

Analisis Stabilitas Lereng Tumpukan Gypsum Menggunakan Metode Hitungan Manual (Fellenius)

Aradhana Afif Taqwanto^{1*}, Akhmad Andi Saputra¹, Ikhtisholiah Ikhtisholiah¹, Dandy Nugroho¹

¹Universitas Gresik, Gresik, Indonesia

aradhanaafif664@gmail.com*

| Received: 05/07/2026 | Revised: 24/07/2026 | Accepted: 29/07/2026 |

Copyright©2026 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons

Abstrak

Kestabilan lereng pada tumpukan gypsum (*stockpile*) merupakan aspek penting dalam menjamin keselamatan kerja, keberlangsungan operasional, dan keamanan fasilitas di area industri. Karakteristik material gypsum yang memiliki berat volume relatif rendah serta nilai kohesi dan sudut geser tertentu menyebabkan stabilitas lereng sangat dipengaruhi oleh geometri timbunan dan sifat mekanik material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng tumpukan gypsum pada area penyimpanan PT X menggunakan metode Fellenius (*Ordinary Method of Slices*). Penelitian dilakukan menggunakan pendekatan kuantitatif melalui pengukuran geometri lereng di lapangan serta pengumpulan parameter geoteknik material dari data teknis perusahaan. Analisis dilakukan pada kondisi *drained* dengan asumsi bidang gelincir berbentuk lingkaran (*circular slip surface*) dan gaya antar irisan diabaikan sesuai asumsi dasar metode Fellenius. Bidang longsor dibagi menjadi tujuh irisan vertikal untuk menghitung gaya penahan dan gaya penggerak sehingga diperoleh nilai Faktor Keamanan (*Factor of Safety*). Hasil analisis menunjukkan nilai Faktor Keamanan sebesar **1,98**, yang mengindikasikan bahwa lereng berada pada kondisi stabil dan memenuhi kriteria kestabilan lereng permanen. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kombinasi geometri lereng dan parameter kuat geser material masih mampu memberikan tahanan geser yang lebih besar dibandingkan dengan gaya penggerak. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa evaluasi stabilitas *stockpile* gypsum menggunakan metode Fellenius secara manual pada kondisi *drained*, sehingga dapat menjadi referensi awal dalam penilaian kestabilan lereng material gypsum di lingkungan industri serta sebagai dasar pengembangan analisis menggunakan metode keseimbangan batas lainnya.

Kata kunci: faktor keamanan, metode fellenius, phosphogypsum, stabilitas lereng

Abstract

The stability of gypsum stockpile slopes is critical to ensuring occupational safety, operational continuity, and the security of industrial facilities. The stability of gypsum stockpiles is governed by the slope geometry and the geotechnical properties of the material, particularly its unit weight, cohesion, and internal friction angle. This study aims to evaluate the stability of a gypsum stockpile slope at PT X's storage area using the Fellenius method (Ordinary Method of Slices). A quantitative approach was employed through field measurements of slope geometry and the collection of geotechnical parameters from the company's technical data. The analysis was performed under drained conditions by assuming a circular slip surface and neglecting interslice forces in accordance with the fundamental

assumptions of the Fellenius method. The potential sliding mass was divided into seven vertical slices to determine the ratio between resisting and driving forces, from which the Factor of Safety (FoS) was calculated. The analysis yielded a Factor of Safety of 1.98, indicating that the gypsum stockpile slope is stable and meets the accepted slope-stability criteria. The results demonstrate that the combination of slope geometry and the shear strength parameters of the gypsum material provides sufficient resistance to overcome the driving forces acting along the potential failure surface. This study contributes to the application of the manual Fellenius method for evaluating the stability of gypsum stockpiles under drained conditions and provides a preliminary reference for assessing the slope stability of gypsum stockpiles in industrial environments, as well as for future studies employing other limit equilibrium methods.

Keywords: factor of safety, Fellenius method, gypsum stockpile, slope stability

Pendahuluan

Stabilitas lereng merupakan salah satu aspek penting dalam rekayasa geoteknik karena berkaitan langsung dengan keselamatan konstruksi, keberlangsungan operasional, serta perlindungan lingkungan di sekitarnya. Ketidakstabilan lereng dapat menyebabkan kelongsoran yang berpotensi menimbulkan kerugian material, gangguan operasional, bahkan risiko terhadap keselamatan pekerja. Oleh karena itu, analisis stabilitas lereng menjadi tahapan penting dalam perencanaan maupun evaluasi berbagai jenis lereng alami maupun lereng buatan, seperti timbunan (*embankment*), bendungan urugan, area penambangan terbuka, dan *stockpile* material industri. Salah satu pendekatan yang paling banyak digunakan dalam analisis stabilitas lereng adalah *Limit Equilibrium Method* (LEM) karena mampu memperkirakan kondisi keseimbangan massa tanah berdasarkan hubungan antara gaya penahan dan gaya penggerak pada bidang longsor yang berpotensi terjadi. Metode ini berkembang menjadi beberapa formulasi seperti Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, dan Morgenstern-Price yang memiliki asumsi berbeda terhadap gaya antar irisan dan keseimbangan momen.

