

## Studi Parametrik Perkuatan Tiang pada Lereng: Evaluasi Stabilitas dan Respons Tiang dengan Metode Elemen Hingga 2D

\* Karina Meilawati Eka Putri<sup>1</sup>, Griselda Junianda Velantika<sup>1</sup>, Rizqi Alghiffary<sup>1</sup>, Elok Dewi Widowati<sup>1</sup>, Muhamad Fauzan Akbari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

\*[karina.meilawati.ft@upnjatim.ac.id](mailto:karina.meilawati.ft@upnjatim.ac.id)

### Abstract

Landslides due to slope instability are natural phenomena that can lead to substantial damage to infrastructure, loss of property, and human fatalities. Slope-stabilizing piles are among the most effective and widely used recently to increase slope stability. This paper presents an evaluation of slope-stabilizing piles using 2D finite element method (FEM), including a parametric study on the effects of pile diameter, pile spacing, and pile length on the pile responses, such as bending moment and deformation. The analysis conducted in this research employed 2D FEM. FEM modeling was performed with the plane strain model and the Hardening Soil (HS) constitutive model. A parametric study was conducted by varying the pile parameters, such as pile length (12, 16, and 20 meters), diameter of pile (0.6, 0.8, 1.0, and 1.2 meters), and pile spacing (1.5D, 2D, 3D, and 4D). Based on the analysis results, pile length shows the most significant influence on slope stability; an increase in pile length is proportional to an increase of the factor of safety and bending moments but inversely proportional to the resulting deformation. On the other hand, pile diameter was found to have no significant impact on the improvement of the Factor of Safety in this study, although dimensional variations affect internal forces, specifically regarding deformation and bending moment distribution within the pile. Furthermore, increasing the spacing between piles tends to decrease the factor of safety because it weakens the soil arching mechanism, which subsequently increases deformation at the pile head. This research suggested that the optimization of slope stability is more dependent on the embedment length of pile and pile spacing rather than the pile diameter.

**Keywords:** Finite Element Method (FEM), Parametric Study, Pile, Slope Stability

### Abstrak

Ketidakstabilan lereng merupakan permasalahan geoteknik yang memerlukan penanganan serius untuk mencegah kerugian material maupun korban jiwa. Penggunaan tiang sebagai elemen perkuatan lateral menjadi salah satu solusi efektif untuk meningkatkan faktor keamanan lereng. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter desain tiang yang meliputi panjang, diameter, dan spasi antar tiang terhadap peningkatan stabilitas dan respon tiang seperti momen lentur dan deformasi. Analisis pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga (FEM) 2D. Pemodelan FEM dilakukan dengan menggunakan model *plane strain* dan model konstitutif tanah *Hardening Soil* (HS). Pada penelitian ini studi parametrik yang dilakukan yaitu variasi panjang tiang (12, 16, dan 20 meter); diameter tiang (0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2 meter); dan spasi antar tiang (1,5D; 2D; 3D; dan 4D). Berdasarkan hasil analisis diketahui bahwa panjang tiang memiliki pengaruh paling signifikan terhadap stabilitas lereng; penambahan panjang tiang berbanding lurus terhadap kenaikan faktor keamanan (FK) dan momen lentur, namun berbanding terbalik dengan deformasi yang terjadi. Sementara itu, diameter tiang ditemukan tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap peningkatan faktor keamanan pada studi ini, meskipun perubahan dimensinya memengaruhi karakteristik internal berupa deformasi dan distribusi momen lentur pada tiang. Di sisi lain, peningkatan spasi antar tiang berdampak pada penurunan faktor keamanan yang disebabkan oleh melemahnya mekanisme *soil arching* di antara tiang, yang pada akhirnya memicu peningkatan deformasi pada kepala tiang. Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa optimasi stabilitas lereng lebih bergantung pada kedalaman dan spasi antar tiang dibandingkan dengan diameter tiang.

**Kata Kunci:** *Finite Element Method* (FEM), Stabilitas Lereng, Studi Parametrik, Tiang Perkuatan.

## PENDAHULUAN

Fenomena alam berupa tanah longsor akibat ketidakstabilan lereng dapat menyebabkan kerusakan besar pada infrastruktur, kehilangan harta benda, dan korban jiwa. Lereng yang menjadi objek kajian penelitian ini terletak pada suatu area proyek di Jawa Barat, menunjukkan potensi terjadinya kelongsoran. Terlihat terdapat retakan di sepanjang lereng, yang mengindikasikan potensi kegagalan lereng, hal ini menunjukkan kebutuhan mendesak untuk intervensi guna memastikan keselamatan infrastruktur di sekitarnya. Untuk mengurangi risiko yang terjadi, sangat penting untuk melakukan stabilisasi lereng yang tidak stabil tersebut.

