

Evaluasi Jenjang Tumpukan Bijih Nikel Pada Stockyard Menggunakan Pendekatan Kestabilan Lereng di PT ANTAM Tbk. UBPB Kolaka

Ambar Sari ^{*1}, Siti Aminah ^{*2}, Haeruddin ^{*3}, Fachruzzaki ^{*4}, Januar Fery Irawan ^{*5}

Submit:
30 Juli 2026

Review:
18 Agustus 2026

Revised:
10 September
2026

Published:
21 September
2026

^{*1}Mahasiswa Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia, ambarrsari01@gmail.com

^{*2}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia, siti.aminah@unej.ac.id

^{*3}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia, haeruddin@unej.ac.id

^{*4}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia, zakiunej@unej.ac.id

^{*5}Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia, januar.teknik@unej.ac.id

^aCorresponding Author: ambarrsari01@gmail.com

Abstrak

PT ANTAM Tbk. UBPB Kolaka melakukan penimbunan bijih nikel pada area *stockyard* dengan geometri tumpukan yang beragam. Perbedaan geometri tersebut dapat memengaruhi kestabilan lereng dan berpotensi menimbulkan longsoran yang berdampak pada keselamatan kerja serta kegiatan operasional. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi terhadap geometri tumpukan untuk mengetahui tingkat kestabilan dan menentukan desain yang aman digunakan. Penelitian dilakukan pada 15 tumpukan *Stockyard* Domestik Pomalaa (SDP) dan 15 tumpukan *Stockyard* Transito Pabrik (TRP). Analisis kestabilan lereng menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) melalui pendekatan *Bishop* dan *Fellenius* berdasarkan kriteria Faktor Keamanan (FK) $\geq 1,1$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa geometri aktual tumpukan bijih nikel memiliki variasi tinggi 3,93–21,39 m, sudut lereng depan $14,23^{\circ}$ – $49,54^{\circ}$, dan sudut lereng belakang $34,18^{\circ}$ – $87,99^{\circ}$. Sebagian besar tumpukan berada dalam kondisi stabil dengan nilai FK $\geq 1,1$. Nilai FK tertinggi diperoleh pada SDP2 sebesar 6,168 menggunakan *Bishop* dan 6,022 menggunakan *Fellenius*, sedangkan nilai FK terendah diperoleh pada TRP14 sebesar 1,068 menggunakan *Bishop* dan 1,057 menggunakan *Fellenius*. *Bishop* menghasilkan nilai FK lebih tinggi dibandingkan *Fellenius* dengan rata-rata selisih 2,3%. Modifikasi geometri tumpukan meningkatkan kestabilan lereng, dengan desain yang direkomendasikan pada TRP3 yang menghasilkan FK sebesar 1,20.

Kata kunci: *stockyard*, bijih nikel, kestabilan lereng, *Limit Equilibrium Method*

Abstract

PT ANTAM Tbk. UBPB Kolaka stores nickel ore in stockyards with varying pile geometries. Differences in pile geometry may affect slope stability and increase the risk of landslides that could disrupt safety and operational activities. This study evaluates the stability of nickel ore piles and recommends a safe pile design. The study was conducted on 15 piles at the Pomalaa Domestic Stockyard (SDP) and 15 piles at the Plant Transit Stockyard (TRP). Slope stability was analyzed using the *Limit Equilibrium Method* (LEM) with the *Bishop* and *Fellenius* methods, using a Safety

Factor (FoS) criterion of ≥ 1.1 . The results show that the actual pile heights range from 3.93 to 21.39 m, with front slope angles of 14.23° – 49.54° and rear slope angles of 34.18° – 87.99° . Most piles meet the stability criterion with $FoS \geq 1.1$. SDP2 has the highest FoS, with values of 6.168 using Bishop and 6.022 using Fellenius, while TRP14 has the lowest FoS, with values of 1.068 and 1.057, respectively. Bishop produces FoS values approximately 2.3% higher than Fellenius. Geometry modifications improve pile stability while maintaining storage capacity. The TRP3 design is recommended as one of the stable alternatives with an FoS of 1.20.

Keywords: *stockyard, nickel ore, slope stability, Limit Equilibrium Method.*

PENDAHULUAN

PT ANTAM Tbk. UBPB Kolaka merupakan perusahaan pertambangan nikel yang menggunakan stockyard sebagai area penimbunan sementara bijih nikel sebelum diproses lebih lanjut atau dikirim kepada konsumen. *Stockyard* berfungsi sebagai tempat penyimpanan material hasil tambang yang ditumpuk untuk diolah, dipasarkan, atau dimanfaatkan sesuai kebutuhan operasional [1]. Dalam kegiatan penimbunan tersebut, geometri tumpukan bijih nikel yang terbentuk dapat bervariasi sesuai dengan kapasitas material yang ditimbun dan metode penumpukan yang digunakan. Variasi geometri tersebut perlu mendapat perhatian karena berpengaruh terhadap kestabilan lereng tumpukan dan berpotensi menimbulkan longsoran yang dapat mengganggu keselamatan kerja maupun kelancaran operasional perusahaan [2].

Geometri tumpukan merupakan bentuk atau susunan material yang dicirikan oleh tinggi tumpukan, lebar jenjang, dan sudut kemiringan lereng. Semakin besar volume material yang ditimbun, maka geometri tumpukan yang terbentuk cenderung semakin besar sehingga dapat meningkatkan beban yang bekerja pada lereng. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan kestabilan lereng apabila tidak didukung oleh karakteristik material dan desain geometri yang sesuai [3]. Selain faktor geometri, kestabilan lereng juga dipengaruhi oleh sifat fisik material, kondisi air, serta gaya-gaya yang bekerja pada lereng [4].

Analisis kestabilan lereng merupakan salah satu upaya untuk mengevaluasi tingkat keamanan suatu lereng terhadap potensi longsoran. Tingkat kestabilan lereng umumnya dinyatakan dengan nilai faktor keamanan yaitu perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak longsoran. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam analisis kestabilan lereng adalah *Limit Equilibrium Method* (LEM), yang bekerja berdasarkan prinsip keseimbangan gaya dan momen pada bidang gelincir. Metode ini banyak diterapkan pada bidang geoteknik karena mampu memberikan estimasi kestabilan lereng yang cukup baik pada berbagai kondisi geometri dan materi [5]

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan metode LEM untuk menganalisis kestabilan lereng pada area pertambangan nikel. Penelitian yang dilakukan oleh [6] menyatakan bahwa metode *Fellenius* dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng material *overburden* bijih nikel dan menunjukkan bahwa peningkatan tinggi serta sudut lereng menyebabkan penurunan nilai faktor keamanan. Sementara itu penelitian [7] melakukan analisis kestabilan lereng disposal bijih nikel menggunakan metode *Bishop*, *Janbu*, dan *Ordinary* serta menunjukkan bahwa perubahan geometri lereng mampu meningkatkan nilai faktor keamanan hingga memenuhi kriteria kestabilan.