Berbeda dengan lereng tanah alami, lereng *stockpile* merupakan lereng buatan yang dibentuk melalui proses penimbunan material sehingga karakteristik kestabilannya sangat dipengaruhi oleh sifat fisik material yang ditimbun, metode penumpukan, geometri lereng, serta kondisi lingkungan selama penyimpanan. Salah satu material yang banyak disimpan dalam bentuk *stockpile* adalah gypsum. Material ini memiliki karakteristik geoteknik yang berbeda dari tanah alami karena tersusun dari partikel halus dengan nilai berat volume, kohesi, dan sudut geser dalam yang dipengaruhi oleh kadar air serta proses pembentukan timbunan. Perubahan geometri lereng maupun perubahan sifat mekanik material dapat memengaruhi besarnya gaya penahan dan gaya penggerak sehingga berpengaruh terhadap nilai Faktor Keamanan (*Factor of Safety*).

Berbagai penelitian telah menerapkan *Limit Equilibrium Method* untuk mengevaluasi stabilitas lereng, baik menggunakan metode Fellenius maupun metode lainnya. Penelitian (Aji et al., 2022) menunjukkan bahwa metode Fellenius dan Bishop menghasilkan Faktor Keamanan yang relatif berbeda akibat perbedaan asumsi dalam memperhitungkan keseimbangan gaya pada setiap irisan. (Aryani, Putri; Intan, 2023) Mengombinasikan metode Fellenius dengan perangkat lunak *Rocscience Slide* untuk mengevaluasi kestabilan lereng, menunjukkan bahwa analisis numerik mampu mempermudah identifikasi bidang longsor yang kritis. Sementara itu, (Firdaus et al., 2022) dan (Ismiradiana et al., 2021) menggunakan metode Fellenius untuk menganalisis stabilitas lereng pada proyek infrastruktur dan menunjukkan bahwa geometri lereng, berat

volume, kohesi, serta sudut geser dalam merupakan parameter dominan yang memengaruhi nilai Faktor Keamanan. Di sisi lain, penelitian (Malkawi et al., 2022) mengenai stabilitas *stockpile phosphogypsum* menegaskan bahwa karakteristik material gypsum dan perubahan kondisi hidrologi menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam evaluasi kestabilan lereng.

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah memberikan kontribusi terhadap pengembangan analisis stabilitas lereng, sebagian besar penelitian masih berfokus pada lereng tanah alami, lereng timbunan umum, maupun analisis menggunakan perangkat lunak geoteknik. Penelitian mengenai stabilitas lereng *stockpile gypsum* di lingkungan industri di Indonesia masih relatif terbatas, khususnya yang menggunakan perhitungan manual metode Fellenius sebagai dasar evaluasi stabilitas. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu lebih menitikberatkan pada perbandingan metode analisis, sedangkan kajian mengenai hubungan antara karakteristik geometri *stockpile*, parameter geoteknik material gypsum, dan kondisi aktual lereng melalui observasi lapangan masih belum banyak dilaporkan.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) berupa masih terbatasnya kajian mengenai penerapan metode Fellenius secara manual dalam analisis stabilitas lereng *stockpile gypsum* di lingkungan industri, dengan menggunakan data geometri aktual dan parameter geoteknik material sebagai dasar evaluasi. Padahal, pendekatan tersebut penting untuk memberikan gambaran awal mengenai tingkat keamanan lereng tanpa memerlukan perangkat lunak khusus sehingga lebih mudah diterapkan sebagai bagian dari evaluasi teknis di lapangan.

