

Perencanaan dan Analisis Perkuatan Lereng Menggunakan Fondasi *Micropiles*

Wirman Hidayat^{1,*}, Rangga Adiprima Sudisman¹, Arlyn Aristo¹

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pertamina, Jakarta¹

Koresponden*, Email: wirman.hidayat@universitaspertamina.ac.id

Info Artikel		Abstract
Diajukan	13 Oktober 2022	<i>Slope reinforcement design with micropiles is widely employed to enhance the stability of unstable slopes. The main advantage of using micropiles is their high resistance capacity and ease of construction in limited work areas. In this study, the micropile design was conducted to improve slope stability. Additionally, the effect of pile installation distance (spacing) on the structural behavior of the micropiles, including shear resistance and bending moment, was investigated. The analysis was performed using the limit-equilibrium method and finite element method. The findings indicated that the micropiles increased the safety factor of unstable slopes from FS= 1,01 to meet the criteria (FS = 1,51). The study results also demonstrated that the shear resistance and bending moment per pile decreased as the installation distance between piles decreased. This reduction occurred due to the more distributed driving forces and the effect of a reduction in the bearing capacity of the pile group.</i>
Diperbaiki	25 Mei 2023	
Disetujui	25 Mei 2023	

Keywords: slope stability, micropiles, safety factor, shear resistance, bending momen, pile spacing

Abstrak

Perencanaan perkuatan lereng dengan *micropiles* merupakan salah satu metode yang biasa digunakan dalam meningkatkan stabilitas lereng yang labil. Keuntungan utama dalam penggunaan *micropiles* adalah memiliki kapasitas tahanan yang tinggi, mudah dikonstruksi, dan bisa dikerjakan pada area kerja yang terbatas. Pada penelitian ini dilakukan perancangan *micropiles* untuk meningkatkan stabilitas lereng, kemudian dilakukan studi terhadap pengaruh jarak pemasangan (spasi) tiang terhadap perilaku struktural *micropiles* yaitu tahanan geser dan momen lentur. Analisis dilakukan dengan metode kesetimbangan batas dan metode elemen hingga. Diperoleh bahwa perancangan *micropiles* yang dilakukan dapat meningkatkan angka keamanan lereng yang labil (FS = 1,01) menjadi memenuhi kriteria (FS = 1,51). Hasil studi pengaruh jarak pemasangan tiang menunjukkan bahwa tahanan gaya geser dan momen lentur per *pile* berkurang ketika jarak pemasangan antar tiang semakin kecil. Hal ini terjadi karena beban pada lereng lebih terdistribusi ke masing-masing *micropiles* dan adanya efek reduksi daya dukung pada grup tiang.

Kata kunci: stabilitas lereng, *micropiles*, angka keamanan, tahanan geser, momen lentur, spasi pemasangan tiang

1. Pendahuluan

Perkuatan lereng dengan menggunakan material struktural sering dilakukan untuk menjamin stabilitas lereng agar memenuhi kriteria, metode ini juga bisa memberikan kemudahan dalam proses konstruksi ketika kondisi lokasi pekerjaan memiliki area kerja yang terbatas dan sulit dijangkau, karena pekerjaan dengan perkuatan struktural membutuhkan area kerja yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan metode perbaikan dengan perubahan geometri dan perbaikan tanah. Salah satu jenis perkuatan lereng yang bisa digunakan adalah dengan menggunakan fondasi berdiameter kecil (150-300 mm) dari material beton bertulang atau menggunakan *casing* baja yang dipasang dengan metode pengeboran dan *grouting* [1] yang disebut dengan *micropiles*. Studi tentang penggunaan *micropiles* untuk perkuatan lereng sudah dilakukan sejak waktu yang cukup lama, diantaranya [2]–[4] menunjukkan bahwa penggunaan *micropiles* berhasil memberikan stabilitas lereng yang memenuhi kriteria.

Perhitungan stabilitas lereng umumnya dapat dihitung menggunakan metode kesetimbangan batas (*limit-equilibrium*) [5], [6]. Metode ini menggunakan prinsip perhitungan dengan menggunakan persamaan kesetimbangan (gaya atau momen) yang harus ditahan oleh kekuatan tanah dengan membagi massa tanah dalam beberapa irisan yang proporsional.