Meskipun demikian, penelitian mengenai kestabilan lereng pada tumpukan bijih nikel di area *stockyard* masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada lereng tambang dan disposal,

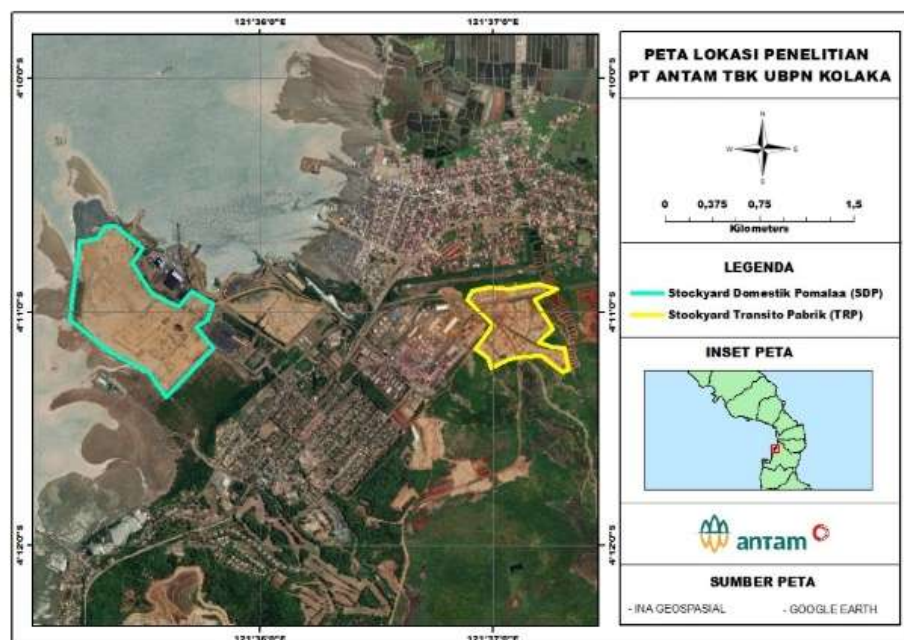
sedangkan karakteristik tumpukan bijih nikel di *stockyard* memiliki kondisi geometri dan distribusi beban yang berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan berupa evaluasi kestabilan lereng pada tumpukan bijih nikel aktual di area *stockyard* menggunakan metode *Bishop* dan *Fellenius*. Perbandingan kedua metode dilakukan untuk mengetahui perbedaan nilai faktor keamanan yang dihasilkan serta menentukan geometri tumpukan yang lebih optimal dalam mendukung keselamatan dan efektivitas pengelolaan *stockyard*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan lereng berdasarkan geometri aktual tumpukan bijih nikel, membandingkan nilai faktor keamanan yang dihasilkan oleh metode *Bishop* dan *Fellenius*, serta memberikan rekomendasi geometri tumpukan yang memenuhi kriteria kestabilan lereng pada area *stockyard* PT ANTAM Tbk. UBPN Kolaka.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan lereng tumpukan bijih nikel di PT ANTAM Tbk. UBPN Kolaka. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data, pengolahan data, analisis faktor keamanan menggunakan metode *Bishop* dan *Fellenius*, serta evaluasi hasil analisis.

A. Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di area *Stockyard* Domestik Pomalaa (SDP) dan *Stockyard* Transito Pabrik (TRP) PT ANTAM Tbk. UBPN Kolaka yang berlokasi di Kecamatan Pomalaa, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. Objek penelitian berupa 30 tumpukan bijih nikel yang terdiri atas 15 tumpukan pada *Stockyard* Domestik Pomalaa dan 15 tumpukan pada *Stockyard* Transito Pabrik. Area tumpukan bijih nikel ditandai dengan garis berwarna hijau yaitu *Stockyard* Domestik Pomalaa (SDP) dan dengan garis berwarna kuning yaitu *Stockyard* Transito Pabrik (TRP) yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Lokasi Penelitian

B. Pengumpulan Data

Penelitian menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui pengukuran langsung geometri tumpukan menggunakan meteran roll 100 m yang meliputi panjang bawah, panjang atas,

lebar, dan panjang sisi miring. Data sekunder diperoleh dari PT ANTAM Tbk. UBPN Kolaka berupa data sifat fisik dan mekanik material yang meliputi bobot isi, kohesi, dan sudut geser dalam, serta data tonase masing-masing tumpukan.

C. Pengolahan Data

Data geometri hasil pengukuran digunakan untuk menghitung tinggi dan sudut kemiringan lereng. Selanjutnya dibuat model geometri lereng dalam format *.dxf* yang kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak geoteknik dengan *Limit Equilibrium Method* (LEM). Analisis kestabilan dilakukan menggunakan metode *Bishop* dan *Fellenius*. Hasil analisis berupa nilai faktor keamanan (FK) masing-masing tumpukan kemudian dibandingkan dengan standar Kepmen ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018, yaitu lereng dinyatakan stabil apabila memiliki nilai $FK \geq 1,1$.

Tabel 1 Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Tambang
(Sumber: Kepmen ESDM RI, 2018)

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (<i>Consequence of Failure/COF</i>)	Kriteria dapat diterima (<i>Acceptance Criteria</i>)		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (min)	Probabilitas Longsor (<i>Probability of Failure</i>) (maks) PoF ($FK \leq 1$)
Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1,1	Tidak ada	25%-50%
	Rendah	1,15-1,2	1,0	25%
Inter-ramp	Menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15%-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

D. Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng pada penelitian ini menggunakan *Limit Equilibrium Method* (LEM) yaitu metode yang menentukan faktor keamanan berdasarkan keseimbangan gaya dan momen pada bidang gelincir [8]. Pada metode ini, massa tanah atau material dibagi menjadi beberapa irisan untuk menghitung nilai faktor keamanan lereng [9]. Penelitian ini menggunakan metode *Bishop* dan *Fellenius* karena keduanya sesuai untuk menganalisis longsor berbentuk busur yang umum terjadi pada tumpukan bijih nikel di stockyard. Metode *Bishop* dipilih karena memberikan hasil yang lebih teliti melalui keseimbangan momen, sedangkan metode *Fellenius* digunakan sebagai metode pembanding dengan pendekatan irisan yang lebih sederhana [10].

1. Metode Bishop

Metode *Bishop* merupakan salah satu metode *Limit Equilibrium Method* (LEM) yang banyak digunakan dalam analisis kestabilan lereng karena memberikan hasil faktor keamanan yang cukup teliti dengan perhitungan yang relatif sederhana. Metode ini mengasumsikan bidang longsor berbentuk busur dan memenuhi kesetimbangan momen serta kesetimbangan gaya vertikal pada setiap irisan [11]. Pada penelitian ini, metode *Bishop* digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng tumpukan bijih nikel yang berpotensi mengalami longsor berbentuk busur [12]. Nilai faktor keamanan dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$FK = \frac{\sum [c \cdot bi + (W - u \cdot bi) \cdot \tan \varphi] \frac{1}{\cos \alpha \cdot (1 + \tan \alpha \cdot \tan \varphi / F)}}{\sum (W \sin \alpha)} \quad (1)$$

Parameter yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng meliputi c sebagai kohesi tanah (kN/m^2), φ sebagai sudut gesek dalam tanah ($^\circ$), bi sebagai lebar irisan ke- i (m), W sebagai berat irisan tanah (kN), α sebagai sudut tiap irisan terhadap bidang gelincir ($^\circ$), dan u sebagai tekanan air pori pada irisan ke- i (kN/m^2).