Berdasarkan *research gap* tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan metode Fellenius secara manual untuk mengevaluasi stabilitas lereng *stockpile gypsum* pada kondisi *drained*, menggunakan data geometri aktual hasil pengukuran lapangan serta parameter geoteknik material yang berasal dari data teknis perusahaan. Selain menghasilkan nilai Faktor Keamanan, penelitian ini juga mengaitkan hasil analisis dengan kondisi visual lereng di lapangan sebagai bentuk verifikasi terhadap hasil perhitungan teoritis.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng *stockpile gypsum* pada area penyimpanan PT X menggunakan metode Fellenius guna memperoleh nilai Faktor Keamanan serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan teori stabilitas lereng dan hasil penelitian terdahulu.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada area penyimpanan (*stockpile*) gypsum PT X yang berlokasi di Kabupaten Gresik, Jawa Timur. Objek penelitian ini berupa lereng timbunan gypsum yang digunakan sebagai area penyimpanan material sebelum proses distribusi. Lokasi penelitian dipilih karena merupakan area penyimpanan utama dengan geometri lereng yang representatif untuk dilakukan analisis stabilitas. Pengambilan data lapangan dilakukan pada periode Januari hingga Mei 2026. Selama proses pengambilan data, kondisi lereng berada pada kondisi operasional normal dan tidak menunjukkan indikasi kelongsoran aktif.



Gambar 1. Area Penyimpanan *Stockpile* Gypsum PT X

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif, yaitu melalui pengumpulan data geometri lereng dan parameter geoteknik material untuk dianalisis menggunakan metode Fellenius. Pendekatan ini bertujuan untuk memperoleh nilai FK berdasarkan kondisi aktual lereng tanpa melakukan simulasi numerik maupun pengujian terhadap metode analisis lainnya. Adapun tahap penelitian meliputi identifikasi objek penelitian, pengumpulan data primer dan sekunder, penyusunan model geometri lereng, penentuan bidang gelincir potensial, pembagian lereng menjadi tujuh irisan, perhitungan faktor keamanan menggunakan metode Fellenius, serta interpretasi hasil berdasarkan teori dan penelitian terdahulu.

Adapun sumber data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Data primer, yang diperoleh melalui observasi lapangan dan pengukuran langsung terhadap geometri lereng *stockpile*, meliputi tinggi lereng, lebar lereng, kemiringan lereng, kondisi permukaan lereng
- Data sekunder, yang diperoleh dari dokumen teknis perusahaan meliputi berat volume, kohesi, dan sudut geser dalam.

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahapan, meliputi:

- Observasi lapangan untuk mengidentifikasi kondisi aktual lereng *stockpile* gypsum
- Pengukuran geometri lereng, meliputi tinggi, lebar, dan kemiringan lereng menggunakan alat ukur lapangan
- Studi dokumentasi, yaitu mengumpulkan data geoteknik material gypsum yang dimiliki perusahaan, dan
- Studi literatur, yaitu mengkaji teori stabilitas lereng, metode fellenius, serta penelitian terdahulu yang relevan

Analisis stabilitas lereng dilakukan berdasarkan beberapa asumsi agar proses perhitungan sesuai dengan prinsip dasar metode Fellenius. Asumsi tersebut antara lain: kondisi material diasumsikan drained; tidak terdapat muka air tanah yang memotong bidang gelincir; tekanan air pori diabaikan; bidang gelincir diasumsikan berbentuk lingkaran (circular slip surface); gaya antarsisian diabaikan sesuai asumsi metode Fellenius.

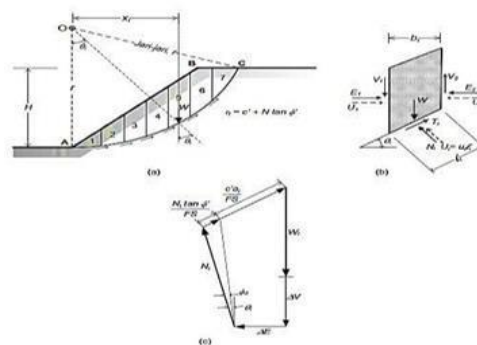
Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode fellenius, yaitu salah satu metode dalam *Limit Equilibrium Method* yang menghitung faktor keamanan berdasarkan keseimbangan antara gaya penahan dan gaya penggerak pada bidang longsor potensial. Stabilitas lereng sangat dipengaruhi oleh kekuatan geser tanah, yang menentukan kemampuan tanah dalam

menahan tekanan akibat keruntuhan. Dikutip oleh Firdaus et al. (2022) dalam Terzaghi (n.d.), penyebab longsor di suatu lereng dapat dibagi menjadi dua, antara lain akibat pengaruh dalam, di mana longsor terjadi tanpa adanya perubahan kondisi luar, dan akibat pengaruh luar, di mana terdapat pengaruh yang menyebabkan bertambahnya gaya geser tanpa adanya perubahan kuat geser tanah. Dikutip dari Teori Bowles bahwa keruntuhan lereng dibagi menjadi tiga kelompok rentang faktor keamanan (FK) yang dapat ditinjau dari intensitas kelongsoran yang ditampilkan pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Hubungan Nilai Faktor Keamanan dan Intensitas Longsor