Dalam studi kasus ini, tiang bor digunakan untuk upaya stabilisasi lereng untuk meningkatkan stabilitas lereng dan mencegah potensi tanah longsor. Penggunaan

tiang untuk stabilisasi lereng merupakan salah satu metode yang paling efektif dan banyak digunakan akhir-akhir ini (Abdelaziz dkk., 2017; Cai & Ugai, 2000; Wei & Cheng, 2009). Tiang memberikan tahanan terhadap kelongsoran dengan memberikan penjangkaran dan meneruskan beban struktural ke lapisan tanah yang lebih stabil di bawah permukaan. Mekanisme penahan ini sangat penting untuk memperkuat dan menstabilkan lereng yang tidak stabil karena berbagai faktor, seperti kemiringan lereng yang curam, kondisi tanah yang buruk, dan adanya beban eksternal. Desain tiang yang efektif digunakan untuk menstabilkan lereng menurut (Poulos, 1995) harus memiliki kekakuan yang relatif tinggi, panjangnya melampaui bidang gelincir kritis, serta diposisikan di dekat pusat lingkaran keruntuhan kritis.

Untuk mendapatkan desain yang optimal, biasanya insinyur geoteknik menggunakan dua metode

analisis yang banyak digunakan, yaitu metode keseimbangan batas/ *Limit Equilibrium Method* (LEM) dan metode elemen hingga/ *Finite Element Method* (FEM). FEM merupakan metode yang akurat dan adaptif untuk melakukan analisis stabilitas lereng karena metode ini tidak memerlukan asumsi terkait posisi dan titik pusat bidang keruntuhan lereng (Li dkk., 2016). Lebih lanjut, FEM sering kali menghasilkan faktor keamanan yang lebih tinggi dibandingkan LEM karena mampu memperhitungkan secara detail mekanika internal yang kompleks serta distribusi tegangan di dalam massa tanah (Gupta & Mehndiratta, 2025). Meskipun analisis FEM dua dimensi (2D) cenderung lebih konservatif dibandingkan pemodelan 3D (Benmebarek dkk., 2022; Griffiths & Marquez, 2007), metode ini tetap menjadi solusi yang sangat efisien dan layak digunakan apabila batasan-batasannya diperhatikan dan didefinisikan dengan baik, terutama pada kasus di mana hasil antara 2D dan 3D tidak menunjukkan perbedaan hasil yang signifikan.

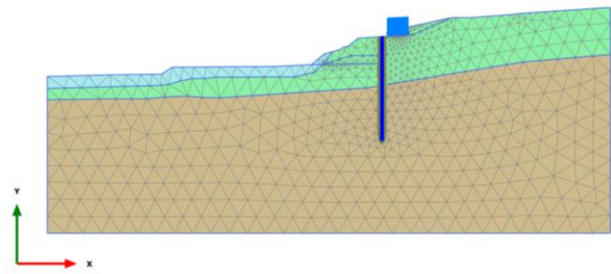
Dalam pemodelan FEM, model konstitutif tanah penting untuk diperhatikan karena sangat menentukan bagaimana interaksi antara tanah dan struktur serta akan menentukan akurasi dari prediksi deformasi yang terjadi. Meskipun model Mohr-Coulomb (MC) banyak digunakan karena kesederhanaannya, sebuah studi baru-baru ini oleh (Slimane HACINI dkk., 2025) menunjukkan bahwa model MC sering memberikan hasil yang konservatif atau tidak realistis dalam masalah geoteknik yang kompleks. Pada penelitian ini, model konstitutif tanah *Hardening Soil* (HS) digunakan untuk mengatasi keterbatasan yang ditimbulkan oleh model konstitutif yang lebih sederhana seperti Mohr-Coulomb tersebut. Salah satu poin penting pada pemodelan numerik pekerjaan galian dapat dimodelkan dengan baik oleh model konstitutif tanah HS karena model HS menggunakan formulasi tegangan-regangan hiperbolik yang secara akurat dapat merepresentasikan respons tanah pada tingkat regangan kecil dan membedakan antara kekakuan pada proses pembebanan (*loading*) dan pelepasan beban (*reloading*) (Schanz dkk., 2019). Mengingat bahwa model HS ini dirancang khusus untuk mensimulasikan perilaku penggalian, model ini merupakan model konstitutif yang optimal untuk penelitian ini, karena analisis stabilitas lereng yang ditinjau melibatkan tahap pekerjaan penggalian.

Artikel ilmiah ini menyajikan evaluasi penggunaan tiang bor sebagai salah satu metode untuk meningkatkan stabilitas lereng menggunakan FEM 2D, termasuk studi parametrik tentang pengaruh diameter tiang, jarak, dan panjang tertanam pada respons tiang, seperti faktor keamanan, momen lentur, dan deformasi. Pada akhirnya, artikel diharapkan dapat menjadi referensi untuk praktik desain yang berkaitan dengan lereng yang diperkuat menggunakan tiang.

## METODE

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak FEM 2D. Pemodelan FEM dilakukan dengan menggunakan model *plane strain*. Untuk mendapatkan akurasi tinggi, pemodelan FEM dengan 15

*node* digunakan pada penelitian ini. Lereng yang ditinjau dimodelkan berdasarkan data kontur dari proyek yang terletak di Jawa Barat. Parameter tanah yang digunakan pada pemodelan didapatkan dari hasil uji lapangan dan laboratorium. Data lapangan yang digunakan berupa data kontur dan Standard Penetration Test (SPT), sedangkan untuk data hasil uji laboratorium yang digunakan merupakan data sifat fisik dan mekanik tanah. Gambar 1 menunjukkan pemodelan FEM untuk lereng yang menjadi objek studi.