2. Metode Fellenius

Metode *Fellenius* atau *Ordinary Method of Slices* merupakan salah satu metode *Limit Equilibrium Method* (LEM) yang digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng dengan membagi bidang longsor menjadi beberapa irisan vertikal. Metode ini menghitung faktor keamanan berdasarkan keseimbangan gaya tanpa mempertimbangkan gaya antaririsan sehingga proses perhitungannya lebih sederhana [13]. Pada penelitian ini, metode *Fellenius* digunakan sebagai pembanding terhadap metode Bishop dalam analisis kestabilan lereng tumpukan bijih nikel. Nilai faktor keamanan dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$FK = \frac{\sum (c \cdot b + W \cos \alpha \cdot \tan \varphi)}{\sum (W \sin \alpha)} \quad (2)$$

Kohesi tanah (c) menunjukkan kekuatan ikatan antarpartikel tanah dalam menahan gaya geser. Panjang bidang gelincir (b) menyatakan panjang bidang longsor. Berat irisan tanah (W) merupakan beban pada setiap irisan akibat gaya gravitasi. Sudut irisan (α) menunjukkan kemiringan dasar tiap irisan terhadap bidang horizontal. Sudut gesek dalam tanah (φ) menyatakan kemampuan tanah dalam memberikan tahanan terhadap pergeseran melalui gesekan antarbutir tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Geometri Tumpukan Aktual Bijih Nikel

Geometri tumpukan adalah kenampakan visual dari bentuk, ukuran, dan susunan material yang ditumpuk di lapangan. Geometri ini mencakup beberapa parameter berupa panjang, lebar, tinggi, dan sudut pada tumpukan. Geometri tumpukan sangat penting dalam perencanaan dan pengelolaan aktivitas pertambangan atau penyimpanan material karena mempengaruhi stabilitas lereng dan efisiensi ruang pada *stockyard*. *Stockyard* Domestik Pomalaa (Gambar 2. a) memiliki kapasitas sekitar 1.000 WMT, sedangkan *Stockyard* Transito Pabrik (Gambar 2. b) memiliki kapasitas sekitar 3.000 WMT sesuai dengan fungsi masing-masing sebagai area penyimpanan dan transit material.



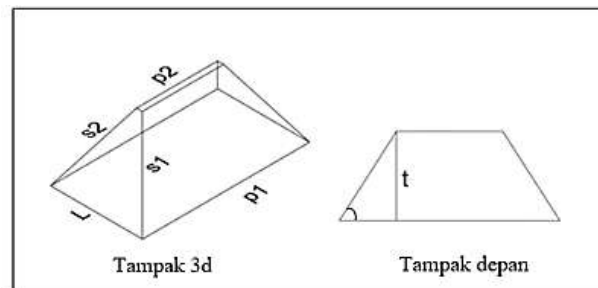
Gambar 2. Tumpukan (a) *Stockyard* Domestik Pomalaa dan (b) *Stockyard* Transito Pabrik

Pada tampak depan tumpukan berbentuk trapesium dengan puncak relatif datar, sedangkan pada tampak samping membentuk segitiga sembarang akibat perbedaan kemiringan lereng (Gambar 2). Hasil pengamatan menunjukkan adanya longsor pada beberapa lereng tumpukan yang menyebabkan perubahan geometri dari kondisi awal (Gambar 3). Kondisi tersebut mengindikasikan perlunya evaluasi kestabilan lereng berdasarkan parameter geometri tumpukan.



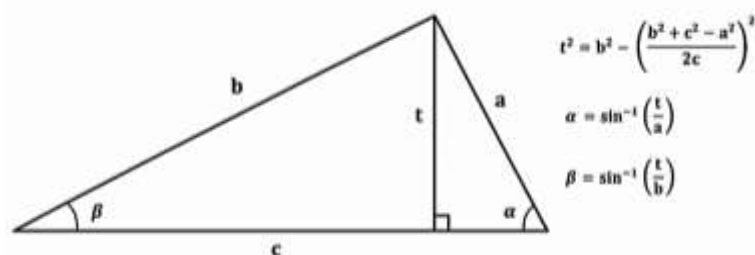
Gambar 3. Kondisi Longsor Pada Tumpukan *Stockyard*

Geometri tumpukan divisualisasikan dalam bentuk tampak depan dan tampak samping berdasarkan pembagian blok pada masing-masing *stockyard* (Gambar 4). Data hasil pengukuran lapangan selanjutnya digunakan untuk menghitung tinggi dan sudut lereng sebagai dasar analisis kestabilan serta evaluasi faktor keamanan tumpukan.



Gambar 4. Visualisasi Model Tumpukan Bijih Nikel

Tinggi dan sudut kemiringan tumpukan dihitung berdasarkan geometri penampang melintang yang menyerupai segitiga sembarang. Tinggi diperoleh menggunakan turunan hukum cosinus dan teorema Pythagoras, sedangkan sudut kemiringan lereng dihitung dengan fungsi invers sinus (arcsin) [11]. Persamaan yang digunakan untuk menentukan tinggi (t) serta sudut kemiringan sisi depan (α) dan sisi belakang (β) yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Nilai Tinggi dan Sudut Kemiringan

Data tonase setiap tumpukan diperoleh dari catatan ritase *dump truck* PT ANTAM Tbk. UBPN Kolaka. Hasil pengukuran geometri dan tonase tumpukan di *Stockyard* Domestik Pomalaa (SDP) dan *Stockyard* Transito Pabrik (TRP) disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2 Data Geometri Tumpukan *Stockyard* Domestik Pomalaa

Kode Tumpukan	Panjang Bawah (m)	Panjang Atas (m)	Lebar (m)	Sisi Miring		Tinggi (m)	Sudut		Tonase (WMT)
				Depan (m)	Belakang (m)		Depan (°)	Belakang (°)	
SDP1	19,6	9,8	17,6	15,7	8	7,14	27,04	63,13	1307,59
SDP2	23,5	11,3	21,3	16	7	3,93	14,23	34,18	1225,31
SDP3	17	7	10	8	6,9	5,49	43,33	52,71	1089,73
SDP4	25,7	9,3	23	21	9,3	8,49	23,85	65,93	1535,87
SDP5	23	7,7	21	20	8,8	8,34	24,63	71,31	1597,39
SDP6	20,4	10,2	17,6	14	6,3	4,55	18,96	46,21	891,46
SDP7	22,4	10,8	20,3	15,8	9,2	6,9	25,89	48,58	1282,41
SDP8	21,6	9,2	17,8	17,2	9,8	9,23	32,46	70,4	1890,22
SDP9	16,7	6,8	15,7	14,9	6,8	6,42	25,51	70,66	1265,55
SDP10	26,7	15,1	24,5	19,7	10,7	8,37	25,14	51,46	1735,87
SDP11	24,1	14,3	20,3	18,2	8,8	7,89	25,69	63,7	1339,8
SDP12	18	11	17,4	14	6,8	5,19	21,75	49,72	789,45
SDP13	62	13,6	59	49,8	18,6	14,69	17,15	52,14	7527,52
SDP14	26	-	25,1	21	19,67	15,98	49,54	54,32	1963,2
SDP15	18,3	3,7	16,6	12,5	8,4	6,15	29,49	47,09	1626,24