Untuk mendapatkan hasil perhitungan stabilitas lereng dan perencanaan perkuatan yang menyeluruh, maka digunakan analisis menggunakan metode elemen hingga (*finite element*), pada metode ini dapat diperoleh stabilitas lereng dengan menghitung angka keamanan (*safety factor*) dengan analisis ϕ/c reduction. Parameter kekuatan tanah (c = kohesi dan ϕ = sudut geser) secara berulang-ulang direduksi, proses pengurangan kekuatan geser ini secara bertahap akan membuat lereng berdeformasi semakin besar dan pada suatu kondisi berada pada kondisi runtuh, angka keamanan didefinisikan sebagai faktor reduksi yang dicapai pada saat terjadi keruntuhan [7].

Pada penelitian ini dilakukan perancangan perkuatan lereng yang mengalami kelongsoran menggunakan *micropiles*. Analisis yang dilakukan meliputi stabilitas lereng tanpa dan dengan perkuatan, penentuan posisi pemasangan *micropiles* terhadap jarak horizontal lereng, dan pengaruh rasio spasi pemasangan dan diameter tiang terhadap gaya geser dan momen lentur yang terjadi pada tiang. Analisis dilakukan dengan metode kesetimbangan batas dan perangkat lunak berbasis elemen hingga PLAXIS 2D.

2. Metode

Studi ini membahas analisis stabilitas dan rencana perbaikan terhadap lereng yang labil menggunakan *micropiles*. Diagram alir penelitian terdapat pada **Gambar 1**. Pada tahap awal dilakukan analisis terhadap data pengujian laboratorium dan data lapangan berupa *engineering properties*, *index properties*, *triaxial*, dan *standard penetration test (SPT)* untuk mendapatkan parameter tanah. Dari hasil tersebut dilakukan analisis stabilitas terhadap lereng eksisting dengan metode kesetimbangan batas, tahap berikutnya dilakukan perancangan perkuatan lereng menggunakan *micropiles* agar memenuhi angka keamanan yang disyaratkan.

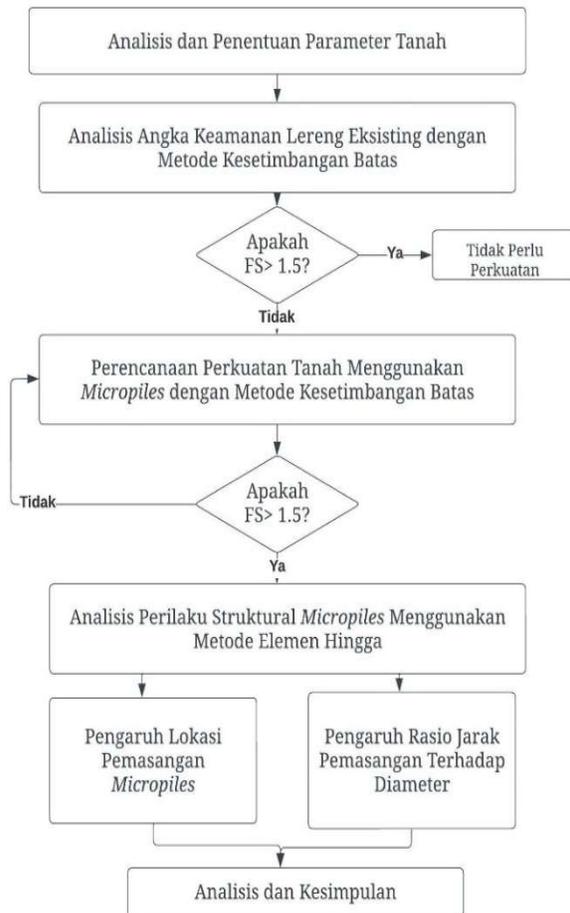
Untuk menganalisis hasil perkuatan yang dirancang, dilakukan pemodelan menggunakan perangkat lunak elemen hingga PLAXIS 2D. Pada tahap ini diperoleh nilai stabilitas, gaya geser dan momen lentur yang terjadi. Pada tahap selanjutnya dilakukan analisis terhadap variasi lokasi pemasangan *micropiles* dan pengaruh jarak pemasangan antar tiang terhadap perilaku struktural (gaya geser dan momen lentur) pada *micropiles*.