Gambar 1. Pemodelan FEM Lereng  
Sumber: Hasil Pemodelan (2026)

Penelitian ini menggunakan data tanah hasil dari uji SPT yang terdiri dari lapisan tanah lempung dengan tiga konsistensi berbeda, yaitu konsistensi sedang, kaku, dan keras. Parameter sifat fisik diambil dari data hasil uji laboratorium sedangkan parameter sifat mekanik tanah diperoleh dari hasil korelasi empiris. Penggunaan korelasi empiris ini diperlukan mengingat data uji laboratorium yang terbatas pada hasil tes triaxial UU saja. Data tersebut tidak mencukupi untuk mendefinisikan parameter kekakuan dan kekuatan efektif yang dibutuhkan dalam analisis. Parameter data tanah yang digunakan dalam pemodelan dapat dilihat pada Tabel 1. Pemodelan numerik dengan menggunakan metode elemen hingga dilakukan dengan menggunakan model konstitutif tanah HS. Hal ini dilakukan karena model HS dapat merepresentasikan dengan akurat deformasi akibat pekerjaan galian yang terdapat pada pekerjaan perkuatan lereng yang ditinjau pada penelitian ini.

Tiang bor pada pemodelan numerik ini dimodelkan sebagai *plate* dengan material beton K-350 yang memiliki kuat tekan 30 MPa. Tiang dimodelkan dengan kekakuan dan kekuatan ekuivalen, dimana kekakuan tiang dibagi dengan spasi antar tiang. Tiang diasumsikan elastik sehingga tidak memiliki deformasi plastik. Modulus elastisitas tiang yang digunakan adalah sebesar 25 GPa. Tiang bor yang digunakan sebagai perkuatan hanya terdiri dari satu baris saja dengan tidak ada batasan yang diterapkan pada bagian ujung tiang. Pada pemodelan ini tidak dilakukan variasi perubahan letak tiang bor yang digunakan sebagai perkuatan pada lereng. Pembebanan yang dimodelkan merupakan pembebanan pada masa konstruksi untuk merepresentasikan beban alat berat sebesar 12 kPa.

Tahapan konstruksi pemodelan FEM tiang perkuatan lereng dilakukan dengan pertama-tama melakukan *generate initial stress* dengan mekanisme *Gravity Loading*. Hal ini dilakukan karena lapisan tanah yang digambarkan tidak rata. Langkah selanjutnya adalah

tahap *land clearing* di bagian atas lereng yang dilakukan untuk menyiapkan area kerja dari perkuatan lereng. Setelah itu dilakukan instalasi tiang dan aktivasi beban alat berat pada lereng. Setelah tiang berhasil terpasang, barulah pekerjaan galian dilakukan beserta dengan tahap pengecekan faktor keamanan.

Studi parametrik yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan panjang, diameter, dan spasi tiang bor yang digunakan sebagai perkuatan lereng. Berdasarkan variasi yang dilakukan selanjutnya dilihat pengaruhnya terhadap faktor keamanan, momen dan deformasi yang terjadi pada tiang untuk mengetahui perilaku tiang yang digunakan sebagai perkuatan lereng. Pada penelitian ini panjang tiang yang ditinjau adalah 12, 16, dan 20 meter. Sedangkan untuk diameter tiang yang digunakan adalah 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2 meter. Untuk spasi antar tiang yang digunakan yaitu 1,5D; 2D; 3D; dan 4D.

Tabel 1. Parameter Data Tanah

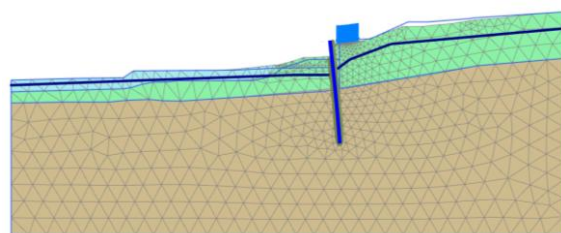
Jenis Tanah	Ketebalan Lapisan [m]	Konsistensi Tanah	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]		Parameter Kuat Geser		E50 [kN/m <sup>2</sup> ]	Eoed [kN/m <sup>2</sup> ]	Eur [kN/m <sup>2</sup> ]
			Tidak Jenuh	Jenuh	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'$ [°]			
Lempung	2	Sedang	16	17	4	21	6300	5040	18900
Lempung	2	Kaku	17	18	6	20	14000	11200	42000
Lempung	18	Keras	19	20	6	23	42000	33600	126000

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

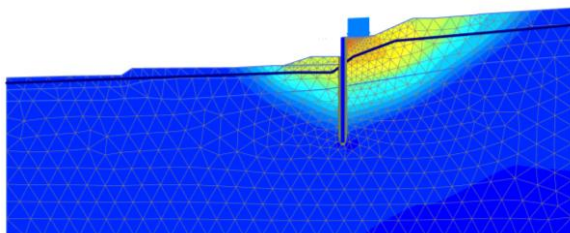
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini titik perkuatan diletakkan di tengah lereng sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh (Benmebarek dkk., 2022; Summersgill dkk., 2017) yang menunjukkan bahwa tiang yang diletakkan di tengah lereng memberikan nilai faktor keamanan paling tinggi. Oleh karena itu, lokasi tiang bor pada penelitian ini tidak divariasikan dan diletakkan di tengah lereng.