Berdasarkan Tabel 2 geometri tumpukan di *Stockyard* Domestik Pomalaa menunjukkan variasi tinggi, lebar, panjang, sudut lereng, dan tonase. Tinggi tumpukan berkisar 3,93–15,98 m dengan lebar 10–25,1 m, sehingga menghasilkan sudut lereng yang bervariasi. Secara umum, tumpukan yang lebih tinggi memiliki sudut lereng yang lebih curam, sedangkan tonase cenderung meningkat seiring bertambahnya dimensi geometri tumpukan. Tumpukan SDP14 memiliki geometri menyerupai kerucut atau limas karena tidak memiliki panjang atas, sehingga membentuk lereng lebih curam dibandingkan tumpukan lainnya. Variasi geometri tersebut memengaruhi distribusi beban dan menjadi salah satu faktor yang berpengaruh terhadap nilai faktor keamanan lereng.

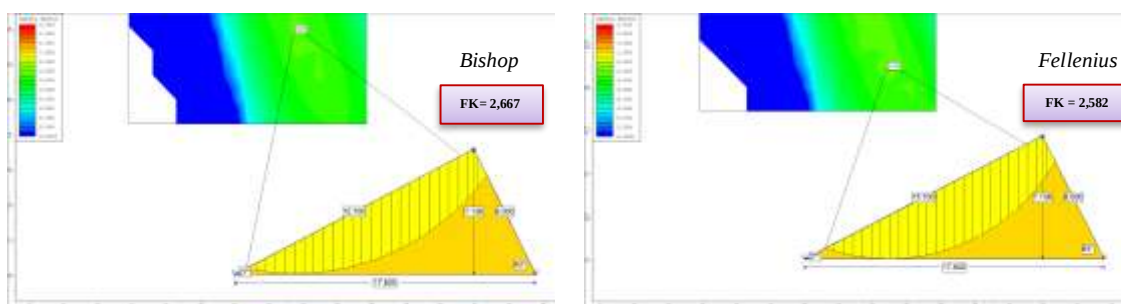
Tabel 3 Data Geometri Tumpukan *Stockyard* Transito Pabrik

stockpie	Panjang Bawah (m)	Panjang Atas (m)	Lebar (m)	Sisi Miring		Tinggi (m)	Sudut		Tonase (WMT)
				Depan (m)	Belakang (m)		Depan (°)	Belakang (°)	
TRP1	25	8,6	18,7	20,3	11,8	11,62	34,92	79,97	2966,68
TRP2	28	7,8	24,1	20,6	11	9,37	27,07	58,45	2976,07
TRP3	33	8,8	28,3	24	17	14,37	36,79	57,72	3100,43
TRP4	27,8	9,3	22,3	22,7	9,65	9,5	24,75	79,95	2938,89
TRP5	34	7,7	32	26,7	11,5	9,18	20,11	52,96	3104,64
TRP6	33,1	7,8	31	28,2	21,3	18,81	41,84	62,03	3210,53
TRP7	27	12,2	25,8	20,6	11,9	9,3	26,85	51,42	3033,39
TRP8	26	6,4	22,1	25,1	12,7	12,69	30,38	87,99	3367
TRP9	29	13,3	27	24,4	10,2	9,2	22,15	64,44	2879,99
TRP10	30,6	8,4	28	26,2	20,1	17,99	43,38	63,54	3111,87
TRP11	45	12,2	38	32,8	18	15,53	28,25	59,6	3331,91
TRP12	37	9,9	35,4	32,5	13	11,93	21,53	66,57	2800,31
TRP13	31,3	6,5	29	27,6	11,5	10,91	23,28	71,51	3126,48
TRP14	43	-	41,6	33	27	21,39	40,41	52,4	3922
TRP15	35,6	10,2	33	29,5	15	13,41	27,03	63,37	3678,94

Berdasarkan Tabel 3 tumpukan di *Stockyard* Transito Pabrik umumnya memiliki dimensi dan tonase yang lebih besar dibandingkan *Stockyard* Domestik Pomalaa, dengan tinggi mencapai 21,39 m pada TRP14. Variasi geometri menghasilkan sudut lereng yang berbeda pada setiap tumpukan, dimana secara umum tinggi tumpukan yang lebih besar cenderung membentuk lereng yang lebih curam. Sebagian besar tumpukan memiliki geometri menyerupai trapesium, sedangkan TRP14 berbentuk menyerupai kerucut atau limas karena tidak memiliki panjang atas. Variasi geometri tersebut memengaruhi distribusi beban dan menjadi faktor yang berpengaruh terhadap kestabilan lereng, sehingga tumpukan dengan dimensi dan sudut lereng yang lebih besar berpotensi memiliki risiko longsor yang lebih tinggi.

B. Analisis Kestabilan Lereng Tumpukan Menggunakan Metode *Bishop* dan *Fellenius*

Analisis kestabilan lereng pada tumpukan bijih nikel dilakukan untuk mengevaluasi tingkat keamanan geometri tumpukan terhadap potensi longsor dengan menggunakan parameter faktor keamanan (FK). Model penimbunan pada *Stockyard* Domestik Pomalaa dan *Stockyard* Transito Pabrik menggunakan pola penimbunan *Rampstock*. Terdapat jenis pola penimbunan lain seperti pola penimbunan *cone ply*, *chevron*, *chevcon*, dan *windrow* [15]. Pola penimbunan *rampstock* memiliki kelebihan dalam mempermudah mobilitas alat berat karena alat dapat bergerak langsung di atas jalur tumpukan saat proses penumpukan berlangsung. Pola penimbunan *rampstock* dilakukan menggunakan *excavator* dan *dozer* sehingga membentuk geometri tumpukan menyerupai trapesium pada tampak depan dan segitiga sembarang pada tampak samping. Geometri aktual tumpukan dibuat berdasarkan hasil pengukuran lapangan kemudian dimodelkan dan dikonversi ke dalam format *.dxf* untuk dianalisis menggunakan perangkat lunak *Rocscience Slide*. Bentuk tumpukan bijih nikel merupakan lereng tunggal (*single slope*). Analisis kestabilan dilakukan menggunakan metode *Limit Equilibrium Method* (LEM) dengan metode *Bishop* dan *Fellenius*. Parameter sifat fisik dan mekanik material yang digunakan berupa bobot isi sebesar 15,5 kN/m³, kohesi sebesar 20 kPa, dan sudut geser dalam sebesar 24,53° yang diperoleh dari data perusahaan. Bidang gelincir pada tumpukan bijih nikel dimodelkan berbentuk busur (*circular failure*). Analisis kestabilan lereng mengacu pada ketentuan teknis dalam KEPMEN ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Dalam penelitian ini, nilai faktor keamanan (FK) $\geq 1,1$ digunakan sebagai kriteria evaluasi kestabilan tumpukan bijih nikel di stockyard. Kriteria tersebut diterapkan pada lereng tunggal dengan mempertimbangkan kondisi material yang relatif homogen serta pengendalian geometri dan kegiatan penimbunan di lapangan. FK $\geq 1,1$ digunakan sebagai batas evaluasi dalam penelitian ini dan tidak dinyatakan sebagai ketentuan nilai FK yang ditetapkan dalam KEPMEN ESDM No. 1827 K/30/MEM/2018. Setelah pengolahan data diperoleh nilai faktor keamanan (FK) pada setiap tumpukan menggunakan metode *Bishop* dan *Fellenius*. Hasil analisis pada tumpukan SDP1 disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil Analisis FK Tumpukan SDP1 Metode *Bishop* dan *Fellenius*