2.1 Analisis Data

Lereng yang ditinjau dalam studi ini adalah lereng alami yang memiliki ketinggian 18-meter dengan jarak horizontal adalah 20 meter, pada bagian atas lereng terdapat bangunan rumah tinggal 1 (satu) lantai dan pada bagian bawah lereng terdapat sungai dengan ketinggian muka air rata-rata adalah 2-meter, kondisi eksisting lereng terdapat kelongsoran dengan ketinggian longsor 3-meter seperti pada **Gambar 2**. Hal ini memberikan indikasi bahwa lereng tersebut berada dalam kondisi labil. Berdasarkan hasil penyelidikan tanah yang dilakukan, terdapat 5 (lima) lapisan tanah dimana pada lapisan permukaan sampai dengan kedalaman 6-meter terdapat tanah lempung kepasiran dengan konsistensi sangat lunak, pada lapisan kedua (6 – 20 meter) terdapat tanah lempung sedang, dan pada

lapisan berikutnya terdapat lapisan yang relatif lebih kuat berupa pasir berlempung, parameter analisis yang digunakan dan geometri lereng terdapat pada **Tabel 1** dan **Gambar 3**.

Tabel 1 dan **Gambar 3**.



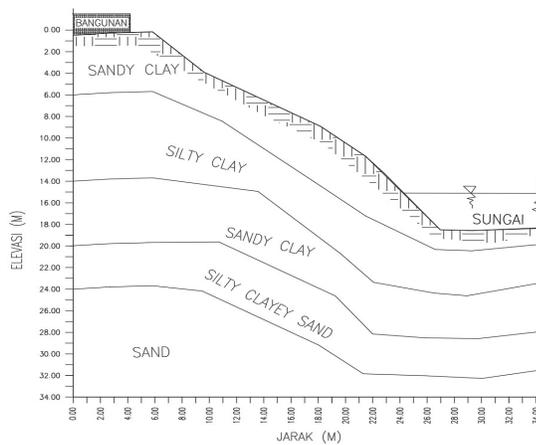
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2. Kondisi Eksisting Lereng terdapat Longsor

Tabel 1. Parameter Analisis

Lapisan	Kedalaman (m)		Parameter Kuat Geser		γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	k (m/day)
	Dari	Sampai	c' (kPa)	ϕ' (°)			
Sandy Clay	0	6	7	8	15,50	16,42	0,0086
Silty Clay	6	14	55	12	15,50	17,97	0,0086
Sandy Clay	14	20	60	15	15,70	18,67	0,086
Silty Clayey Sand	20	24	4	35	15,82	19,75	8,64
Sand	24	42	2	35	16,02	19,78	8,64
Tinggi muka air	7-meter dibawah permukaan tanah						
Beban bangunan	Beban merata 10 kPa						



Gambar 3. Kontur Lereng dan Profil Tanah

2.2 Stabilitas Lereng dan Perencanaan Micropiles

Kondisi lereng eksisting harus dievaluasi berdasarkan hasil pengujian tanah lapangan dan laboratorium. Analisis akan memberikan hasil berupa tingkat kestabilan lereng dalam bentuk angka keamanan (FS) sehingga bisa ditentukan apakah diperlukan perkuatan atau tidak berdasarkan kriteria yang terdapat pada **Tabel 2**. Metode kesetimbangan batas dapat menghitung angka keamanan lereng dengan mempertimbangkan gaya interaksi yang terjadi antar irisan model yang dibuat [5] seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**, angka keamanan dihitung dengan menentukan solusi kesetimbangan gaya pada persamaan 1.

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n + W_n \tan \phi' + \Delta T \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \frac{1}{\left(\cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{FS} \right)} \quad (1)$$

dimana:

- FS = angka keamanan (-)
- c' = nilai kohesi tanah (kPa)
- ϕ' = sudut geser tanah (°)

- b_n = lebar irisan (m)
- W_n = berat irisan tanah (kN)
- ΔT = resultan gaya antar irisan (kN)
- α_n = sudut antara bidang lonsor dengan vertikal (°)

Pada persamaan 1 terlihat bahwa variabel angka keamanan (FS) terdapat pada sisi kiri dan kanan, sehingga dalam penyelesaian persamaan tersebut perlu dilakukan proses *trial-error* sehingga nilai FS yang diperoleh dapat memenuhi kondisi pada masing- masing persamaan.

Tabel 2. Nilai Faktor Angka Keamanan untuk Lereng [8]

Biaya dan konsekuensi dari kegagalan lereng	Tingkat ketidakpastian kondisi analisis	
	Rendah	Tinggi
Biaya perbaikan sebanding dengan biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,25	1,5
Biaya perbaikan lebih besar dari biaya tambahan untuk merancang lereng yang lebih konservatif	1,5	$\geq 2,0$

Tujuan utama dari penggunaan *micropiles* adalah untuk meningkatkan stabilitas lereng sehingga memenuhi kriteria angka keamanan yang disyaratkan mengacu pada SNI-8460 [8], sebagai panduan teknis dalam perhitungan juga digunakan FHWA-NHI-05-039 [9].