Faktor Keamanan	Intensitas Longsor
$FK < 1,07$	Longsor sering terjadi (lereng labil)
$1,07 \leq FK \leq 1,25$	Longsor pernah terjadi (lereng kritis)
$FK > 1,25$	Longsor jarang terjadi (lereng relatif stabil)

Metode Fellenius (*Ordinary Method of Slice*) pertama kali diperkenalkan oleh Wolmar Fellenius pada tahun 1927 merupakan metode paling sederhana dalam metode irisan. Fellenius mengasumsikan bahwa keruntuhan terjadi melalui rotasi suatu blok tanah pada permukaan longsor berbentuk lingkaran (sirkular), dengan titik O sebagai pusat rotasi. Konsep ini menganggap gaya-gaya yang bekerja pada bagian kanan-kiri irisan mempunyai resultan nol pada arah tegak lurus terhadap bidang longsor.



Gambar 2. Gaya yang Bekerja Pada Metode Fellenius

Dikutip dari (Firdaus et al., 2022), metode ini juga menganggap bahwa gaya normal P bekerja di tengah-tengah *slice*. Diasumsikan juga bahwa resultan gaya antarsisian pada tiap irisan adalah nol, atau dengan kata lain, bahwa resultan gaya-gaya antarsisian diabaikan. Persamaan keseimbangan momen untuk seluruh irisan terhadap titik pusat rotasi dan diperoleh suatu nilai faktor keamanan, maka keseimbangan arah vertikal dan gaya-gaya yang bekerja adalah sebagai berikut:

1. Pada lereng yang tidak dipengaruhi oleh muka air tanah, maka nilai FK menjadi:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{j=n} ca_i + (W_i \cos \theta_i \tan \phi)}{\sum_{i=1}^{j=n} W_i \sin \theta_i}$$

2. Pada lereng yang dipengaruhi oleh tekanan air pori, maka persamaan nilai FK menjadi:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} ca_i + (W_i \cos \theta_i - u_i a_i) \operatorname{tg} \varphi}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \sin \theta_i}$$

Keterangan:

F = faktor keamanan n = jumlah irisan

c = kohesi (kN/m²)

φ = sudut geser dalam tanah (°)

α_i = panjang lengkung irisan ke-i (m) W_i = berat irisan tanah ke-i (kN)

u_i = tekanan air pori ke-i (kN)

θ_i = sudut antara jari-jari lengkung dengan garis kerja massa tanah

Bidang gelincir pada penelitian ini diasumsikan berbentuk lingkaran (*circular slip surface*), sesuai dengan asumsi dasar metode Fellenius. Pusat lingkaran ditentukan melalui pendekatan geometrik sehingga bidang gelincir menghubungkan mahkota lereng (*crest*) dengan kaki lereng (*toe*) dan merepresentasikan bidang longsor potensial berdasarkan kondisi geometri aktual. Massa longsor kemudian dibagi menjadi tujuh irisan vertikal. Pemilihan jumlah tujuh irisan didasarkan pada pertimbangan bahwa jumlah tersebut mampu merepresentasikan perubahan geometri lereng secara memadai, sekaligus menjaga proses perhitungan manual tetap efisien dan sistematis. Jumlah irisan yang terlalu sedikit berpotensi mengurangi ketelitian representasi geometri, sedangkan jumlah irisan yang terlalu banyak meningkatkan kompleksitas perhitungan tanpa memberikan peningkatan ketelitian yang signifikan untuk penelitian ini.

Hasil dan Pembahasan

Sebelum dilakukan analisis stabilitas lereng, terlebih dahulu dilakukan identifikasi terhadap karakteristik geometri dan parameter geoteknik material gypsum yang digunakan sebagai data masukan dalam perhitungan metode Fellenius. Parameter tersebut meliputi tinggi lereng, lebar dasar, kemiringan lereng, berat volume (γ), kohesi (c), dan sudut geser dalam (φ).