Hasil pemodelan perkuatan lereng dengan menggunakan tiang bor dapat dilihat pada Gambar 2.



(a)



(b)

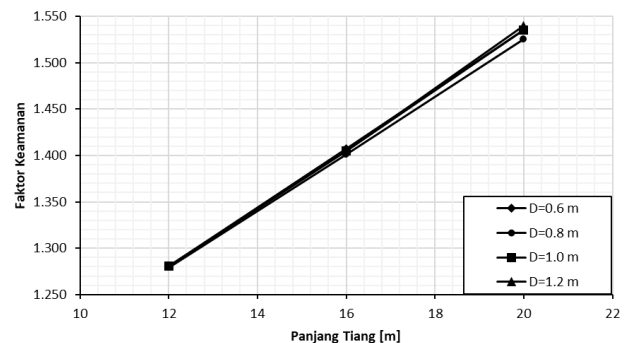
Gambar 2. Mekanisme Kegagalan Lereng yang ditampilkan dalam: (a) *Deformed mesh*; (b) Visualisasi Warna dari Peningkatan Deformasi total  
Sumber: Hasil Pemodelan (2026)

## Pengaruh Panjang Tiang

Pada penelitian ini, terdapat tiga variasi panjang tiang yang digunakan. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh panjang tiang terhadap kestabilan lereng yang ditinjau setelah proses galian dilakukan yang dilihat dari nilai momen lentur dan deformasi kepala tiang. Panjang tiang yang digunakan pada studi ini adalah 12 meter, 16 meter, dan 20 meter.

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan terhadap faktor keamanan lereng yang dapat dilihat pada Gambar 3, dapat dilihat bahwa panjang tiang berpengaruh signifikan terhadap nilai faktor keamanan lereng yang dicapai. Terlihat bahwa peningkatan panjang tiang berbanding lurus dengan peningkatan faktor keamanan yang diperoleh. Peningkatan faktor keamanan terjadi dari 1,28 untuk panjang tiang 12 meter dan mencapai faktor keamanan 1,54 saat panjang tiang 20 meter. Hasil ini konsisten dengan studi yang dilakukan oleh (Shi dkk., 2024) dimana memperpanjang tiang dapat mengubah bidang keruntuhan lereng, sehingga bidang keruntuhan berpindah ke jalur yang lebih dalam dan stabil.

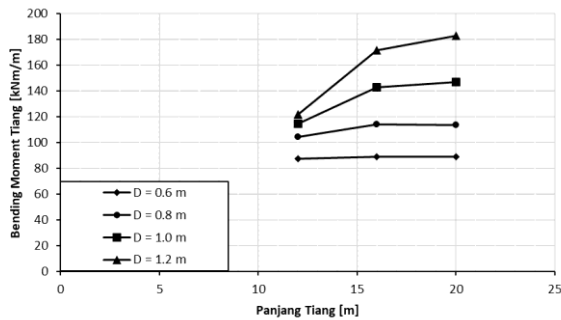
Keberadaan tiang yang melampaui bidang gelincir sebagaimana terlihat pada Gambar 2 (b) berfungsi sebagai jangkar yang memberikan daya tahan lateral tambahan untuk mencegah kelongsoran lereng. Fenomena ini memperkuat teori bahwa kedalaman tiang (panjang tiang) merupakan variabel kritis dalam menentukan stabilitas sistem, di mana semakin panjang bagian tiang yang berada di luar bidang gelincir, semakin besar pula momen yang dihasilkan untuk mencegah rotasi atau pergeseran lereng (Gupta & Mehndiratta, 2025) sehingga meningkatkan faktor keamanan yang diperoleh.



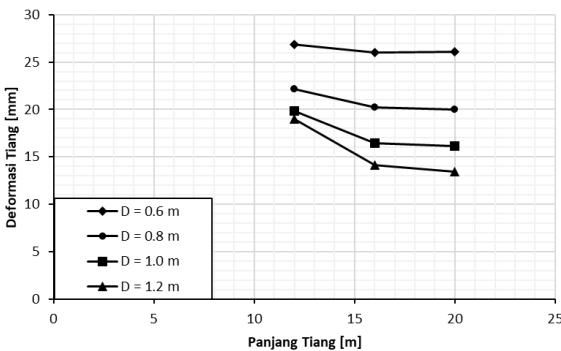
Gambar 3. Pengaruh Panjang Tiang Terhadap Faktor Keamanan Lereng  
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Selain pengaruh terhadap nilai faktor keamanan, panjang tiang juga berpengaruh pada nilai momen dan deformasi yang terjadi pada tiang sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5. Gambar 4 menunjukkan pengaruh panjang tiang terhadap momen lentur dan deformasi tiang pada kondisi spasi tiang tidak berubah. Berdasarkan grafik dapat dilihat bahwa penambahan panjang tiang cukup berpengaruh ketika diameter tiang lebih kecil dari 1 meter, baik untuk momen lentur dan deformasi. Sedangkan untuk pengaruh panjang tiang pada

beberapa variasi spasi antar tiang (Gambar 5) tidak menunjukkan pengaruh karena perubahan nilai momen lentur ataupun deformasi yang terjadi sangat minimum.