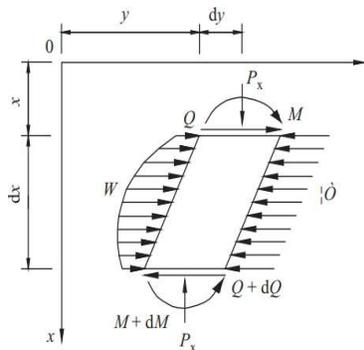
Dalam perencanaan perkuatan menggunakan *micropiles* diperlukan perhitungan tahanan geser tanah dan tahanan perkuatan dibandingkan terhadap beban yang bekerja pada lereng. Proses perancangan dimulai dengan desain *preliminary* untuk menentukan panjang, diameter dan spasi pemasangan tiang menggunakan metode kesetimbangan

menggunakan metode kurva $p-y$, dimana y adalah defleksi tiang dan p adalah respon tanah.

Metode kurva $p-y$ dimodelkan secara analitis oleh [10], [11] menggunakan model *conventional-beam column equation* dimana perhitungan dilakukan dengan mengasumsikan bahwa tiang berlaku sebagai sebuah kolom yang mendapatkan gaya lateral dan gaya tekan vertikal pada pusat massa kolom seperti pada **Gambar 7**. Untuk mendapatkan nilai parameter tahanan geser yang diperlukan maka digunakan persamaan 4.

$$\frac{dM}{dx} + P_x \frac{dy}{dx} = 0 \tag{4}$$

Dimana dM adalah mom en lentur, P_x adalah gaya tekan aksial dan y adalah defleksi.



Gambar 7. Analisis elemen micropiles dengan Model Kolom [10]

2.2.3 Perhitungan Jarak Pemasangan (Spasi)

Spasi pemasangan *micropiles* memberikan pengaruh langsung terhadap angka keamanan dan besarnya gaya lateral yang ditahan oleh masing- masing tiang, selain itu jarak pemasangan sangat berpengaruh terhadap kemampuan perkuatan dalam menahan massa tanah, konfigurasi pemasangan tiang ditunjukkan pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**. Jarak maksimum (S_{1maks}) pemasangan *micropiles* ditentukan oleh perbandingan antara besar gaya lateral yang mampu ditahan oleh tiang (H_{ult}) dibagi terhadap gaya total yang harus ditahan (H_{req}) dengan persamaan 5.

$$S_{1max} = \frac{H_{ult}}{H_{req}} \tag{5}$$

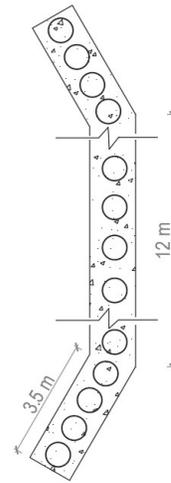
Untuk mengevaluasi potensi deformasi plastis yang terjadi diantara *micropiles* [12] digunakan teori dalam bentuk gaya lateral tanah terhadap *micropiles* pada persamaan 6.

Gaya horizontal ultimit yang bekerja pada *micropiles* yang disebabkan oleh pergerakan massa tanah diantara *micropiles* ($H_{ult-soil/pile}$) dihitung dengan mengintegrasikan nilai q berdasarkan kedalaman *micropiles* dari bagian atas bidang longsor. Untuk mengevaluasi spasi

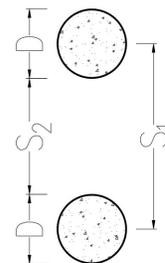
pemasangan yang direncanakan maka digunakan ketentuan berikut:

- 1) Jika $H_{ult-soil/pile} \geq \frac{H_{ult}}{2}$ maka kondisi aliran plastis tidak terpenuhi, maka spasi yang digunakan adalah $S_1 = S_{1maks}$
- 2) Jika $H_{ult-soil/pile} < H_{ult}/2$ maka kondisi aliran plastis terpenuhi, maka spasi yang digunakan adalah $S_1 < S_{1maks}$

Penentuan jarak pemasangan (spasi) dalam perencanaan *micropiles* merupakan hal yang sangat penting dan bersifat spesifik berdasarkan kasus yang ditinjau. Spasi pemasangan yang terlalu dekat dapat menyebabkan peningkatan biaya konstruksi, sedangkan jika spasi pemasangan terlalu jauh, maka deformasi dan gaya yang terjadi pada tiang meningkat, sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada tiang. Oleh karena itu pada studi ini juga dilakukan analisis pengaruh jarak pemasangan (S_1) terhadap diameter tiang (D) yang dinyatakan dalam rasio (S_1/D) terhadap gaya geser dan momen lentur yang terjadi pada tiang.



