Journal Transformation of Mandalika
https://ojs.cahayamandalika.com/index.php/jtm
Vol. 7, No. 5, 2026
e-ISSN: 2745-5882, p-ISSN: 2962-2956
hh. 196-202

Penentuan kedalaman zona degradasi pada lereng *highwall* di PT putra karya borneo

Natasya Amanda Putri[1*], Tommy Trides[2], Revia Oktaviani[3],Albertus Juvensius Pontus[3],Rety Winonazada[4]
Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman
*Corresponding Author e-mail: natasyaamandputriii@gmail.com

Abstract

lope stability in open-pit mining is a critical aspect influenced by the geotechnical conditions of slope-forming materials, particularly the presence of a degradation zone. This study aims to determine the depth of the degradation zone or Fully Disturbed Limit (FDL) and to analyze its role in the stability of the highwall slope at Pit North, PT Karya Putra Borneo. The research employs a quantitative approach using secondary data, including slope geometry and geotechnical parameters, combined with slope modeling using Slide 6.0 software. The depth of the degradation zone is determined based on a disturbance factor (D) value of 0.7, representing mechanical excavation methods. The results indicate that the degradation zone extends to a depth of approximately 3.9 meters from the slope surface, forming a relatively weaker layer compared to the underlying material. This zone has the potential to act as a weak plane that controls slope failure mechanisms. Therefore, the depth and position of the degradation zone are key factors that must be considered in slope stability analysis to support safer and more effective slope design in open-pit mining.

Keywords: *Degradation zone, FDL, slope stability, highwall, open-pit mining*

Abstrak

Kestabilan lereng pada tambang terbuka merupakan aspek penting yang dipengaruhi oleh kondisi geoteknik material, khususnya keberadaan zona degradasi. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kedalaman zona degradasi atau Fully Disturbed Limit (FDL) serta menganalisis perannya terhadap kestabilan lereng highwall di Pit North PT Karya Putra Borneo. Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif dengan memanfaatkan data sekunder berupa penampang lereng dan parameter geoteknik, serta pemodelan menggunakan perangkat lunak Slide 6.0. Penentuan kedalaman zona degradasi dilakukan berdasarkan nilai disturbance factor (D) sebesar 0,7 yang mencerminkan metode pemberaian material secara mekanis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa zona degradasi berkembang hingga kedalaman sekitar 3,9 meter dari permukaan lereng, yang membentuk lapisan material yang lebih lemah dibandingkan lapisan di bawahnya. Keberadaan zona ini berpotensi menjadi bidang lemah yang mengontrol mekanisme kelongsoran. Oleh karena itu, kedalaman dan posisi zona degradasi menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan dalam analisis kestabilan lereng untuk mendukung perencanaan lereng tambang yang lebih aman dan efektif.

Kata Kunci: *Zona degradasi, FDL, kestabilan lereng, highwall, tambang terbuka*

How to Cite: Natasya Amanda Putri, Tommy Trides, Revia Oktaviani,Albertus Juvensius Pontus, Rety Winonazada . (2026). Penentuan kedalaman zona degradasi pada lereng *highwall* di PT putra karya borneo*Journal Scientific of Mandalika (JSM) E-ISSN 2745-5955 / P-ISSN 2809-0543, 7*(2), 265-275. https://doi.org/10.36312/10.36312/vol4iss1pp196-202

https://doi.org/10.36312/10.36312/vol4iss1pp196-202

Copyright©2026, Author (s)
This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

PENDAHULUAN

Kegiatan pertambangan terbuka (open-pit mining) merupakan salah satu metode penambangan yang banyak digunakan karena efisiensi dalam eksploitasi sumber daya mineral yang berada dekat dengan permukaan. Namun demikian, metode ini memiliki tantangan utama dalam aspek geoteknik, khususnya terkait kestabilan lereng (slope stability). Lereng highwall sebagai batas akhir penggalian menjadi komponen yang sangat krusial karena berhubungan langsung dengan keselamatan kerja, keberlangsungan operasional, serta efisiensi ekonomi tambang. Ketidakstabilan lereng dapat menyebabkan longsoran yang berdampak pada kerugian material, gangguan produksi, bahkan potensi korban jiwa, sehingga analisis kestabilan lereng menjadi hal yang tidak dapat diabaikan dalam perencanaan tambang terbuka (Saptono, 2021).

