunan suatu konstruksi jembatan, hal pertama yang dilaksanakan di lapangan adalah pekerjaan pondasi (struktur bawah) setelah itu dilanjutkan dengan pekerjaan struktur atas. Untuk konstruksi jembatan dengan beban yang besar umumnya digunakan pondasi dalam dengan perencanaan yang lebih kompleks karena letaknya yang berada pada lereng. Jenis pondasi dalam yang digunakan harus disesuaikan dengan beban dan kedalaman dari tanah keras. Namun dalam pelaksanaan di lapangan seringkali terjadi kegagalan yang mengharuskan terjadinya redesign. Kondisi lereng yang curam dengan beban pada pondasi yang melebihi kapasitas bisa menjadi penyebab terjadinya kegagalan. Seperti yang terjadi di beberapa tempat, misalnya di Kalimantan Tengah, yang mana Gawit Hidayat (2011) melaporkan kegagalan pondasi pada abutmen jembatan di Sungai Bahalang yang diakibatkan karena pondasi tidak mampu menahan gaya lateral akibat penimbunan yang melampaui batas kritis.

Baru-baru ini proyek pembangunan jembatan jalan tol menggunakan pondasi tiang pancang jenis *spun pile* yang mana pilar ke-6 dari jembatan tersebut mengalami *failure* sebelum struktur atas selesai dikerjakan. Pondasi terletak pada sebuah lereng dengan pergerakan dinamis dimana pada lereng tersebut sering terjadi kelongsoran. Lereng tersebut mempunyai kemiringan rata-rata 18° dengan panjang proyeksi horisontal tegak lurus sungai 175 meter dan tinggi 40,4 meter dari dasar sungai. Panjang dan lebar pile cap pada pondasi berturut-turut adalah 32,4 meter dan 19,2 meter. Pada perencanaan, masing-masing pile dipancang hingga mencapai kedalaman 22 meter dengan jarak 1,5 meter arah lateral dan 2,1 m arah longitudinal. Keseluruhan *spun pile* yang digunakan berjumlah 189.

Pada lereng tersebut terdapat 3 pilar dan 1 abutment jembatan. Pondasi yang digunakan adalah pondasi tiang pancang jenis spun pile yang dipancang dengan kedalaman berbeda-beda pada masing-masing pilar. Pada design pilar ke-6 dari jembatan tersebut, pondasi dengan diameter 60 cm yang dipancang hingga kedalaman 22 meter mengalami kemiringan sekitar  $10^\circ$  dan bergeser sekitar 20 cm ke arah sungai. Deformasi yang terjadi pada pondasi tersebut diprediksi karena pondasi tidak mampu menahan tegangan horizontal yang terjadi. Untuk dapat mengetahui penyebab kegagalan pada pilar jembatan tersebut harus dilakukan suatu analisis mengenai pondasi dan tanah pada lereng tersebut. Kondisi pilar jembatan sebelum dirobohkan karena mengalami deformasi ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. (a) Peta Lokasi Penelitian, (b) Pilar yang mengalami *failure*

Penelitian akan membahas mengenai analisis penyebab kegagalan pada pondasi pilar ke 6 jembatan yang posisinya terletak pada lereng sungai. Analisis terhadap kasus akan didasarkan pada data hasil pengujian *bor log* di beberapa lokasi pada lereng tersebut untuk mengetahui karakteristik lapisan tanah pada lokasi. Untuk mempermudah dalam menganalisis perhitungan, akan digunakan bantuan perangkat lunak (*software*) perencanaan struktur berbasis metode elemen hingga. Metode ini dapat digunakan sebagai pemodelan untuk menganalisis perilaku spun pile pada saat ada beban di atasnya. Salah satu program yang berbasis pada perhitungan metode elemen hingga adalah Plaxis 2D V8.2. Program ini dapat digunakan untuk menganalisis suatu pemodelan perilaku dari pondasi kelompok tiang pancang pada saat dibebani dengan memasukkan data-data parameter yang dibutuhkan.