Gambar 8. Layout Pemasangan Micropiles



Gambar 9. Model Spasi Pemasangan Micropiles

$$q = cS_1 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{(N_\phi \tan \phi + N_\phi - 1)} \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \left\{ \exp \left(\frac{S_1 - S_2}{S_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - 2N_\phi^{\frac{1}{2}} \tan \phi - 1 \right\} + 2 \tan \phi + 2N_\phi^{\frac{1}{2}} \right. \\ \left. + \frac{N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{-1/2} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - c \left\{ S_1 2 \tan \phi + 2N_\phi^{\frac{1}{2}} + \frac{N_\phi^{-1/2}}{N_\phi^{\frac{1}{2}} \tan \phi + N_\phi - 1 - 2S_2 N_\phi^{-\frac{1}{2}}} \right\} \\ + \frac{\gamma' z}{N_\phi} \left\{ S_1 \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{(N_\phi \tan \phi + N_\phi - 1)} \right\} \exp \left(\frac{S_1 - S_2}{S_2} N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right) \right) - S_2 \quad (6)$$

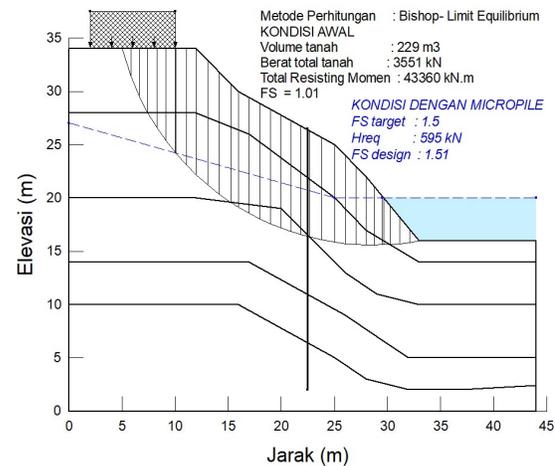
dimana:

- $N_\phi = \tan^2 \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right] (-)$
 $S_1 =$ Spasi tiang dari pusat-ke-pusat geometri (m)
 $S_2 =$ Jarak tiang dari sisi-ke-sisi geometri (m)
 $C =$ Kohesi tanah (kPa)
 $\phi =$ Sudut geser tanah dengan interface ($^\circ$)
 $\gamma' =$ Berat volume efektif tanah (kN/m^3)
 $z =$ Kedalaman titik tinjau dari permukaan tanah (m)

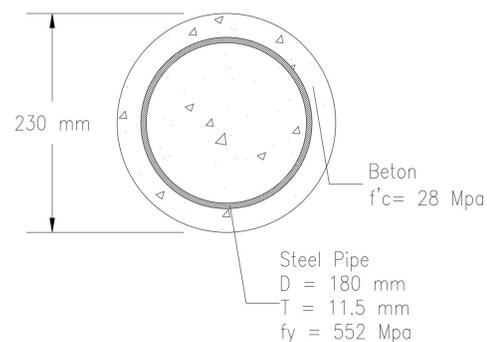
3. Hasil dan Pembahasan

Analisis stabilitas lereng dan perencanaan perkuatan lereng dilakukan menggunakan metode Bishop, dimana metode ini menggunakan prinsip kesetimbangan batas menggunakan persamaan 1, model analisis geometri terdapat pada **Gambar 10**. Analisis dilakukan dengan membagi lereng secara vertikal menjadi beberapa irisan, pada setiap irisan dihitung besar gaya yang mendorong dan gaya yang menahan, sehingga dari kesetimbangan gaya dan momen pada masing-masing irisan dapat ditentukan nilai angka keamanan, dari perhitungan tersebut nilai angka keamanan yang diperoleh adalah 1,01 dimana nilai ini menunjukkan bahwa lereng berada dalam kondisi labil.