Tabel 2. Parameter Geoteknik Material Gypsum

Parameter	Nilai	Satuan
Tinggi lereng	12	m
Lebar dasar	35	m
Berat volume (γ)	16,48	kN/m ³
Kohesi (c)	9,81	kN/m ²
Sudut geser dalam (φ)	28°	

Sumber: Data Olahan Pribadi, 2026

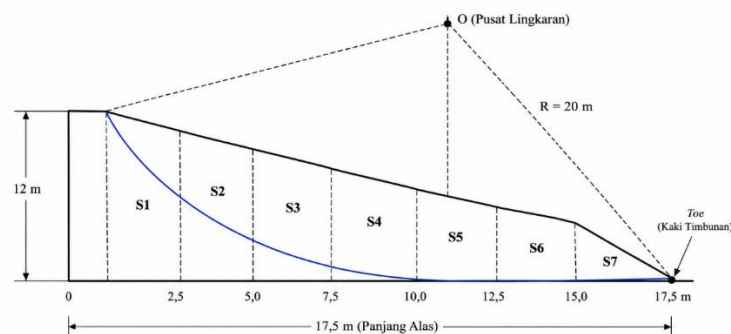
Berdasarkan Tabel 2, material gypsum memiliki berat volume sebesar 16,48 kN/m³ yang relatif lebih rendah dibandingkan beberapa material timbunan mineral. Nilai kohesi sebesar 9,81

kPa menunjukkan bahwa material masih memiliki ikatan antarpartikel yang berkontribusi terhadap peningkatan tahanan geser. Selain itu, sudut geser dalam sebesar 28° menunjukkan kemampuan material dalam menahan deformasi akibat gaya geser. Kombinasi ketiga parameter tersebut berpengaruh langsung terhadap besarnya gaya penahan yang dihitung menggunakan metode Fellenius.



Gambar 3. Dokumentasi Pengukuran Lereng Gypsum

Berdasarkan geometri lereng yang telah diperoleh, selanjutnya dilakukan penentuan bidang gelincir potensial dengan asumsi bidang longsor berbentuk lingkaran (circular slip surface), sesuai dengan prinsip dasar metode Fellenius. Bidang gelincir dipilih sehingga menghubungkan mahkota lereng (*crest*) dan kaki lereng (*toe*) sebagai representasi mekanisme longsor rotasional yang paling mungkin terjadi pada lereng timbunan.



Gambar 4. Ilustrasi Pembagian Irisan Lereng Gypsum

Lereng gypsum dibagi menjadi tujuh irisan vertikal agar perubahan geometri lereng dapat direpresentasikan dengan baik tanpa menimbulkan kompleksitas perhitungan yang berlebihan. Selain itu, secara teoritis jika semakin banyak jumlah irisan yang digunakan, maka representasi bentuk bidang gelincir akan semakin mendekati kondisi sebenarnya, sehingga hasil analisis menjadi lebih teliti dan akurat. Namun, peningkatan jumlah irisan yang terlalu banyak akan membuat proses perhitungan menjadi lebih kompleks, tetapi peningkatan akurasinya relatif lebih kecil. Bidang longsor diasumsikan berbentuk busur lingkaran (*circular slip surface*) dengan jari-jari $R = 28 \text{ m}$ dan pusat lingkaran (O) berada di belakang kaki lereng. Adapun pembagian irisan tersebut akan disajikan dalam tabel 3 di bawah ini:

Tabel 3. Pembagian Irisan Lereng

<i>Slice</i>	Batas Kiri (m)	Batas Kanan (m)	Lebar (m)	Titik Tengah
S1	0,0	2,5	2,5	1,25
S2	2,5	5,0	2,5	3,75
S3	5,0	7,5	2,5	6,25
S4	7,5	10,0	2,5	8,75
S5	10,0	12,5	2,5	11,25
S7	12,5	15,0	2,5	13,75
S7	15,0	17,5	2,5	16,25

Sumber: Data Olahan Pribadi, 2026

Titik tengah setiap irisan ditentukan berdasarkan rata-rata posisi batas kiri dan batas kanan irisan tersebut. Titik tengah ini digunakan sebagai titik representatif untuk menentukan koordinat bidang longsor, sudut dasar irisan (α), luas irisan, serta berat masing-masing irisan. Berdasarkan geometri lereng dan parameter geoteknik yang telah ditentukan, dilakukan perhitungan faktor keamanan menggunakan metode Fellenius. Perhitungan dilakukan terhadap tujuh irisan vertikal dengan mempertimbangkan berat masing-masing irisan, panjang bidang gelincir, kohesi, sudut geser dalam, dan sudut dasar irisan. Hal ini menjadi dasar untuk menentukan koordinat bidang longsor dan sudut dasar irisan dalam analisis Fellenius.