Kestabilan lereng pada tambang terbuka dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik yang bersifat internal maupun eksternal. Faktor internal meliputi sifat fisik dan mekanik material penyusun lereng, seperti kohesi, sudut geser dalam, densitas, serta struktur geologi seperti bidang diskontinuitas. Sementara itu, faktor eksternal mencakup kondisi lingkungan seperti curah hujan, infiltrasi air, serta aktivitas penambangan yang dapat mengubah kondisi tegangan pada massa batuan. Interaksi antara faktor-faktor tersebut menyebabkan kondisi lereng menjadi dinamis dan rentan terhadap perubahan kestabilan dari waktu ke waktu (Hoek & Marinos, 2000).

Salah satu faktor penting yang sering menjadi penyebab utama penurunan kestabilan lereng adalah keberadaan zona degradasi atau zona pelapukan pada massa batuan. Zona ini terbentuk akibat proses pelapukan fisik, kimia, maupun biologis yang berlangsung secara terus-menerus pada batuan yang terpapar lingkungan atmosfer. Proses pelapukan tersebut menyebabkan perubahan karakteristik batuan menjadi lebih lemah, baik dari segi kekuatan maupun kekakuan. Akibatnya,

zona degradasi sering kali menjadi bidang lemah yang berpotensi menjadi bidang gelincir dalam mekanisme kelongsoran lereng (Irnissa et al., 2023).

Pelapukan batuan sendiri merupakan proses alami yang tidak dapat dihindari, terutama pada kondisi tambang terbuka di mana batuan langsung terpapar oleh udara, air, dan perubahan suhu. Proses ini dapat menyebabkan disintegrasi (pemecahan fisik) maupun dekomposisi (perubahan kimia) pada mineral penyusun batuan. Seiring waktu, batuan yang semula kompak akan berubah menjadi material yang lebih lunak dan mudah terurai. Selain itu, infiltrasi air hujan juga mempercepat proses pelapukan dengan melarutkan mineral-mineral tertentu dan meningkatkan tekanan pori dalam massa batuan, sehingga memperburuk kondisi kestabilan lereng (Irnissa et al., 2023).

Dalam konteks pertambangan, aktivitas operasional seperti penggalian dan pemberaian material juga berkontribusi terhadap terbentuknya zona degradasi. Metode pemberaian yang menggunakan alat mekanis maupun peledakan dapat menyebabkan gangguan pada struktur batuan, yang dikenal sebagai disturbance. Gangguan ini menyebabkan perubahan sifat mekanik batuan, seperti penurunan kohesi dan sudut geser dalam, sehingga membentuk zona terganggu di sekitar permukaan lereng. Tingkat gangguan ini umumnya dinyatakan dalam parameter disturbance factor (D), yang memiliki rentang nilai antara 0 hingga 1, tergantung pada metode penggalian yang digunakan (Hoek & Marinos, 2000).

Konsep disturbance factor (D) menjadi sangat penting dalam analisis geoteknik karena digunakan untuk memperkirakan tingkat kerusakan massa batuan akibat aktivitas penambangan. Nilai D yang lebih tinggi menunjukkan tingkat gangguan yang lebih besar, yang berarti kondisi batuan semakin melemah. Dalam praktiknya, nilai D sering kali diasumsikan konstan hingga kedalaman tertentu karena keterbatasan data lapangan dalam mengukur distribusi gangguan secara detail. Pendekatan ini dianggap cukup representatif untuk menggambarkan kondisi zona degradasi dalam analisis kestabilan lereng (Cundall & Damjanac, 2014).

Selain konsep disturbance factor, terdapat pula konsep Fully Disturbed Limit (FDL) dan Undisturbed Limit (UDL) yang digunakan untuk menggambarkan distribusi zona terganggu dalam massa batuan. FDL merupakan batas kedalaman di mana massa batuan mengalami gangguan penuh akibat aktivitas penambangan, sedangkan UDL merupakan batas di mana batuan dianggap tidak terganggu. Di antara kedua batas tersebut terdapat zona transisi di mana tingkat gangguan berkurang secara bertahap seiring dengan bertambahnya kedalaman. Pemahaman terhadap distribusi zona ini sangat penting dalam menentukan model geoteknik yang akurat (Ma et al., 2022).

Penentuan kedalaman zona degradasi atau FDL dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan matematis yang menghubungkan tinggi lereng, kedalaman titik yang dianalisis, serta nilai disturbance factor. Persamaan ini memungkinkan peneliti untuk memperkirakan sejauh mana pengaruh gangguan akibat penambangan terhadap massa batuan. Dengan mengetahui kedalaman zona degradasi, maka dapat dilakukan evaluasi terhadap potensi bidang gelincir serta mekanisme kelongsoran yang mungkin terjadi pada lereng highwall (Dagdelenler et al., 2020).