Nilai faktor keamanan setiap tumpukan disajikan pada Tabel 4 dan digunakan sebagai dasar evaluasi kestabilan lereng di *Stockyard* Domestik Pomalaa dan *Stockyard* Transito Pabrik.

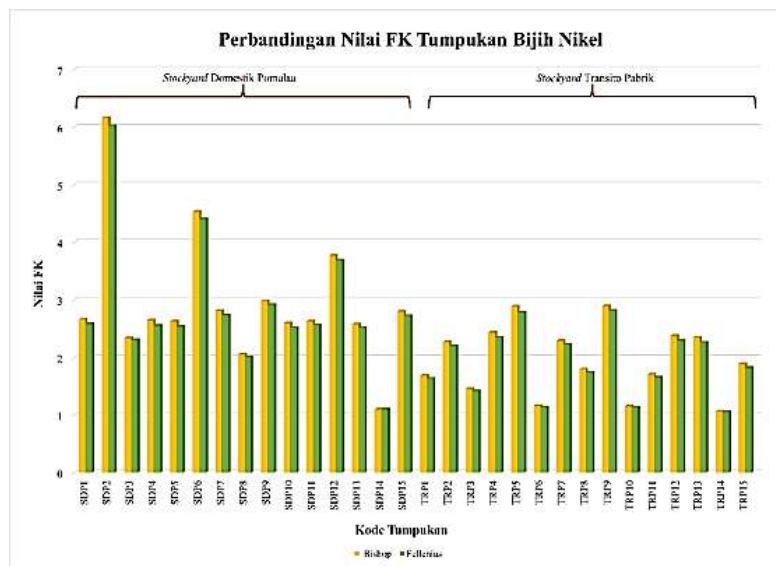
Tabel 4 Nilai FK Tumpukan Bijih Nikel *Stockyard* Domestik Pomalaa dan *Stockyard* Transito Pabrik

<i>Stockyard</i> Domestik Pomalaa				<i>Stockyard</i> Transito Pabrik			
Kode Tumpukan	Nilai FK			Kode Tumpukan	Nilai FK		
	Metode Bishop	Metode Fellenius	Selisih		Metode Bishop	Metode Fellenius	Selisih
SDP1	2,667	2,582	0,085	TRP1	1,687	1,634	0,053
SDP2	6,168	6,022	0,146	TRP2	2,272	2,201	0,071
SDP3	2,339	2,308	0,031	TRP3	1,459	1,419	0,04
SDP4	2,648	2,554	0,094	TRP4	2,435	2,349	0,086
SDP5	2,629	2,538	0,091	TRP5	2,889	2,785	0,104
SDP6	4,534	4,405	0,129	TRP6	1,163	1,139	0,024
SDP7	2,813	2,738	0,075	TRP7	2,294	2,229	0,065
SDP8	2,056	2,007	0,049	TRP8	1,802	1,742	0,06
SDP9	2,987	2,918	0,069	TRP9	2,896	2,818	0,078
SDP10	2,599	2,515	0,084	TRP10	1,156	1,139	0,017
SDP11	2,63	2,564	0,066	TRP11	1,709	1,653	0,056
SDP12	3,768	3,69	0,078	TRP12	2,377	2,296	0,081
SDP13	2,577	2,516	0,061	TRP13	2,346	2,264	0,082
SDP14	1,099	1,098	0,001	TRP14	1,068	1,057	0,011
SDP15	2,799	2,725	0,074	TRP15	1,893	1,82	0,073

Berdasarkan hasil analisis, sebagian besar tumpukan di *Stockyard* Domestik Pomalaa dan *Stockyard* Transito Pabrik memiliki nilai faktor keamanan (FK) di atas 1,1 sehingga secara umum berada dalam kondisi stabil. Namun, tumpukan SDP14 dan TRP14 memiliki nilai FK di bawah 1,1 sebesar 1,099 dan 1,068 dengan metode *Bishop*, sehingga memerlukan evaluasi dan penyesuaian geometri. Sementara itu, TRP6 dan TRP10 memiliki nilai FK masing-masing sebesar 1,163 dan 1,156 dengan metode *Bishop*. Kedua tumpukan tersebut masih memenuhi kriteria FK 1,1, tetapi nilai yang relatif dekat dengan batas minimum menunjukkan tingkat kestabilan yang lebih rendah sehingga perlu mendapat perhatian dalam pengelolaan geometri dan kegiatan penimbunan. Nilai faktor keamanan tertinggi terdapat pada SDP2 dengan nilai FK sebesar 6,168 menggunakan metode *Bishop* dan 6,022 menggunakan metode *Fellenius*, yang menunjukkan kondisi tumpukan sangat stabil. Nilai tersebut dipengaruhi oleh geometri tumpukan yang memiliki tinggi relatif rendah sehingga gaya penggerak akibat berat material menjadi lebih kecil. Dengan parameter sifat fisik dan mekanik yang sama, gaya penahan mampu mendominasi sehingga menghasilkan nilai FK yang tinggi. Tumpukan dengan kode TRP6 dan TRP10 memiliki nilai yang mendekati 1,1, kondisi ini dipengaruhi oleh geometri tumpukan yang memiliki tinggi relatif besar masing-masing sebesar 18,81 m dan 17,99 m, dengan lebar yang relatif sempit yaitu 7,8 m dan 8,4 m. Tinggi tumpukan yang besar meningkatkan gaya pendorong akibat berat sendiri material, sedangkan lebar yang terbatas menyebabkan berkurangnya kontribusi gaya penahan terhadap kestabilan lereng. Kemiringan lereng yang cukup curam turut meningkatkan potensi terjadinya pergerakan massa tanah. Kombinasi parameter geometri tersebut menyebabkan nilai faktor keamanan pada kedua tumpukan berada di bawah batas minimum yang direkomendasikan, sehingga diperlukan penyesuaian geometri tumpukan untuk meningkatkan kestabilan lereng. Secara umum, metode *Bishop* menghasilkan nilai FK yang lebih besar dibandingkan metode *Fellenius* karena mempertimbangkan keseimbangan momen dan sebagian gaya antarlirisan, sedangkan

metode *Fellenius* tidak memperhitungkan gaya antaririsan sehingga menghasilkan nilai FK yang lebih konservatif.