## LANDASAN TEORI

### Faktor Keamanan Lereng

Faktor aman (SF) didefinisikan sebagai nilai banding antara gaya yang menahan dan gaya yang menggerakkan.

$$SF = \tau / \tau_d \dots\dots\dots [1]$$

dengan:

$\tau$  : tahanan geser maksimum yang dapat dikerahkan oleh tanah (kN/m<sup>2</sup>),

$\tau_d$ : tegangan geser yang terjadi akibat gaya berat tanah yang akan longsor (kN/m<sup>2</sup>).

Umumnya, faktor keamanan stabilitas lereng atau faktor aman terhadap kuat geser tanah diambil lebih besar atau sama dengan 1,2 - 1,5. Menurut Bowles (1989) nilai dari faktor keamanan berdasarkan intensitas kelongsorannya seperti Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan faktor keamanan dan kejadian longsor

Nilai Faktor Keamanan	Intensitas atau Kejadian Longsor
SF < 1,07	Longsor biasa terjadi/sering (lereng labil)
1,07 < SF < 1,25	Longsor pernah terjadi (lereng kritis)
SF > 1,25	Longsor jarang terjadi (lereng relatif stabil)

**Teori Keruntuhan Material Mohr-Coulomb**

Mohr menyuguhkan sebuah teori tentang keruntuhan pada material yang menyatakan bahwa keruntuhan terjadi pada suatu material akibat kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser, dan bukan hanya akibat tegangan normal maksimum atau tegangan geser maksimum saja. Jadi, hubungan antara tegangan normal dan geser pada sebuah bidang keruntuhan dapat dinyatakan, dalam bentuk

$$\tau_f = f(\sigma) \dots\dots\dots [2]$$

Garis keruntuhan (*failure envelope*) yang dinyatakan oleh Persamaan [2] sebenarnya berbentuk garis lengkung. Untuk sebagian besar masalah-masalah mekanika tanah, garis tersebut cukup didekati dengan sebuah garis lurus yang menunjukkan hubungan linear antara tegangan normal dan geser. Persamaan itu dapat ditulis sebagai berikut:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \dots\dots\dots [3]$$

dengan c adalah kohesi, dan  $\varphi$  adalah sudut geser dalam. Hubungan pada Persamaan [3] disebut juga sebagai kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb.

**Modulus Elastisitas Tanah dari Hasil *Standard Penetration Test* (SPT)**

Data yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini adalah data *bor log*. Untuk memperoleh nilai modulus elastisitas, data *bor log* harus dikorelasi terlebih dahulu. Beberapa korelasi langsung antara modulus elastisitas ( $E_s$ ) dan  $N_{60}$  sudah banyak dikembangkan, namun seringkali memberikan hasil yang berbeda (Anagnostopoulos, 1990; Kulhawy dan Mayne, 1990). Hal ini mungkin karena kurangnya presisi dari hasil SPT dan sebagian besar karena pengaruh faktor lain. Meskipun demikian, hubungan berikut ini akan menghasilkan perkiraan secara konserfatif. Nilai dari  $E_s$  diberikan dengan persamaan berikut (Donald P. Coduto, 2001):

$$E_s = \beta_0 \sqrt{OCR} + \beta_1 N_{60} \dots\dots\dots [4]$$

Dimana;

- $E_s$  = Modulus Elastisitas
- $\beta_0, \beta_1$  = *Correlation Factor* (dari tabel 2)
- OCR = Rasio Overkonsolidasi
- $N_{60}$  = Nilai N-SPT

Untuk beberapa analisis dapat digunakan OCR=1, kecuali kalau ada bukti yang jelas mengenai overconsolidation.