Dalam perencanaan lereng tambang, keberadaan zona degradasi sering kali menjadi faktor yang menentukan dalam desain geometri lereng. Lereng yang tidak mempertimbangkan keberadaan zona ini cenderung memiliki tingkat risiko kegagalan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, analisis kestabilan lereng harus memasukkan parameter yang merepresentasikan kondisi zona degradasi, seperti penurunan nilai kohesi dan sudut geser dalam pada lapisan permukaan. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan desain lereng yang lebih realistis dan aman (Saptono, 2021).

Penggunaan perangkat lunak geoteknik seperti Slide 6.0 juga menjadi bagian penting dalam analisis kestabilan lereng modern. Software ini memungkinkan pemodelan kondisi lereng secara lebih kompleks dengan mempertimbangkan berbagai parameter geoteknik serta kondisi geometri lereng. Dengan bantuan perangkat lunak ini, zona degradasi dapat dimodelkan sebagai lapisan dengan sifat mekanik yang berbeda, sehingga analisis faktor keamanan lereng dapat dilakukan dengan lebih akurat (Ma et al., 2022).

PT Karya Putra Borneo sebagai salah satu perusahaan tambang batubara yang menerapkan metode tambang terbuka memiliki tantangan dalam menjaga kestabilan lereng highwall, khususnya di area Pit North. Aktivitas penambangan yang intensif serta kondisi lingkungan yang mendukung proses pelapukan menjadikan potensi terbentuknya zona degradasi semakin besar. Oleh karena itu, diperlukan kajian khusus untuk menentukan kedalaman zona degradasi serta memahami perannya dalam mempengaruhi kestabilan lereng (Cundall & Damjanac, 2014).

Penelitian mengenai zona degradasi ini menjadi penting karena dapat memberikan informasi dasar dalam pengambilan keputusan terkait desain lereng tambang. Dengan mengetahui kedalaman dan karakteristik zona degradasi, perusahaan dapat merancang geometri lereng yang lebih aman serta menentukan strategi mitigasi risiko yang tepat, seperti pengaturan sudut lereng, pembuatan drainase, maupun penguatan lereng (Hoek & Marinos, 2000).

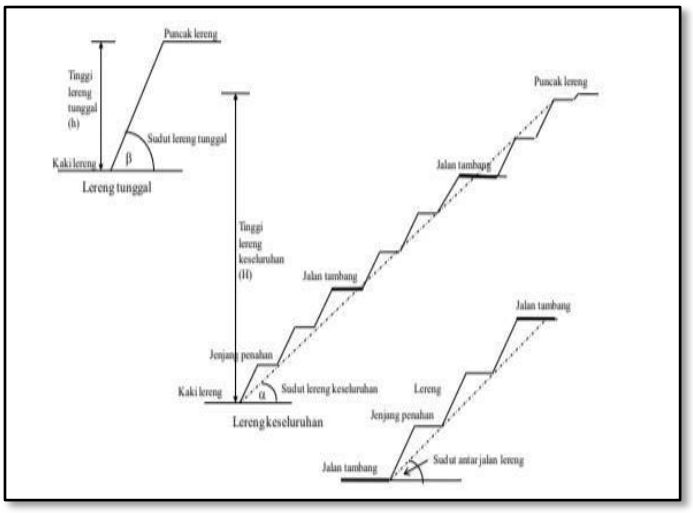
Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu geoteknik pertambangan, khususnya dalam pemodelan zona degradasi pada lereng tambang terbuka. Studi ini dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dalam mengkaji hubungan antara disturbance factor, kedalaman zona degradasi, serta kestabilan lereng pada berbagai kondisi geologi dan metode penambangan (Dagdelenler et al., 2020).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menentukan kedalaman zona degradasi atau Fully Disturbed Limit (FDL) pada lereng highwall di Pit North PT Karya Putra Borneo, serta menganalisis pengaruhnya terhadap kestabilan lereng. Dengan menggunakan pendekatan kuantitatif dan pemodelan geoteknik, diharapkan penelitian ini dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai peran zona degradasi dalam mekanisme kelongsoran lereng serta menjadi dasar dalam perencanaan lereng tambang yang lebih aman dan efektif (Ma et al., 2022).

TINJAUAN PUSTAKA

Tambang terbuka tersusun dari sekumpulan lereng, yaitu terdiri dari lereng tunggal dan lereng keseluruhan, dengan dimensi tinggi lereng tunggal (h) dan tinggi lereng keseluruhan (H), sudut lereng tunggal (β) dan sudut lereng keseluruhan (α). Tinggi lereng (h, H) adalah jarak vertikal dari bidang kaki (*toe*) hingga puncak lereng (crest), dan sudut lereng (β, α) adalah sudut yang dibuat antara garis yang menghubungkan kaki dan puncak lereng dengan garis horisontal. Pada lereng keseluruhan terdapat daerah yang menghubungkan antar lereng dikenal dengan jenjang penahan (*catch berm*) dan bagian lereng untuk jalan tambang yaitu *ramp* (Saptono, 2021).