Hasil analisis menunjukkan bahwa tumpukan pada *Stockyard* Domestik Pomalaa (SDP) umumnya memiliki nilai faktor keamanan (FK) lebih tinggi dibandingkan *Stockyard* Transito Pabrik (TRP). Pada area SDP nilai FK sebagian besar berada di atas 1,5, sedangkan pada area TRP beberapa tumpukan memiliki nilai FK mendekati atau di bawah 1,1 yang menunjukkan kondisi stabil kritis hingga tidak stabil pada Tabel 4. Perbedaan nilai FK berkaitan dengan karakteristik tumpukan, dimana *Stockyard* Domestik Pomalaa memiliki volume tumpukan sekitar ± 1.000 ton, sedangkan *Stockyard* Transito Pabrik sekitar ± 3.000 ton. Peningkatan volume tumpukan menyebabkan bertambahnya beban material dan gaya penggerak (*driving force*), sehingga berpotensi menurunkan nilai FK.



Gambar 7. Perbandingan Nilai FK Tumpukan Bijih Nikel

Selisih nilai FK antara metode *Bishop* dan *Fellenius* relatif kecil serta menunjukkan pola yang konsisten pada seluruh tumpukan pada Gambar 7. Metode *Bishop* memberikan nilai faktor keamanan sedikit lebih tinggi dibandingkan metode *Fellenius*, dengan rata-rata selisih sebesar 0,061 atau sekitar 2,3%. Hasil ini sejalan dengan penelitian [16] yang menyatakan bahwa hasil faktor keamanan metode *Bishop* hanya berbeda sekitar 2% dibandingkan metode lainnya dan tetap menunjukkan hasil analisis yang konsisten. Perbedaan tersebut terjadi karena metode *Bishop* memperhitungkan gaya antaririsan, sedangkan metode *Fellenius* menggunakan asumsi yang lebih sederhana. Selisih nilai FK yang kecil menunjukkan bahwa kedua metode memiliki kesesuaian dan dapat digunakan dalam analisis kestabilan tumpukan bijih nikel.

C. Rekomendasi Desain Tumpukan

Nilai faktor keamanan (FK) pada setiap tumpukan bijih nikel menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh kondisi geometri dan volume tumpukan. Berdasarkan hasil analisis, desain tumpukan yang paling stabil terdapat pada area *Stockyard* Domestik Pomalaa (SDP) dengan volume relatif lebih kecil dan geometri lereng yang lebih landai. Sementara itu, untuk memenuhi kebutuhan kapasitas yang lebih besar pada area *Stockyard* Transito Pabrik (TRP), diperlukan modifikasi desain agar nilai faktor keamanan (FK) tetap berada dalam kondisi stabil. *Redesign* geometri tumpukan dilakukan untuk menyesuaikan geometri dengan kapasitas volume serta mengoptimalkan pemanfaatan area *stockyard* agar kapasitas ruang menjadi lebih luas dan efisien.

Tabel 5 Rekomendasi Geometri Tumpukan *Stockyard* Domestik Pomalaa

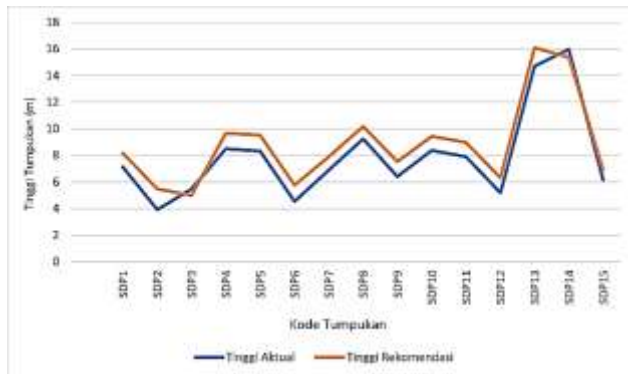
Kode Tumpukan	Panjang Bawah (m)	Panjang Atas (m)	Lebar (m)	Sisi Miring		Tinggi (m)	Sudut		Tonase (WMT)
				Depan (m)	Belakang (m)		Depan (°)	Belakang (°)	
SDP1	19,6	9,8	14,6	12,7	9,5	8,1585	39,97	59,18	1307,59
SDP2	23,5	11,3	18,3	13	8,5	5,4694	24,88	40,05	1225,31
SDP3	17	7	9	7	8,4	4,994	87,18	36,48	1089,73
SDP4	25,7	9,3	20	18	10,8	9,6668	32,48	63,52	1535,87
SDP5	23	7,7	18	17	10,3	9,5252	34,08	67,64	1597,39
SDP6	20,4	10,2	14,6	11	7,8	5,778	31,69	47,8	891,46
SDP7	22,4	10,8	17,3	12,8	10,7	7,8936	38,07	47,54	1282,41
SDP8	21,6	9,2	14,8	14,2	11,3	10,1815	45,81	64,29	1890,22
SDP9	16,7	6,8	12,7	11,9	8,3	7,532	39,27	65,16	1265,55
SDP10	26,7	15,1	21,5	16,7	12,2	9,4422	34,43	50,71	1735,87
SDP11	24,1	14,3	17,3	15,2	10,3	8,9834	36,23	60,71	1339,8
SDP12	18	11	14,4	11	8,3	6,3112	35,01	49,5	789,45
SDP13	62	13,6	56	46,8	20,1	16,0864	20,1	53,16	7527,52
SDP14	26	-	28,1	24	18,17	15,3797	39,85	57,83	1963,2
SDP15	18,3	3,7	13,6	9,5	9,9	6,9144	46,7	44,3	1626,24