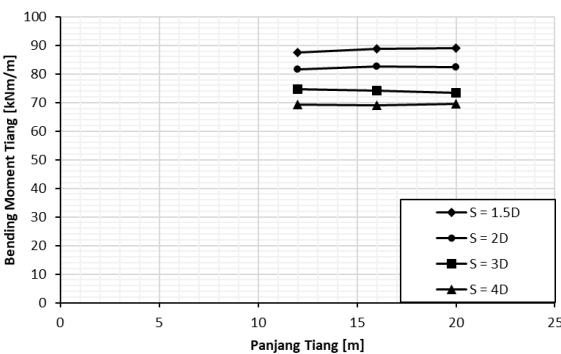


(a)

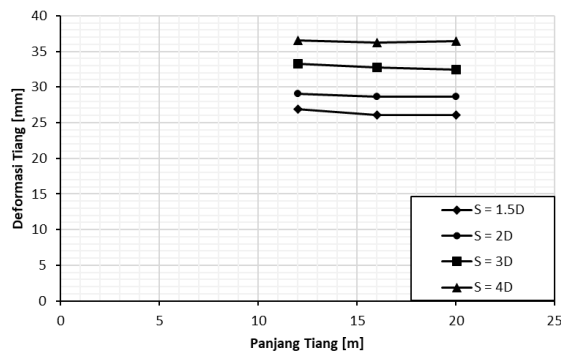


(b)

Gambar 4. Pengaruh Panjang Tiang Dengan Spasi Tetap Terhadap: (a) Momen Lentur Tiang; (b) Deformasi Tiang  
Sumber: Hasil Analisis (2026)



(a)



(b)

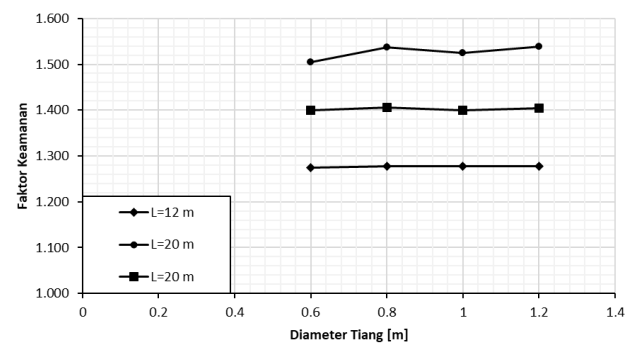
Gambar 5. Pengaruh Panjang Tiang Dengan Diameter Tetap Terhadap: (a) Momen Lentur Tiang; (b) Deformasi Tiang  
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Terlihat bahwa menambah panjang tiang perkuatan umumnya menyebabkan peningkatan momen lentur di sepanjang tiang. Namun, untuk tiang yang sudah cukup panjang, seperti pada studi ini yaitu panjang 16 meter dan lebih, peningkatan momen lentur menjadi kurang signifikan. Fenomena ini terjadi karena tiang mulai berperilaku seperti tiang dengan kondisi batas *fixed head* daripada *free head*. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada penelitian ini jika panjang tiang yang 16 meter, ujung kepala tiang mengalami pergerakan dan rotasi yang jauh lebih kecil sehingga menyerupai struktur yang lebih stabil dengan berkurangnya momen lentur.

Terkait deformasi tiang, peningkatan panjang tiang umumnya mengurangi deformasi kepala tiang. Namun, pada penelitian ini berkurangnya deformasi kepala tiang tidak begitu signifikan terutama saat panjang tiang melebihi 16 meter. Hal ini terjadi karena tiang yang lebih panjang memiliki kekakuan dan resistensi terhadap deformasi yang lebih besar akibat dari bertambahnya bagian tiang yang tertanam di bawah permukaan tanah.

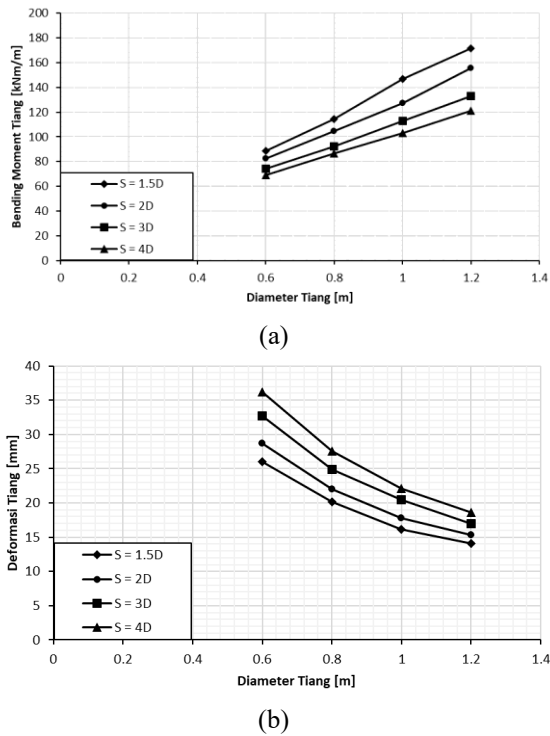
### Pengaruh Diameter Tiang

Variasi diameter tiang yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2 meter. Pengaruh diameter terhadap faktor keamanan tiang dapat dilihat pada Gambar 6. Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 6, dapat dilihat bahwa penambahan diameter tiang pada penelitian ini cenderung tidak berpengaruh terhadap faktor keamanan lereng yang ditinjau. Hasil ini memperkuat penelitian yang dilakukan oleh (Abdelaziz dkk., 2017) yang menunjukkan bahwa penambahan diameter tiang meningkatkan faktor keamanan namun peningkatan yang diberikan sangat minimum.