Tabel 2. *Correlation Factor*

Soil Type	$\beta_0$		$\beta_1$	
	lb/ft <sup>2</sup>	kPa	lb/ft <sup>2</sup>	kPa
Clean sands (SW and SP)	100000	5000	24000	1200
Siltly sands and clayey sands (SM and SC)	50000	25000	12000	600

**Modulus Elastisitas Komposit**

Pondasi tiang kelompok yang dimodelkan sebagai sebuah blok tentu saja merupakan sebuah material komposit antara tanah dan tiang pancang. Dimana modulus elastisitas yang digunakan sebagai data input juga dihitung sebagai modulus elastisitas komposit. Pada komposit *isotropik* atau *short fibre*, penghitungan modulus elastisitas dapat digunakan Persamaan Tsai halpin (1976) (M. Zainuri, dkk, 2008). Dengan menerapkan faktor geometri partikel penguat yang diperoleh dari bentuk geometri partikel penguat sebagai fungsi dari arah beban, geometri dan orientasi penguat dapat menjadi pertimbangan faktor geometri.

Beban transversal pada meterial komposit *unidireksional* merupakan beban yang tegak lurus terhadap orientasi penguat. Pemberian beban tersebut mengakibatkan terjadinya elongasi yang berbeda antara penguat dan matrik, sementara besar beban eksternal yang dialami matrik dan penguat adalah sama besar (*isostress*). Oleh karena itu modulus elastisitas dengan beban tegak lurus penampang lintang (*lower bond*) dinyatakan dengan persamaan :

$$\dots\dots\dots [5]$$

Modulus elastis komposit longitudinal (*upper bond*) dapat dinyatakan dengan persamaan yang dikenal dengan hukum campuran (*rule of mixture*).

$$\dots\dots\dots [6]$$

Dimana  $E$  adalah modulus elastisitas,  $V$  adalah fraksi volume,  $c$  adalah komposit,  $m$  adalah matrik dan  $f$  penguat. Kedua persamaan tersebut (persamaan 5 dan 6) dapat digunakan untuk menguji kualitas ikatan antar permukaan matrik penguat.