Tabel 6 Rekomendasi Geometri Tumpukan *Stockyard* Transito Pabrik

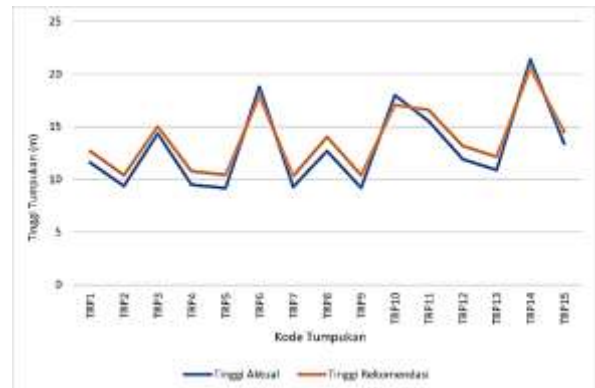
Kode Tumpukan	Panjang Bawah (m)	Panjang Atas (m)	Lebar (m)	Sisi Miring		Tinggi (m)	Sudut		Tonase (WMT)
				Depan (m)	Belakang (m)		Depan (°)	Belakang (°)	
TRP1	25	8,6	15,7	17,3	13,3	12,6993	47,23	72,71	2966,68
TRP2	28	7,8	21,1	17,6	12,5	10,4149	36,28	56,43	2976,07
TRP3	33	8,8	25,3	20,9	18,5	15,0338	46	54,35	3100,43
TRP4	27,8	9,3	19,3	19,7	11,15	10,7884	33,2	75,37	2938,89
TRP5	34	7,7	29	23,7	13	10,4525	26,17	53,52	3104,64
TRP6	33,1	7,8	34	31,2	19,8	17,9064	35,02	64,74	3210,53
TRP7	27	12,2	22,8	17,6	13,4	10,3222	35,91	50,38	3033,39
TRP8	26	6,4	19,1	22,1	14,2	14,0523	39,48	81,73	3367
TRP9	29	13,3	24	21,4	11,7	10,4251	29,15	63	2879,99
TRP10	30,6	8,4	31	29,2	18,6	17,0957	35,84	66,8	3111,87
TRP11	45	12,2	35	29,8	19,5	16,5913	33,83	58,3	3331,91
TRP12	37	9,9	32,4	29,5	14,5	13,1936	26,57	65,49	2800,31
TRP13	31,3	6,5	26	24,6	13	12,1543	29,61	69,22	3126,48
TRP14	43	-	44,6	36	25,5	20,5773	34,86	53,8	3922
TRP15	35,6	10,2	30	26,5	16,5	14,522	33,23	61,66	3678,94

Hubungan antara tinggi aktual dan tinggi rekomendasi pada setiap tumpukan ditampilkan pada Gambar 8. Grafik tersebut memperlihatkan perbedaan tinggi yang terjadi pada masing-masing tumpukan SDP sebagai dasar dalam evaluasi geometri tumpukan. Kedua kurva menunjukkan pola yang relatif berdekatan pada seluruh kode tumpukan. Tumpukan yang menunjukkan perbedaan tinggi paling kecil antara kondisi aktual dan rekomendasi adalah SDP3, SDP15, dan SDP9 terlihat pada grafik, ketiganya memiliki garis yang relatif berhimpitan. Beberapa tumpukan seperti SDP2, SDP4, SDP5, dan SDP13 menunjukkan selisih yang lebih besar dibandingkan tumpukan lainnya. Selisih antara tinggi aktual dan tinggi rekomendasi masing-masing sebesar 1,54 m, 1,40 m, 1,19 m, dan 1,18 m, sehingga pada grafik terlihat jarak yang lebih besar

dibandingkan tumpukan lainnya. Sementara itu, SDP14 menjadi satu-satunya tumpukan yang menunjukkan tren berbeda yaitu tinggi rekomendasi lebih rendah daripada tinggi aktual dengan selisih sebesar 0,60 m.



Gambar 8 Nilai Tinggi Aktual dan Rekomendasi SDP



Gambar 9 Nilai Tinggi Aktual dan Rekomendasi TRP

Grafik pada Gambar 9 menunjukkan perbandingan antara tinggi aktual dan tinggi rekomendasi pada 15 tumpukan bijih nikel di Stockyard Transito Pabrik (TRP). Sebagian besar tumpukan, seperti TRP1, TRP2, TRP4, TRP5, TRP7, TRP8, TRP9, TRP12, TRP13, dan TRP15, tinggi rekomendasi cenderung lebih tinggi dibandingkan tinggi aktual. Hal ini menunjukkan bahwa geometri aktual masih memungkinkan dilakukan peningkatan tinggi tanpa mengurangi tingkat kestabilan lereng, sehingga kapasitas penimbunan material dapat dioptimalkan. Sebaliknya, pada TRP6, TRP10, TRP11, dan TRP14, tinggi rekomendasi lebih rendah daripada tinggi aktual. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa geometri aktual berpotensi menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih rendah sehingga diperlukan pengurangan tinggi tumpukan untuk meningkatkan kestabilan lereng dan mengurangi risiko longsoran. Oleh karena itu, penyesuaian tinggi tumpukan dilakukan agar diperoleh keseimbangan antara kapasitas penyimpanan material dan tingkat keamanan lereng.

Metode perancangan geometri dilakukan dengan memodifikasi dimensi tumpukan melalui variasi lebar, sisi miring, dan tinggi. Apabila nilai faktor keamanan (FK) < 1,1 dilakukan optimasi geometri tumpukan, sedangkan apabila FK > 1,1 dilakukan efisiensi geometri dengan tetap mempertimbangkan kestabilan lereng. Dari variasi tersebut diperoleh nilai faktor keamanan (FK) sebagai hasil analisis yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 Nilai FK setelah *Redesign Stockyard Domestik Pomalaa* dan *Stockyard Transito Pabrik*

Stockyard Domestik Pomalaa				Stockyard Transito Pabrik			
Kode Tumpukan	Nilai FK			Kode Tumpukan	Nilai FK		
	Metode Bishop	Metode Fellenius	Selisih		Metode Bishop	Metode Fellenius	Selisih
SDP1	1,904	1,856	0,048	TRP1	1,299	1,285	0,014
SDP2	3,364	3,293	0,071	TRP2	1,752	1,711	0,041
SDP3	1,736	1,69	0,046	TRP3	1,209	1,201	0,008
SDP4	2,001	1,953	0,048	TRP4	1,831	1,777	0,054
SDP5	1,922	1,871	0,051	TRP5	2,19	2,121	0,069
SDP6	2,748	2,67	0,078	TRP6	1,367	1,317	0,05
SDP7	2,003	1,973	0,03	TRP7	1,773	1,734	0,039
SDP8	1,521	1,495	0,026	TRP8	1,412	1,373	0,039
SDP9	2,028	1,995	0,033	TRP9	2,048	1,986	0,062
SDP10	1,912	1,868	0,044	TRP10	1,372	1,317	0,055
SDP11	1,913	1,872	0,041	TRP11	1,451	1,398	0,053
SDP12	2,428	2,388	0,04	TRP12	1,946	1,879	0,067

<i>Stockyard Domestik Pomalaa</i>				<i>Stockyard Transito Pabrik</i>			
Kode Tumpukan	Nilai FK			Kode Tumpukan	Nilai FK		
	Metode Bishop	Metode Fellenius	Selisih		Metode Bishop	Metode Fellenius	Selisih
SDP13	2,081	2,034	0,047	TRP13	1,871	1,81	0,061
SDP14	1,333	1,302	0,031	TRP14	1,289	1,244	0,045
SDP15	1,91	1,895	0,015	TRP15	1,574	1,524	0,05

Berdasarkan Tabel 7 menunjukkan bahwa geometri TRP3 dapat digunakan sebagai salah satu desain yang direkomendasikan untuk area *Stockyard* Transito Pabrik. Geometri tersebut memiliki lebar 25,3 m, sisi miring depan 20,9 m, sisi miring belakang 18,5 m, tinggi 15 m, sudut lereng depan 46° dan sudut lereng belakang 54°. Hasil analisis menghasilkan nilai faktor keamanan sebesar 1,209 dengan metode *Bishop* dan 1,201 dengan metode *Fellenius*.