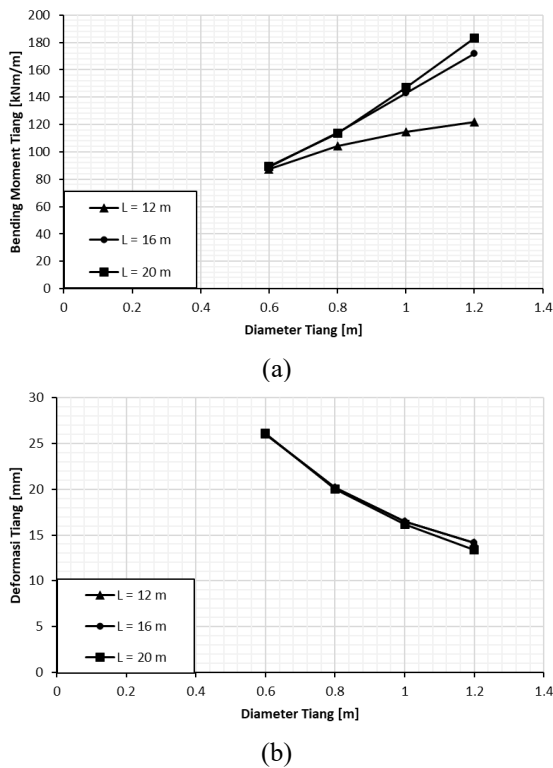


Gambar 6. Pengaruh Diameter Tiang Terhadap Faktor Keamanan Lereng  
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Sedangkan pengaruh diameter tiang terhadap momen lentur dan deformasi tiang terlihat sangat signifikan baik pada kondisi spasi tiang tetap ataupun panjang tiang tetap.



Gambar 7. Pengaruh Diameter Tiang Dengan Panjang Tiang Tetap Terhadap: (a) Momen Lentur Tiang; (b) Deformasi Tiang  
Sumber: Hasil Analisis (2026)



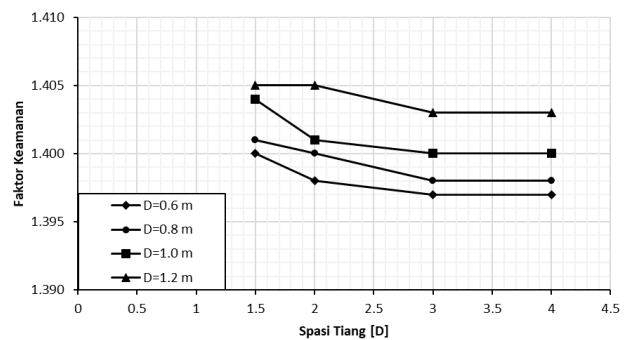
Gambar 8. Pengaruh Diameter Tiang Dengan Spasi Tetap Terhadap: (a) Momen Lentur Tiang; (b) Deformasi Tiang  
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Terlihat pada Gambar 7 dan Gambar 8 bahwa peningkatan diameter tiang berbanding lurus dengan peningkatan momen lentur yang terjadi pada tiang. Sedangkan deformasi yang terjadi pada tiang berkurang secara signifikan seiring dengan bertambahnya diameter tiang. Peningkatan diameter tiang memiliki peran penting dalam mengurangi deformasi kepala tiang, dengan penurunan deformasi yang cukup besar hingga 45%. Berbanding terbalik dengan deformasi, momen lentur yang terjadi pada tiang meningkat lebih dari 40%.

Peningkatan diameter ini meningkatkan kapasitas struktural tiang, memungkinkan tiang untuk menahan tegangan vertikal dan lateral secara lebih efektif. Secara mekanis, perluasan area penampang melalui peningkatan diameter tiang memfasilitasi distribusi beban yang lebih merata, sehingga menghasilkan deformasi yang lebih kecil dan peningkatan kapasitas momen lentur. Fenomena ini sekaligus memitigasi kegagalan struktural akibat gaya lateral, khususnya dalam mencegah terjadinya tekuk pada tiang (Gupta & Mehndiratta, 2025).