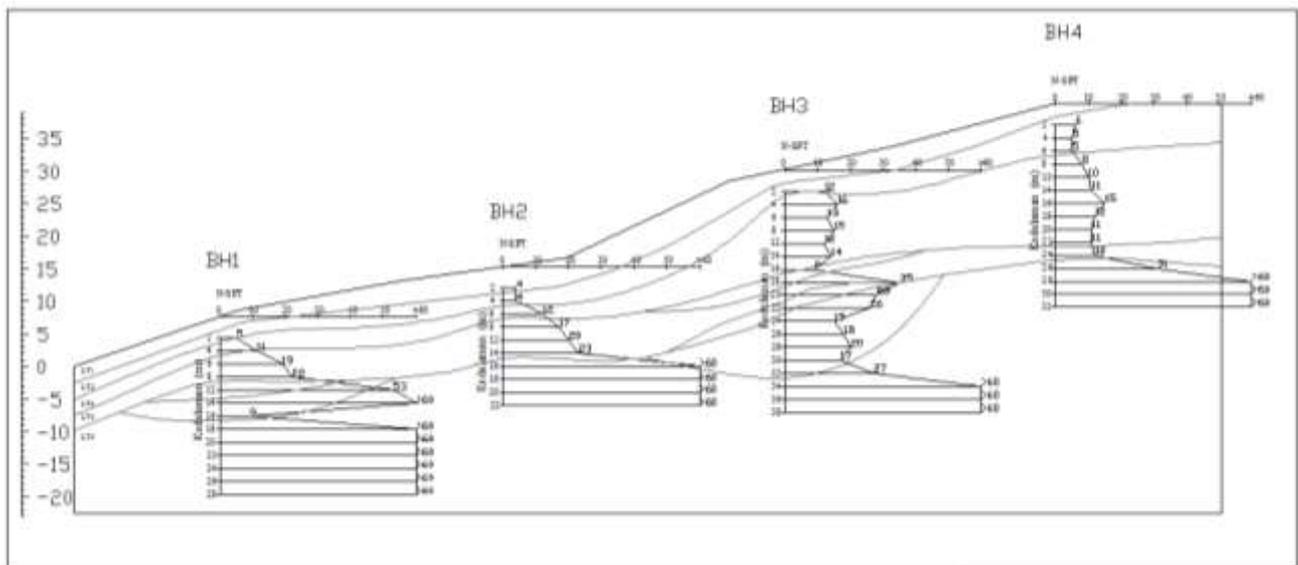
## METODE PENELITIAN

Metode untuk penelitian ini adalah dengan mengkorelasikan data *bor log* dari lereng menjadi parameter-parameter tanah sebagai input dalam program Plaxis. Pondasi tiang kelompok dimodelkan sebagai sebuah blok yang berupa material komposit antara tanah dan beton tiang pancang. Dari hasil analisis dapat diperoleh nilai  $SF$  lereng dan tegangan horisontal yang terjadi pada pondasi. Tegangan horisontal tersebut digunakan untuk menganalisis momen lentur pada pondasi. Momen yang terjadi dianggap diterima oleh semua pondasi tiang pancang dengan besaran yang sama. Kemudian momen yang terjadi dibandingkan dengan kapasitas momen yang mampu ditahan oleh pondasi tiang kelompok. Dari analisis tersebut dapat diketahui apakah tiang pancang yang digunakan mampu menahan momen lentur yang terjadi atau tidak.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Data Tanah

Data tanah berupa data hasil bor dalam digunakan sebagai acuan dalam penggambaran potongan melintang dari lereng. Bor dalam dilakukan selain untuk mengetahui kedalaman tanah keras juga untuk mengetahui karakteristik dari setiap lapisan tanah di lokasi lereng. Detail nilai konsistensi N-SPT dari masing-masing titik bor log dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik N-SPT untuk beberapa *bor log* pada lereng

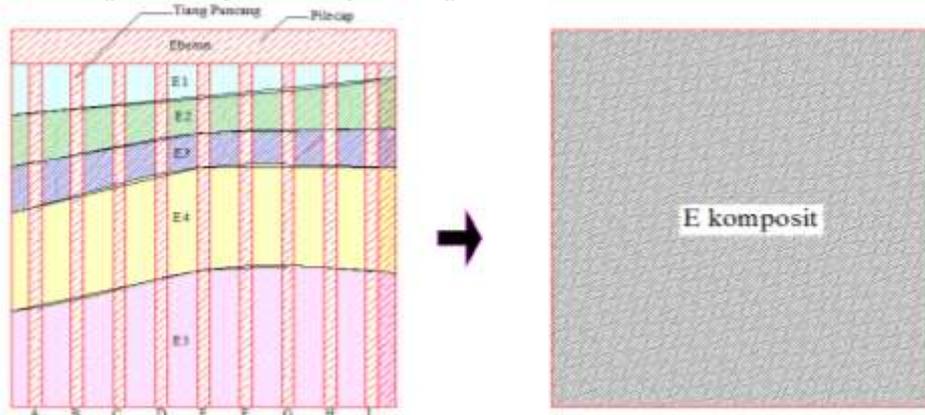
Data Bor Log tersebut sebagai acuan dalam menggambarkan lapisan tanah dikorelasi berdasarkan konsistensi dari nilai pukulannya. Data parameter tanah hasil dari korelasi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter tanah pada lereng

Lapisan	Simbol	Konsistensi Tanah	$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	$v$	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\varphi$ (°)
1	CH	Soft	12	15	5500	0.35	15	20
2	MH	Medium	14	16	10900	0.3	25	25
3	SM	Stiff	16	19	20500	0.3	50	30
4	SP-SM	Dense	14	19	29500	0.35	5	40
5	SM	Very Dense	16	20	38500	0.4	1	50

### Model Material Pondasi

Modulus elastisitas komposit dapat dihitung berdasarkan beban yang bekerja yakni beban arah Transversal dan longitudinal. Dimana beban transversal pada material komposit merupakan beban yang tegak lurus dengan luas penampang penguat dan beban arah longitudinal merupakan beban yang arahnya sama dengan orientasi penguat. Gambar 3 merupakan model material dari pondasi tiang kelompok. Pada penelitian ini setiap lapisan tanah dari lereng diambil rata-rata guna mempermudah perhitungan.