Tabel 4. Perhitungan Parameter Fellenius

<i>Slice (i)</i>	Lebar b_i (m)	Sudut α_i (°)	Panjang L_i (m)	Luas A_i (m ²)	Berat W_i (kN)	$W_i \cdot \sin \alpha_i$ (kN)	$W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi$ (kN)
S1	2,5	11,5°	2,55	24,10	397,17	79,18	185,73
S2	2,5	16,8°	2,61	18,50	304,88	88,12	155,20
S3	2,5	22,2°	2,70	13,25	218,36	82,51	107,43
S4	2,5	27,8°	2,83	8,60	141,73	66,10	66,66
S5	2,5	33,5°	3,00	4,80	79,10	43,66	35,04
S6	2,5	39,6°	3,24	2,10	34,61	22,06	14,16
S7	2,5	46,2°	3,61	0,55	9,06	6,54	3,33
Σ	—	—	20,54	—	—	388,17	567,55

Perhitungan stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode Fellenius dengan membagi lereng menjadi 7 irisan vertikal. Pada setiap irisan dihitung luas, berat, sudut dasar bidang gelincir, gaya normal, serta komponen gaya geser yang bekerja pada irisan tersebut. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total gaya penahan lebih besar daripada total gaya penggerak, sehingga diperoleh nilai faktor keamanan (FK) sebesar 1,98. Berikut merupakan hasil kalkulasi dengan menggunakan metode fellenius :

$$\sum (c \cdot L_i) = 9,81 \text{ kN/m}^2 \times 20,54 \text{ m} \\ = 201,50 \text{ kN}$$

$$FK = \frac{\sum (c \cdot L_i) + \sum (W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi)}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \\ FK = \frac{201,50 + 567,55}{388,17} \\ FK = \frac{769,05}{388,17} = 1,98$$

Berdasarkan hasil kalkulasi menggunakan metode Fellenius, diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) sebesar 1,98. Hasil FK sebesar 1,98 menunjukkan bahwa gaya penahan yang bekerja sepanjang bidang gelincir masih lebih besar daripada gaya penggerak. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa lereng *stockpile* gypsum berada dalam kondisi stabil berdasarkan asumsi yang digunakan, yaitu kondisi *drained* tanpa pengaruh tekanan air pori maupun beban eksternal. Merujuk pada standar Bowles yang dikutip oleh Firdaus et al. (2022), suatu lereng dinyatakan aman dan relatif stabil apabila memiliki nilai $FK > 1,25$. Hasil perhitungan menggunakan metode Fellenius sebesar 1,98 mengindikasikan bahwa lereng *stockpile* gypsum berada dalam kondisi stabil.

Adapun nilai FK dipengaruhi oleh beberapa parameter geoteknik, seperti kohesi, sudut geser dalam, berat volume, dan geometri. Kohesi merupakan komponen kuat geser yang memberikan kontribusi langsung terhadap tahanan geser sepanjang bidang gelincir. Berdasarkan persamaan Mohr-Coulomb, peningkatan kohesi akan meningkatkan gaya penahan sehingga menghasilkan nilai Faktor Keamanan yang lebih besar. Sebaliknya, penurunan kohesi menyebabkan berkurangnya tahanan geser dan meningkatnya potensi kelongsoran. Sudut geser memengaruhi besarnya komponen gesekan antarpartikel. Nilai ϕ yang lebih besar meningkatkan kontribusi komponen $\sigma \tan \phi$ sehingga gaya penahan bertambah. Berat volume memengaruhi berat setiap irisan, jika semakin besar berat volume maka gaya penggerak meningkat sehingga nilai Faktor Keamanan cenderung menurun. Pengaruh terakhir adalah geometri, bahwa tinggi lereng adalah parameter geometri yang paling dominan memengaruhi kestabilan karena peningkatan tinggi menyebabkan bertambah berat massa longsor dan momen penggerak.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Ismiradiana et al., 2021) pada proyek JLS Lot 6 Trenggalek – Tulungagung yang memperoleh nilai FK dengan menggunakan metode fellenius sebesar 1,63 dan dikategorikan stabil. Apabila dibandingkan dengan penelitian ini, terdapat kesamaan bahwa kestabilan lereng tidak hanya dipengaruhi oleh parameter kuat geser material, tetapi juga oleh karakteristik geometri lereng yang dianalisis. Hal ini juga menunjukkan bahwa tinggi atau kemiringan timbunan gypsum memengaruhi besarnya gaya penggerak dan menjadi penentu tingkat kestabilan lereng. Oleh karena itu, penelitian ini menunjukkan kesamaan bukti bahwa faktor geometri lereng merupakan salah satu variabel dominan dalam analisis stabilitas lereng menggunakan metode Fellenius.