SIMPULAN

Analisis kestabilan lereng pada tumpukan bijih nikel di area *Stockyard* Domestik Pomalaa (SDP) dan *Stockyard* Transito Pabrik (TRP) PT ANTAM Tbk. UBPB Kolaka menunjukkan bahwa geometri tumpukan berpengaruh terhadap nilai faktor keamanan (FK), dimana peningkatan tinggi dan sudut kemiringan lereng cenderung menurunkan nilai FK. Hasil analisis menggunakan metode *Bishop* dan *Fellenius* menunjukkan bahwa sebagian besar tumpukan berada dalam kondisi stabil dengan nilai $FK \geq 1,1$. Nilai FK tertinggi diperoleh pada tumpukan SDP2 sebesar 6,168 dengan metode *Bishop* dan 6,022 dengan metode *Fellenius*, sedangkan nilai FK terendah diperoleh pada tumpukan TRP14 sebesar 1,068 dengan metode *Bishop* dan 1,057 dengan metode *Fellenius*. Metode *Bishop* menghasilkan nilai FK sedikit lebih tinggi dibandingkan metode *Fellenius* dengan rata-rata selisih sebesar 0,061 atau sekitar 2,3%. Hasil *redesign* menghasilkan beberapa alternatif geometri dengan nilai FK yang memenuhi kriteria penelitian. Salah satu alternatif yang direkomendasikan adalah geometri TRP3 dengan tinggi 15 m, lebar 25,3 m, sudut lereng depan 46° dan sudut lereng belakang 54°. Nilai FK yang diperoleh sebesar 1,209 dengan metode *Bishop* dan 1,201 dengan metode *Fellenius*. Penelitian ini terbatas pada analisis kondisi statis dan belum mempertimbangkan pengaruh air, beban dinamis, serta variasi sifat material pada setiap tumpukan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metode numerik dan mempertimbangkan kondisi hidrogeologi serta pembebanan dinamis untuk memperoleh hasil analisis yang lebih komprehensif.

REFERENSI

- [1] A. Rialdi. "Kajian Teknis Dimensi Penimbunan Nikel Dalam Memaksimalkan Area Stockpile Dan Pembuatan Saluran Terbuka di Exportable Final Ore (EFO) 2 Pada PT. Citra Lampia Mandiri Kecamatan Malili Kabupaten Luwu Timur Provinsi Sulawesi Selatan." *Fakultas Teknologi Mineral*. Institut Teknologi Nasional Yogyakarta. Yogyakarta. 2021.
- [2] R. Afandi, H. Purnomo, dan B. P. Putra. "Kajian Teknis Manajemen Stockpile Pada Area Exportable Transit Ore Terhadap Moisture Content Bijih Nikel di PT. Koninis Fajar Mineral Kabupaten Banggai, Provinsi Sulawesi Tengah." *ReTII*, 18(1), 146-154. 2023.
- [3] A. Arni, R. N. Hakim, dan M. Z. Arief. "Analisis Kestabilan Lereng Tumpukan Batubara ROM pada PT Adaro Indonesia Kabupaten Tabalong Kalimantan Selatan." *Jurnal Himasapta*, 10(3), 157-168. 2026.
- [4] D. Wahyudi. "Perencanaan Geometri Timbunan pada Stockpile Tambang Nikel Menggunakan Metode Keseimbangan Batas (LEM)." *Jurnal Geoteknik Tambang*, 8(1), 22-30. 2019.
- [5] P. Kolapo, G. O. Oniyide, K. O. Said, A. I. Lawal, M. Onifade, dan P. Munemo. "An Overview of Slope Failure in Mining Operations." *Mining*, 2(2), 350-384. 2022.
- [6] A. Ashar, I. Usman, A. Abriansyah, F. Amin, A. R. Shaddad, dan A. Aldiansyah. "Analisis Kestabilan Lereng Pada Overburden Lempung menggunakan Metode Fellenius: (Studi Kasus Blok Parasi PT. Wijaya Inti Nusantara Kabupaten Konawe Selatan)." *Jurnal TELUK: Teknik Lingkungan UM Kendari*, 5(2), 032-037. 2025.

- [7] D. Pasole, J. Patanduk, dan I. L. K. Wong. "Analisis Stabilitas Lereng Disposol Menggunakan Metode Bishop, Janbu, dan Ordinary." *Paulus Civil Engineering Journal*, 2(3), 144-153. 2020.
- [8] N. A. Shoffiana, P. T. K. Sari, dan Y. Lastyasih. "Perbandingan Hasil Analisa Stabilitas Lereng 2D dan 3D terhadap Jumlah Kebutuhan Perkuatannya." Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. 2021.
- [9] E. Pasunu. "Analisis Kestabilan Lereng Tambang Nikel PT. Ceria Nugraha Indotama Kolaka Sulawesi Tenggara" (Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin). 2025.
- [10] M. R. Amir, dan Y. D. G. Cahyono. "Analisis Kestabilan Lereng Pada Tambang Batu Andesit CV. Empat Lima Desa Morang Kecamatan Kare Kabupaten Madiun Provinsi Jawa Timur." *In Prosiding Senastitan: Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan* (4), 1 – 9. 2024.
- [11] A. E. Marini, Y. M. Anaperta, dan T. G. Saldy. "Analisis Kestabilan Lereng Area Highwall Section B Tambang Batubara PT. Manggala Usaha Manunggal Jobsite PT Banjarsari Pribumi, Kecamatan Merapi Timur, Kabupaten Lahat, Sumatera Selatan." *Jurnal Bina Tambang*, 4(4), 80-89. 2019.
- [12] I. J. Ilham, S. I., Firdaus, dan M. Z. Mili. "Geotechnical Study For Geometry Planning Using Nickel Mine Pit Slops Simplified Bishop Method on PT. Riota Jaya Lestari." *Jurnal Riset Teknologi Pertambangan*, 2(02), 1-10. 2022.
- [13] A. D. Rahmawati. "Analisis Perbaikan Stabilitas Lereng Dengan Metode Kombinasi Vegetasi dan Soil Nailing Di Area Proyek Spillway Bendungan Tugu Kabupaten Trenggalek." *Jurnal JOS-MRK*, 5(3):87-94. 2024.
- [14] E. Kreyszig. *Advanced Engineering Mathematics* (10th ed.). John Wiley & Sons. 2011.
- [15] M. Arta, dan A. Ansosry. "Rancangan Teknis Stockpile 2 Di Pt Bukit Asam Tbk, Unit Pelabuhan Tarahan-Lampung." *Journals Mining Engineering: Bina Tambang*, 4(1), 266-275. 2019.
- [16] A. N. Amalina, dan A. A. Ifthikar. "Analisis Perbandingan Stabilitas Lereng Pada Area Karst (Studi Kasus Girimulyo, Kulon Progo)." *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil dan Lingkungan-CENTECH*, 6(1), 37-45. 2025.