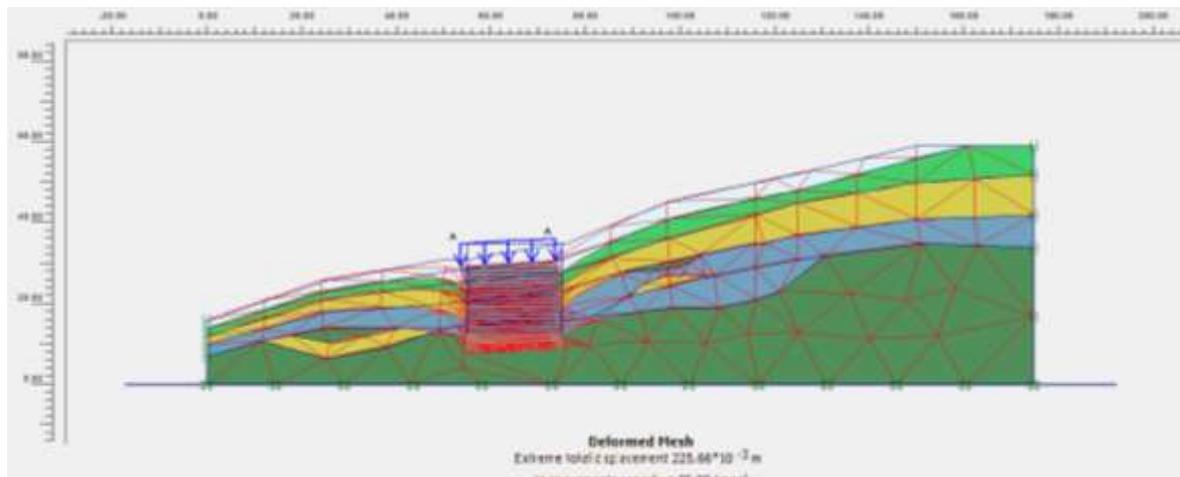


Gambar 3. Model material pondasi tiang kelompok

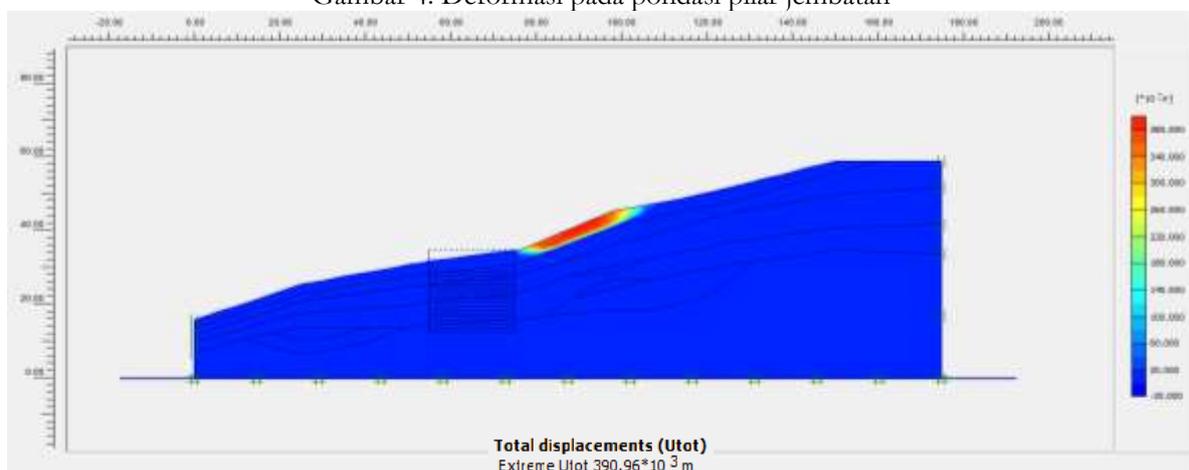
Modulus elastisitas komposit dari pondasi tiang kelompok dihitung dengan menggunakan persamaan komposit *unidireksional* (Persamaan 5 dan 6). Dari hasil perhitungan didapat nilai modulus elastisitas komposit pondasi tiang kelompok ( $E_c$ ) sebesar 2192323.265 kN/m<sup>2</sup>.