Hasil penelitian ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Risyaanda, Rio, et al., 2021) yang dianalisis menggunakan metode Fellenius. Penelitian tersebut memperoleh nilai faktor keamanan sebesar 1,31 pada *single slope* dan 1,23 pada *overall slope*, sehingga lereng

tambang tersebut masih berada dalam kondisi aman. Perbedaan nilai FK antara penelitian ini dan penelitian yang dilakukan oleh Risyanda, Rio, et al. (2021) adalah perbedaan geometri lereng dan karakteristik material. Penelitian yang dilakukan oleh Risyanda, Rio, et al. (2021) memiliki geometri jenjang tambang dan parameter tanah yang berbeda dari timbunan gypsum. Menurut teori stabilitas lereng, semakin besar tinggi timbunan, berat massa longsor yang bekerja pada bidang gelincir akan semakin besar sehingga berpotensi menurunkan faktor keamanan apabila tidak diimbangi dengan peningkatan kuat geser material. Adapun kesamaan hasil penelitian ini adalah bahwa penelitian ini sama-sama menunjukkan bahwa geometri lereng dan parameter kuat geser material merupakan faktor dominan yang dapat memengaruhi kestabilan lereng.

Hasil penelitian ini tidak sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Aji et al. (2022b) yang memperoleh nilai FK sebesar 0,7296 dengan menggunakan metode Fellenius, sehingga lereng dikategorikan labil dan berpotensi mengalami longsor. Perbedaan hasil antara penelitian ini terdapat pada perbedaan karakteristik material dan parameter kuat geser tanah. Pada penelitian (Aji et al., 2022b), nilai kohesi sebesar 0,117 kg/cm² dan sudut geser dalam sebesar 25,8°. Meskipun nilai kohesi sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian ini, sudut geser pada material yang digunakan dalam penelitian ini mencapai 28°, sehingga memberikan kontribusi terhadap tahanan geser yang lebih besar pada bidang longsor. Teori Mohr – Coulomb yang dikutip dari (Aji et al., 2022) menyatakan bahwa peningkatan sudut geser dalam akan meningkatkan komponen tahanan geser sebesar $N \tan \phi$, yang merupakan salah satu komponen utama gaya penahan pada metode Fellenius.

Selain itu, perbedaan hasil penelitian juga dipengaruhi oleh geometri lereng yang berbeda. Pada penelitian ini, timbunan gypsum memiliki kemiringan sekitar 34,4°, sehingga secara teoritis menghasilkan gaya penggerak yang lebih kecil dibandingkan dengan lereng pada penelitian tersebut dan menyebabkan nilai faktor keamanan berada di atas batas aman. Teori keseimbangan batas (*limit equilibrium*) menyatakan bahwa faktor keamanan dipengaruhi oleh rasio antara total gaya penahan dan total gaya penggerak. Apabila lereng memiliki sudut yang lebih curam, akan meningkatkan komponen gaya berat yang bekerja sejajar dengan bidang longsor, sehingga nilai FK-nya cenderung menurun. Sebaliknya, lereng yang lebih landai akan mengurangi gaya penggerak dan meningkatkan kestabilan lereng. Oleh karena itu, meskipun kedua penelitian ini menggunakan metode yang sama, perbedaan geometri lereng dan karakteristik material menyebabkan hasil faktor keamanan yang diperoleh berbeda.

Berdasarkan kriteria stabilitas lereng menurut teori Bowles, nilai FK dengan hasil >1,25 dikategorikan sebagai kondisi sangat aman dan relatif stabil. Hasil ini tervalidasi secara empiris di lapangan melalui observasi visual yang menunjukkan tidak adanya rekahan tarik pada *crest* maupun indikasi amblas pada *toe* lereng. Karakteristik kegagalan lereng tipe *circular failure* pada umumnya didahului oleh munculnya retakan tarik pada area puncak (*crest*) atau gejala penggembungan material akibat dorongan massa tanah di area kaki lereng. Ketidakhadiran gejala visual tersebut menjadi bukti yang valid bahwa hasil analisis kuantitatif dengan nilai FK = 1,98 merepresentasikan kondisi nyata yang aman dan bebas dari kondisi kritis di lapangan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Analisis dilakukan menggunakan metode Fellenius dengan asumsi bidang gelincir berbentuk lingkaran dan kondisi *drained*, sehingga pengaruh muka air tanah, tekanan air pori, beban gempa, serta perubahan kondisi akibat curah hujan belum dipertimbangkan. Selain itu, penelitian ini tidak membandingkan hasil perhitungan