Perkuatan lereng perlu dirancang agar lereng memenuhi kriteria keamanan. Perhitungan dilakukan untuk memperoleh nilai tahanan *micropiles* yang diperlukan, sedangkan untuk menentukan jarak pemasangan digunakan perbandingan antara besar gaya lateral yang mampu ditahan oleh tiang (H_{ult}) dibagi terhadap gaya total yang harus ditahan (H_{req}) pada persamaan 5, untuk menganalisis potensi deformasi platis tanah yang terjadi diantara *micropiles* digunakan persamaan 6. Berdasarkan hasil desain yang dilakukan diperoleh bahwa pemasangan *micropiles* dengan nilai tahanan geser (H_{req}) sebesar 595 kN memberikan angka keamanan yang memenuhi kriteria ($FS_{desain} = 1,51$). Panjang total tiang (L) adalah 28-meter dengan jarak pemasangan antar *pile* (S_i) adalah 0,75-meter, sedangkan diameter tiang (D) adalah 230 mm menggunakan casing pipa baja dengan diameter luar adalah 180-mm dan ketebalan pipa 11,5-mm, material baja mengacu pada standar API-N80 yang memiliki $f_y = 552$ Mpa, potongan melintang *micropiles* terdapat pada **Gambar 11**.



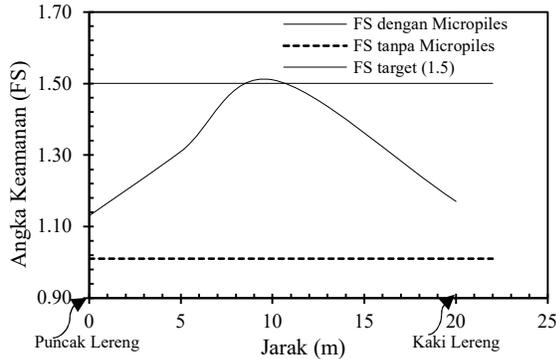
Gambar 10. Perhitungan Stabilitas Lereng dan Perkuatan Micropiles dengan Metode Kesetimbangan Batas



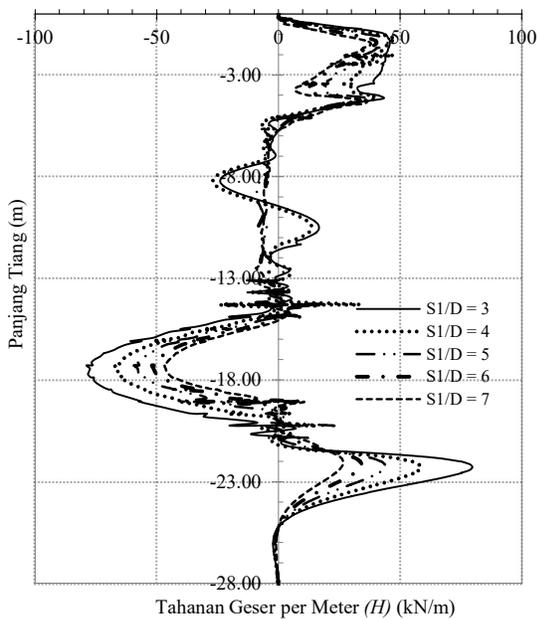
Gambar 11. Potongan Melintang Micropiles

Distribusi beban yang diterima oleh *micropiles* dipengaruhi oleh lokasi pemasangan tiang terhadap potongan melintang lereng. Oleh karena itu dilakukan analisis untuk mendapatkan angka keamanan dengan melakukan variasi jarak pemasangan *micropiles* dari puncak lereng (X) dengan hasil seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 12**. Diperoleh bahwa pemasangan *micropiles* pada lokasi puncak dan kaki dari lereng tidak efektif dalam memberikan tahanan geser, hal ini terlihat dari kenaikan angka keamanan yang relatif kecil dan masih berada dibawah FS_{target} , sedangkan pemasangan *micropiles* yang dilakukan di

lokasi sekitar tengah lereng memberikan nilai *FS* tertinggi, dimana diperoleh angka keamanan sebesar 1,51. Pemasangan *micropiles* menyebabkan lokasi bidang longsor berubah, sehingga menyebabkan gaya yang mampu ditahan oleh tiang juga mengalami perubahan [13].