### Analisis Stabilitas Lereng

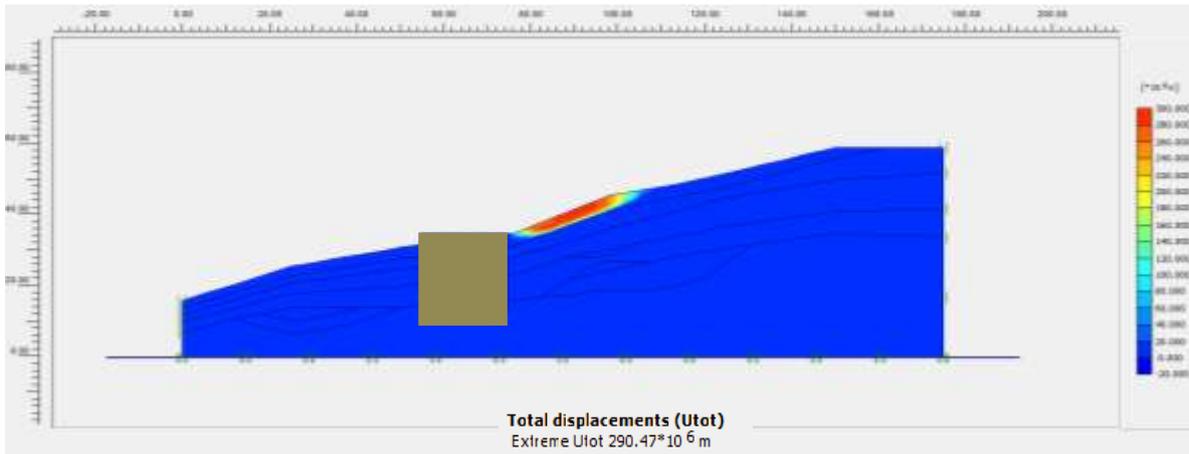
Analisis terhadap stabilitas lereng dilakukan terhadap dua kondisi yakni, kondisi lereng awal sebelum adanya pondasi pada titik tinjauan dan kondisi lereng setelah adanya pondasi pada titik tinjauan. Hasil analisis terhadap deformasi pada pondasi ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Deformasi pada pondasi pilar jembatan