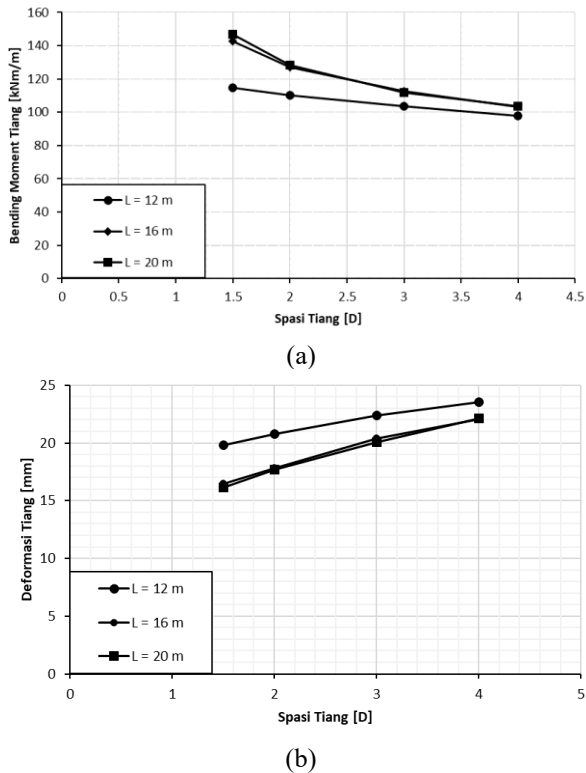
### Pengaruh Spasi Tiang

Pengaruh spasi tiang terhadap faktor keamanan lereng dapat dilihat pada Gambar 9. Terlihat bahwa semakin besar spasi antar tiang maka semakin rendah faktor keamanan yang diperoleh. Seiring bertambahnya jarak antar tiang, mekanisme *soil arching* yang terjadi melemah, yang akhirnya menyebabkan kegagalan di mana tanah "mengalir" di antara tiang-tiang tersebut. Mekanisme *soil arching* merupakan fenomena di mana material geologi mentransmisikan beban antara area yang dapat mengalami deformasi dan area yang berdekatan yang tidak dapat berdeformasi melalui formasi seperti *arch* (Le Hello & Villard, 2009).

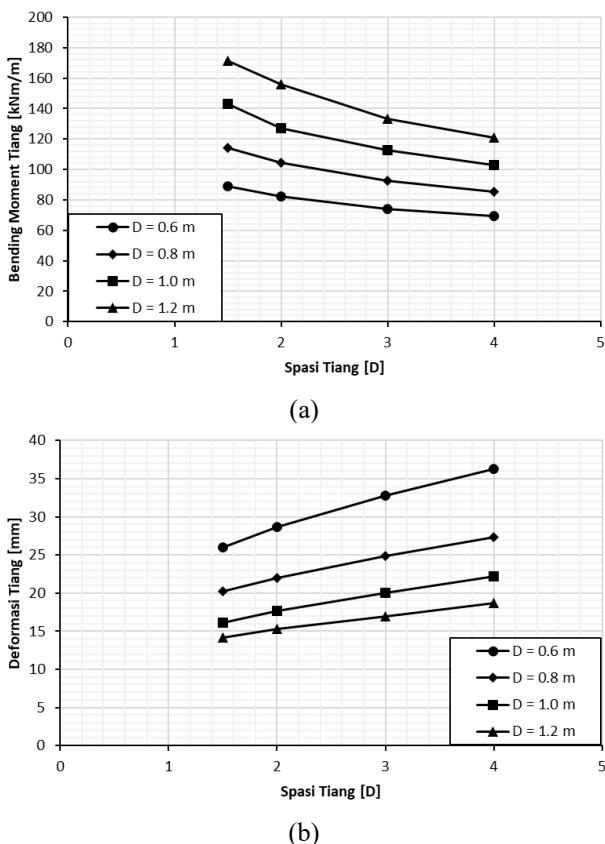


Gambar 9. Pengaruh Spasi Tiang Terhadap Faktor Keamanan Lereng  
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Pada jarak spasi yang lebih kecil (Spasi 1,5D dan 2D), tiang bekerja sebagai satu kelompok, dan deformasi tanah di antara tiang-tiang tersebut jauh lebih kecil. Seiring peningkatan rasio S/D, deformasi tanah di antara tiang-tiang tersebut juga meningkat. Hasil ini dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Peningkatan spasi antar tiang memicu pembesaran deformasi struktural, namun secara simultan mereduksi momen lentur yang bekerja pada tiang.



Gambar 10. Pengaruh Spasi Tiang Dengan Diameter Tetap Terhadap: (a) Momen Lentur Tiang; (b) Deformasi Tiang  
Sumber: Hasil Analisis (2026)



Gambar 11. Pengaruh Spasi Tiang Dengan Panjang Tiang Tetap Terhadap: (a) Momen Lentur Tiang; (b) Deformasi Tiang  
Sumber: Hasil Analisis (2026)

Karakteristik ini menunjukkan adanya pergeseran distribusi beban yang berkaitan dengan efektivitas mekanisme *soil arching*; di mana pada konfigurasi tiang yang cukup rapat, gaya geser dan momen lentur cenderung terkonsentrasi secara kolektif sebelum melampaui batas jarak kritis antar tiang (Athmarajah & De Silva, 2019; Hajiazizi dkk., 2017).