dengan metode keseimbangan batas lainnya maupun analisis numerik, sehingga interpretasi hasil dibatasi oleh asumsi dan ruang lingkup penelitian ini.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis stabilitas lereng tumpukan gypsum menggunakan metode Fellenius pada area *stockpile* PT X, maka dapat disimpulkan bahwa karakteristik geometri dan sifat mekanik material gypsum berpengaruh terhadap kestabilan lereng *stockpile*. Kombinasi tinggi lereng, kemiringan lereng, berat volume, kohesi, dan sudut geser menentukan besarnya gaya penggerak maupun gaya penahan pada bidang gelincir. Pada kondisi penelitian, parameter geoteknik material masih mampu memberikan tahanan geser yang lebih besar dibandingkan dengan gaya penggerak sehingga lereng berada pada kondisi stabil.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *stockpile* gypsum memiliki tinggi lereng 12 m, lebar dasar 35 m, serta karakteristik geoteknik berupa berat volume sebesar 16,48 kN/m³, kohesi 9,81 kPa, dan sudut geser dalam sebesar 28°. Kombinasi geometri dan parameter mekanik tersebut memberikan kontribusi terhadap besarnya gaya penahan dan gaya penggerak yang menentukan tingkat kestabilan lereng.

Nilai Faktor Keamanan yang diperoleh sebesar 1,98 menunjukkan bahwa lereng *stockpile* gypsum berada pada kondisi stabil untuk asumsi analisis yang digunakan, yaitu kondisi *drained* tanpa pengaruh muka air tanah dan tekanan air pori. Hasil ini menunjukkan bahwa tahanan geser material masih lebih besar dibandingkan dengan gaya penggerak pada bidang gelincir, sehingga lereng memenuhi kriteria kestabilan untuk kondisi yang dianalisis.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Fellenius dapat digunakan sebagai pendekatan awal untuk mengevaluasi stabilitas lereng *stockpile* gypsum melalui perhitungan manual berdasarkan data geometri aktual dan parameter geoteknik material. Kontribusi penelitian ini terletak pada penyediaan evaluasi awal kestabilan lereng *stockpile* gypsum di lingkungan industri yang dapat digunakan sebagai dasar pertimbangan dalam kegiatan pemantauan kondisi lereng serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan menggunakan metode keseimbangan batas maupun analisis numerik.

Daftar Pustaka

- Aji, B., Syah, A., & Zakaria, A. (2022). *Studi Analisis Stabilitas Lereng Tanah Timbunan Menggunakan Metode Fellenius dan Bishop Serta Penanggulangannya (Studi Kasus : Perumahan Citraland Bandar Lampung)*. 10(2), 347–358.
- Aryani, P.; Intan, N. (2023). *Analisis Stabilitas Lereng di Daerah Gunungpati Menggunakan Metode Fellenius dan Software Rocscience Slide*.
- Das, B. (1995). *Mekanika Tanah: Rekayasa Geoteknis, Jilid I*.
- Firdaus, Y., Sarie, F., & Hendri, O. (2022). *Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Metode Fellenius Studi Kasus: Proyek Pekerjaan Drainase Gedung PPIIG di Universitas Palangka Palangkaraya*. 5(2), 1–9.
- Hariyadi, S. (2016). *Kajian Stabilitas Lereng Timbunan Pada PT Kayan Kaltara Coal Job Site PT Nata Energi Resources Kabupaten Bulungan Provinsi Kalimantan Utara*. 40–53.

- Ismiradiana, N., Sholeh, M., & Suryadi, A. (2021). *Analisis Stabilitas Lereng Metode Fellenius Pada Proyek JLS. 2*, 163–167.
- Malkawi, D. A. H., Malkawi, A. I. H., & Bani-hani, K. A. (2022). *Slope Stability Analysis for the Phosphogypsum Stockpiles : A Case Study for the Sustainable Management of the Phosphogypsum Stacks in Aqaba Jordan*.
- Pakiding, Y., Putra, W. D., & Sande, M. (2023). *Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Metode Fellenius Dan Metode Rankine Studi Kasus : Jln Poros Salu- Dende ' Lembang Salu Sarre Kecamatan Sopai. 05(04)*, 17745–17753.
- Panjaitan, A., Sompie, O. B. A., Mandagi, A. T., Teknik, F., Sipil, J., Sam, U., & Manado, R. (2020). *Analisis Perhitungan Stabilitas Lereng Metode Fellenius Menggunakan Program PHP. 8(3)*, 417–422.
- Raza, A. (2023). *Stability Analysis of Slope Road Embankment with Geotextile Reinforcement Using the Finite Element Method*.