Gambar 5. Pola keruntuhan lereng sebelum ada pilar

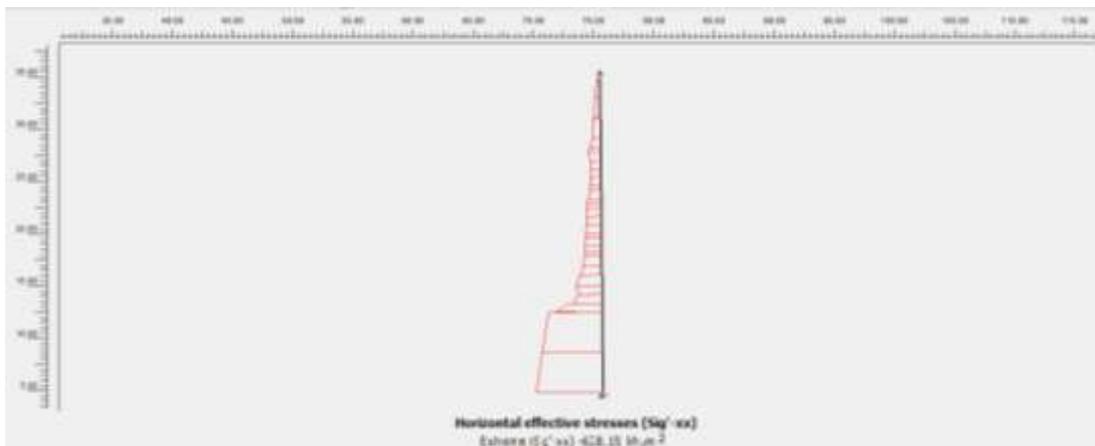


Gambar 6. Pola keruntuhan lereng sesudah ada pilar

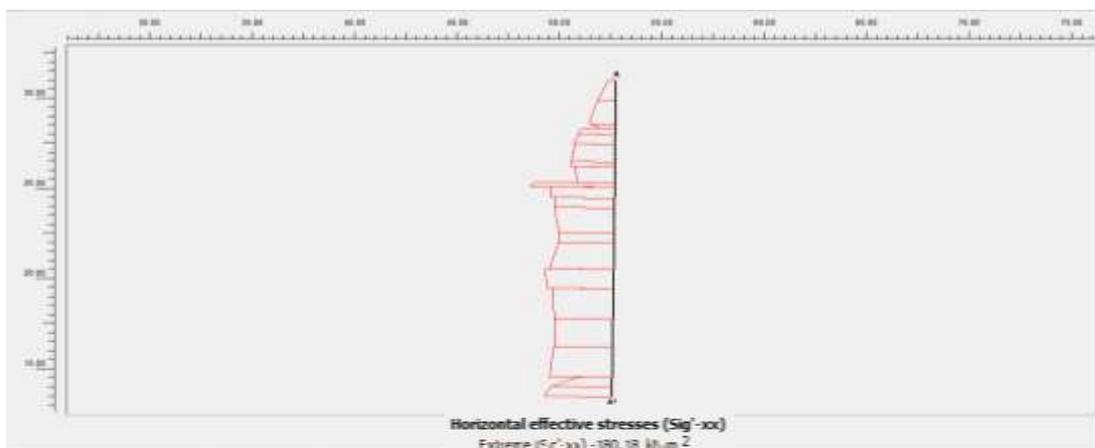
Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan bahwa dengan adanya pondasi pada lokasi tinjauan tidak terlalu berpengaruh terhadap pola kelongsoran yang terjadi. Hal ini karena letak pondasi dari pilar jembatan berada di bawah dari daerah kritis lereng tersebut. Nilai *safety factor* (SF) dari lereng pada kondisi sebelum dan setelah adanya pondasi tinjauan secara berturut-turut adalah 1,218 dan 1,222.

#### Analisis Tegangan pada Pondasi Tiang Kelompok

Pondasi tiang kelompok dimodelkan sebagai sebuah blok beton dengan modulus elastisitas komposit dari beton pondasi tiang dan tanah. Pada analisis pondasi dimodelkan sebagai sebuah blok beton dengan kedalaman 22 m, dimana pada kedalaman tersebut merupakan kedalaman dari perencanaan pondasi tiang kelompok tersebut. Analisis dilakukan pada faktor-faktor yang bisa menyebabkan kegagalan pada pondasi. Dari hasil analisis tersebut kemudian diperoleh penyebab terjadinya kegagalan pondasi untuk analisis lebih lanjut.

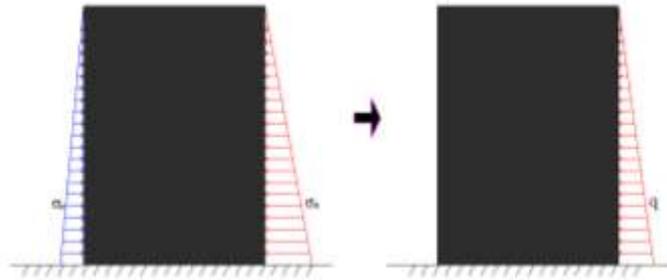


Gambar 7. Diagram tegangan pendorong horisotal



Gambar 8. Diagram tegangan pendorong horisotal

Gambar 7 dan Gambar 8 merupakan diagram tegangan hasil analisis terhadap pondasi pada kedalaman 22 meter. Hasil analisis tersebut menunjukkan tegangan pendorong ( $\sigma_d$ ) yang terjadi pada pondasi sebesar 628,15 kN/m<sup>2</sup>, Sedangkan dari tegangan penahan ( $\sigma_p$ ) sebesar 180,18 kN/m<sup>2</sup>. Dari tegangan horizontal yang terjadi dilakukan perhitungan untuk mengetahui apakah pondasi tersebut mampu menahan momen lentur akibat tegangan horizontal yang terjadi. Selanjutnya dilakukan perhitungan terhadap momen lentur yang terjadi. Dalam perhitungan, pondasi dimisalkan sebagai sebuah struktur kantilever yang menerima beban horizontal segitiga.