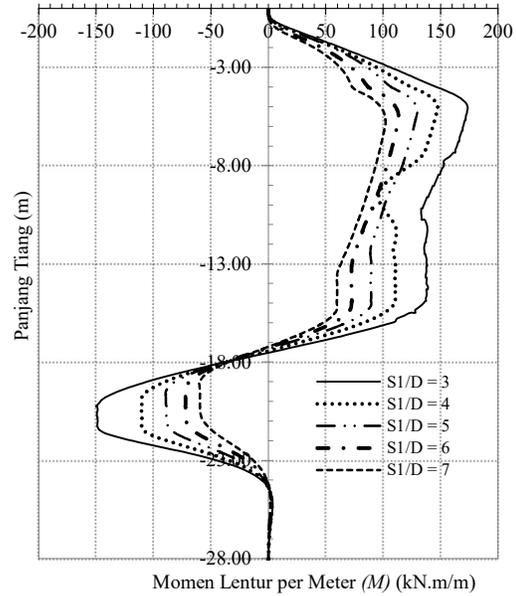
Gambar 12. Variasi Angka Keamanan Lereng terhadap Lokasi Micropiles



Gambar 13. Pengaruh Spasi Micropiles terhadap Tahanan Geser per Meter

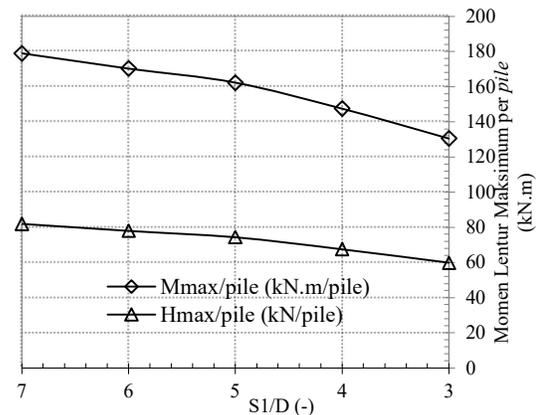
Hasil analisis pengaruh jarak pemasangan (S_1) terhadap diameter tiang (D) yang dinyatakan dalam rasio (S_1/D) terdapat pada **Gambar 13**. Diperoleh nilai gaya geser per meter pada spasi pemasangan terkecil ($S_1/D = 3$) menunjukkan nilai terbesar ($H_{max/meter} = 80 \text{ kN/m}$) dan nilai tersebut mengalami penurunan ketika spasi antar tiang meningkat dimana nilai terkecil ($H_{min/meter}$) diperoleh pada $S_1/D = 7$ yaitu sebesar 47 kN/m . Hal tersebut menunjukkan

bahwa semakin kecil spasi *micropiles* maka proporsi gaya geser per meter yang mampu ditahan oleh *micropiles* semakin besar, sehingga beban yang ditahan oleh tanah lereng menjadi berkurang dan menjadikan lereng lebih stabil.



Gambar 14. Pengaruh Spasi Micropiles terhadap Momen Lentur per Meter

Nilai momen lentur per meter ($M_{/meter}$) yang ditahan oleh *micropiles* memiliki perilaku yang sama dengan tahanan geser, dimana nilai $M_{/meter}$ semakin besar ketika spasi tiang semakin kecil, nilai $M_{max/meter}$ yang diperoleh adalah 174 kN.m/m pada $S_1/D = 3$ dan $M_{min/meter}$ adalah 102 kN.m/m pada $S_1/D = 7$ seperti yang ditunjukkan oleh **Gambar 14**.



Gambar 15. Pengaruh Spasi Micropiles terhadap Tahanan Geser dan Momen Lentur per pile

Efisiensi pemasangan *micropiles* dapat dilihat dari besar gaya geser dan momen lentur yang dapat ditahan oleh satu tiang *micropiles* pada grup tiang yang dipasang. Nilai

tersebut dapat diketahui dari nilai tahanan per *pile* ($H_{max/pile}$) dan ($M_{max/pile}$). **Gambar 15** menunjukkan bahwa nilai $H_{max/pile}$ dan $M_{max/pile}$ semakin kecil ketika jarak antar tiang semakin kecil. Dimana nilai $H_{max/pile}$ terbesar yang diperoleh adalah 82 kN/*pile* pada $S_1/D = 7$ dan nilai terkecil adalah 60 kN/*pile* pada $S_1/D = 3$. Hal yang sama juga ditunjukkan oleh nilai momen lentur per *pile* ($M_{max/pile}$), nilai momen terbesar adalah 179 kN.m/*pile* pada $S_1/D = 7$, dan nilai momen terkecil yang diperoleh adalah 131 kN.m/*pile* pada $S_1/D = 3$. Perubahan nilai tahanan per *pile* untuk masing-masing S_1/D terjadi karena pengaruh distribusi beban pada lereng ke *micropiles* dan efek reduksi daya dukung grup akibat interaksi tiang dan tanah, dimana daya dukung per *pile* berkurang ketika jarak antar tiang semakin dekat. Interaksi tiang dan tanah dalam kelompok atau grup berbeda dengan interaksi pada tiang tunggal, hal ini disebabkan oleh efek pemasangan tiang dan perubahan bidang runtuh tanah pada tiang yang berdekatan, perbedaan nilai tersebut ditentukan oleh sebuah parameter yang disebut dengan efisiensi [14]–[17].