Mengingat rentang spasi dalam penelitian ini dibatasi hingga 4D, seluruh model yang dianalisis masih berperilaku sebagai kelompok tiang, karena mekanisme *soil arching* umumnya tetap efektif hingga spasi 5D sebelum tiang mulai berperilaku sebagai tiang tunggal (Jose dkk., 2025). Oleh karena itu, deformasi yang diamati masih terus mengalami penurunan dan momen lentur yang terjadi pada tiang masih terus meningkat pada spasi tiang 4D. Ketika spasi antar tiang melebihi 5D, nilai momen lentur dan deformasi tiang akan mencapai nilai maksimum untuk tiang tunggal dan tidak lagi terjadi perubahan nilai yang drastis. Secara praktis, tren data ini memperkuat kesimpulan (Benmebarek dkk., 2022) yang menetapkan  $S = 4D$  sebagai konfigurasi spasi optimum untuk stabilisasi lereng.

## KESIMPULAN

Analisis FEM telah dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi panjang, diameter, dan spasi antar tiang perkuatan lereng. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa:

- Tiang merupakan salah satu alternatif perkuatan lereng yang cukup efektif apabila perencanaan yang dilakukan mengoptimalkan parameter desain seperti lokasi penempatan tiang, dimensi dan konfigurasi spasi tiang untuk mencapai faktor keamanan yang ditargetkan.
- Panjang tiang menunjukkan pengaruh yang signifikan pada penelitian ini, dimana peningkatan faktor keamanan terjadi seiring dengan bertambahnya panjang tiang yang digunakan. Begitu juga dengan momen lentur yang bekerja pada tiang yang juga meningkat seiring dengan bertambahnya panjang tiang, berbanding terbalik dengan deformasi tiang yang cenderung menurun.
- Diameter tiang tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap faktor keamanan lereng pada penelitian ini. Pengaruh diameter tiang dapat terlihat signifikan pada deformasi dan momen lentur yang terjadi pada tiang.
- Bertambahnya spasi antar tiang cenderung menurunkan faktor keamanan lereng karena mekanisme *soil arching* yang terjadi melemah. Hal ini juga berdampak pada bertambahnya deformasi kepala tiang.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdelaziz, A., Hafez, D., & Hussein, A. (2017). The effect of pile parameters on the factor of safety of piled-slopes using 3D numerical analysis. *HBRC Journal*, 13(3), 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2015.06.002>

- Athmarajah, G., & De Silva, L. I. N. (2019). Analysis of Stability Enhancement of Soldier Pile Retaining Wall. *2019 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCOn)*, 644–650. <https://doi.org/10.1109/MERCOn.2019.8818934>
- Benmebarek, M. A., Benmebarek, S., Rad, M. M., & Ray, R. (2022). Pile optimization in slope stabilization by 2D and 3D numerical analyses. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(2), 211–224. <https://doi.org/10.1080/19386362.2021.1972628>
- Cai, F., & Ugai, K. (2000). Numerical Analysis of the Stability of a Slope Reinforced with Piles. *Soils and Foundations*, 40(1), 73–84. <https://doi.org/10.3208/sandf.40.73>
- Griffiths, D. V., & Marquez, R. M. (2007). Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements. *Géotechnique*, 57(6), 537–546. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.6.537>
- Gupta, P., & Mehndiratta, S. (2025). Exploring the Efficacy of Slope Stabilization Using Piles: A Comprehensive Review. *Indian Geotechnical Journal*, 55(5), 3442–3459. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-01119-w>
- Hajiazizi, M., Mazaheri, A., & Orense, R. P. (2017). Analytical approach to evaluate stability of pile-stabilized slope. *Scientia Iranica*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4218>
- Jose, D., Kolathayar, S., & Nayak, S. (2025). 3D Finite Element Analysis of Anti-slide Pile Performance for Slope Stabilization. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(2), 74. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-03043-5>
- Le Hello, B., & Villard, P. (2009). Embankments reinforced by piles and geosynthetics—Numerical and experimental studies dealing with the transfer of load on the soil embankment. *Engineering Geology*, 106(1–2), 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.03.001>
- Li, D.-Q., Xiao, T., Cao, Z.-J., Phoon, K.-K., & Zhou, C.-B. (2016). Efficient and consistent reliability analysis of soil slope stability using both limit equilibrium analysis and finite element analysis. *Applied Mathematical Modelling*, 40(9–10), 5216–5229. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.11.044>
- Poulos, H. G. (1995). Design of reinforcing piles to increase slope stability. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(5), 808–818. <https://doi.org/10.1139/t95-078>
- Schanz, T., Vermeer, P. A., & Bonnier, P. G. (2019). The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:17560153>
- Shi, G., Zhang, J., Lu, M., Liu, F., Guo, P., & Wang, C. (2024). Full Life Cycle Evaluation of Stability Pile in High Slope with Multi-Layer Weak Interlayers. *Applied Sciences*, 14(24), 12077. <https://doi.org/10.3390/app142412077>
- Slimane HACINI, Djamel BENMEDDOUR, & Mohamed BAHEDDI. (2025). Comparative Assessment of Mohr-Coulomb and Hardening Soil Models for Deep Excavation Design in Stratified Soils: Insights from Numerical and Field Data. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*, 11(4). <https://doi.org/10.22399/ijcesen.3967>
- Summersgill, F. C., Kontoe, S., & Potts, D. M. (2017). Stabilisation of excavated slopes in strain-softening materials with piles. *Géotechnique*, 1–14. <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.096>
- Wei, W. B., & Cheng, Y. M. (2009). Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles. *Computers and Geotechnics*, 36(7), 1176–1185. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.05.004>