Gambar 9. Model analisis tegangan horizontal

Beban Merata Segitiga:

$$\begin{aligned} q &= \sigma_h \times \text{panjang pile cap} \\ &= 447,97 \times 32,4 \\ &= 14514,228 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Momen Lentur Terjadi:

$$\begin{aligned} M_y &= 0,5q \times h \times 1/3 h \\ &= 0,5 \times 14514,228 \times 22 \times 1/3 \cdot 22 \\ &= 1170814,39 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah Pile} = 189 \text{ pile}$$

$$\begin{aligned} \text{Kapasitan Momen Total } (M_n) &= 189 \times 580 \text{ kNm} \\ &= 109620 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Hasil analisis menunjukkan momen lentur yang terjadi ( $M_y$ ) sebesar 1170814 kNm, dimana nilai tersebut lebih besar dari kapasitas momen lentur maksimum ( $M_n$ ) yang mampu ditahan yakni sebesar 109620 kNm. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pondasi tiang kelompok tersebut mengalami patah akibat tegangan horizontal yang terjadi.

## SIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan mengenai pondasi tiang kelompok, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis Plaxis 2D menunjukkan nilai *safety factor* dari lereng pada kondisi awal sebesar 1,218, sedangkan setelah adanya pondasi pada titik tinjauan sebesar 1,222. Hal ini menunjukkan bahwa adanya pondasi tersebut tidak terlalu berpengaruh pada stabilitas lereng. Menurut Bowles(1989), untuk lereng dengan nilai faktor keamanan  $1,07 < SF < 1,25$  menunjukkan bahwa longsor pernah terjadi (lereng kritis).
2. Longsor yang terjadi pada lereng tidak mempunyai pengaruh pada pondasi, dimana bidang gelincir yang terjadi tidak memotong bagian dari pondasi.
3. Berdasarkan analisis tegangan yang terjadi, deformasi pada pondasi disebabkan karena pondasi tiang tidak mampu menahan momen lentur yang timbul akibat tegangan horizontal yang terjadi.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Orang Tua dan Kakak yang selalu memberi dukungan dan motivasi. Bp. Yusep Muslih dan Bp. Harya Dananjaya atas bimbingannya selama ini. Seluruh keluarga besar laboratorium mekanika tanah UNS dan teman-teman teknik sipil 2011 yang selalu kompak dan ceria. Dosen dan staff teknik sipil UNS yang telah banyak berjasa.

## REFERENSI

- Anagnostopoulos, A. G. 1990. "Die Zusammendrückbarkeit Nichtbindiger Boden (The Compressibility of Cohesionless Soils)". Germany. Geotechnik, Vol. 13, p. 181-187.
- Coduto, Donald P. 2001. "Foundation Design Principles and Practices". Prentice Hall, Inc. New Jersey.
- Hidayat, Gawit. 2011. "Studi Kasus Analisis Kerusakan Abutmen Jembatan Sungai Babalang". Kalimantan Tengah. Jurnal Teknologi Berkelanjutan Vol.1, Ed.1, April 2011. p. 1.
- Kulhway, F.H. and Mayne, P.W. (1990). "Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design". Palo Alto. Electric Power Research Institute, Report No. EL-6800.

M. Zainuri, dkk. 2008. "Pengaruh Pelapisan Permukaan SiC dengan Oksida Metal Terhadap Modulus Elastisitas Komposit AL/SiC". Surabaya. Makara, Sains, Vol.12, No.2, November 2008. p. 126-133.