4. Simpulan

Dari hasil pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1 Perencanaan perkuatan lereng menggunakan *micropiles* memberikan nilai angka keamanan yang memenuhi kriteria, dimana perancangan yang dilakukan meliputi penentuan panjang, diameter, kapasitas tahanan geser dan momen lentur, dan jarak pemasangan (spasi) *micropiles*.
- 2 Posisi pemasangan *micropiles* pada potongan melintang lereng (X) sangat menentukan nilai angka keamanan yang diperoleh. Untuk mendapatkan nilai angka keamanan tertinggi maka *micropiles* dipasang pada sekitar bagian tengah lereng.
- 3 Nilai tahanan geser dan momen lentur per meter akan meningkat ketika spasi pemasangan semakin kecil, hal ini menyebabkan angka keamanan lereng semakin besar karena proporsi beban yang diterima oleh *micropiles* semakin besar sehingga beban yang diterima lereng menjadi semakin kecil.
- 4 Nilai tahanan geser dan momen lentur per *pile* akan berkurang ketika spasi pemasangan semakin kecil, pemasangan *micropiles* yang merupakan grup tiang menyebabkan daya dukung tiang dipengaruhi oleh nilai efisiensi.

Daftar Pustaka

- [1] D. Bruce and I. Juran, "Drilled and Grouted

- micropiles: State-of-Practice Review," *US Fed. Highw. Adm. Publ. FHWA-RD-96-017*, 1997.
- [2] H. Bayesteh and M. Sabermahani, "Full-Scale Field Study on Effect of Grouting Methods on Bond Strength of Hollow-Bar Micropiles," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 144, no. 12, p. 04018091, Sep. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001983.
- [3] F. Lizzi, "Reticulated Root Piles to correct landslides," *ASCE Conv.*, vol. 3370, 1978.
- [4] J. . Loehr, J. . Bowders, and J. . Owen, "Slope stabilization with recycled plastic pins," *J. Transp. Res. Rec.*, vol. 1–8, p. 1714, 2000.
- [5] A. . Bishop, "The use of the slip circle in the stability of slopes," *Geotechnique*, vol. 5, no. 1, pp. 7–17, 1955.
- [6] N. . Morgenstern and V. . Price, "The analysis of the stability of general slip surfaces," *Geotechnique*, vol. 15, no. 1, pp. 79–93, 1965.
- [7] R. B. . Brinkgreve and H. . Bakker, "Non-linear finite element analysis of safety factors," in *Int. Conf. on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 1991, pp. 1117–1122.
- [8] SNI-8460, "Persyaratan Perancangan Geoteknik," 2017.
- [9] FHWA-NHI-05-039, "Micropile Design & Construction," 2005.
- [10] L. . Reese and R. . Welch, "Lateral loading of deep foundations in stiff clay," *J. Geotech. Eng. Div.*, vol. 101, no. 7, pp. 633–649, 1975.
- [11] H. Matlock, "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay," *Proc. Annu. Offshore Technol. Conf.*, 1970.
- [12] T. Ito and T. Matsui, "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles," *Soils Found.*, vol. 15, no. 4, 1975.
- [13] S. Hassiotis and J. . Chameau, "Stabilization of Slopes using Piles," *FHWA/IN/JHRP*, vol. 84, no. 8, 1984.
- [14] M. . O'neil, "Group action in offshore piles," in *Proc. Conf. on Geotechnical Practice in Offshore Engineering*, 1983, pp. 25–64.
- [15] H. . Poulos and E. . Davis, *Pile foundation analysis and design*. New York: John Willey & Sons, Inc, 1980.
- [16] H. . Bolin, "The pile efficiency formula of the Uniform Building Code- Bldg. Standards Monthly," 1941.
- [17] A. Vesic, "Analysis of pile group behavior predictions for the Houston site," 1980.