Tanah merupakan hasil dari proses pelapukan yang terjadi pada batuan. Batuan yang berada di atas permukaan bumi akan mengalami perubahan secara terus-menerus karena adanya pengaruh dari lingkungan. Perubahan cuaca, suhu, dan tekanan udara dapat menyebabkan batuan memuai, kemudian pecah menjadi batuan-batuan yang lebih kecil. Batuan yang pecah tersebut lama-kelamaan akan menjadi butiran-butiran halus. (Irnissa, dkk 2023).



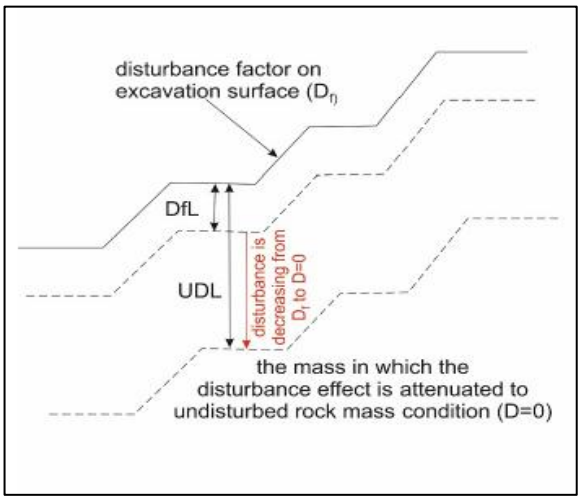
Gambar 1. Bagian Lereng di Tambang Terbuka (Kliche, 1999)

Degradasi tanah adalah proses penurunan produktivitas tanah, baik yang sifatnya sementara maupun tetap. Secara lebih rinci, pelapukan dapat didefinisikan sebagai proses disintegrasi dan dekomposisi, yaitu pelapukan secara fisik dan kimia pada batuan atau bahan induk. Pelapukan terjadi karena mineral-mineral yang terkandung di dalam batuan berada dalam kondisi tidak stabil di bawah suhu, tekanan, dan kelembaban lingkungan atmosfer–litosfer tempat batuan tersebut berada, sehingga mineral tersebut berubah menjadi bentuk yang lebih stabil pada kondisi tersebut. Proses pelapukan merupakan tahap awal dari pembentukan tanah (*soil formation*). Pada tahap ini, zat padat pada batuan mengalami perubahan menjadi material yang lebih halus secara bertahap. (Irnissa, dkk 2023).

Terdapat banyak asumsi berbeda yang tersedia bagi para praktisi untuk mengkuantifikasi luas wilayah yang rusak dan nilai D yang terdistribusi di dalam wilayah kerusakan pada suatu massa batuan. Karena sulitnya mengkalibrasi distribusi D menggunakan data lapangan nyata, nilainya sering diasumsikan seragam hingga kedalaman tertentu (Cundall dan Damjanac, 2014).

Dapat dilihat pada gambar 2, zona FDL/DFL dan UDL masing-masing adalah kedalaman di belakang muka lereng dari batas terganggu penuh dan batas tidak terganggu, H adalah tinggi lereng keseluruhan, dan z adalah kedalaman titik yang sedang dievaluasi (Ma et al., 2022).

$$D = \frac{\ln(H) - \ln(z)}{-\ln(\frac{FDL}{H})} \quad \text{(I)}$$

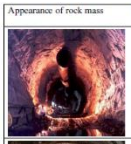


Gambar 2. Zona *Fully Disturbed Limit* (FDL) dan *Undisturbed Limit* (UDL), (Dagdelenler dan Sonmez, 2025)

Dalam persamaan gangguan transisional yang diperkenalkan oleh Dagdelenler, DfL mewakili titik ekstremum antara wilayah dengan penurunan gangguan yang lebih rendah dan wilayah dengan penurunan yang lebih signifikan. Hingga kedalaman yang sesuai dengan DfL, metode penggalian memainkan peran dominan terhadap gangguan, sedangkan UDL terutama dipengaruhi oleh pengurangan tegangan yang diakibatkan oleh pelepasan tegangan (*stress relief*).

Nilai faktor ketergangguan atau *distrubance factor* (D) mengacu pada tabel Hoek and Marinos (2000), yang mana nilai D memiliki rentang 0 hingga 1. Nilai ketergangguan ditentukan dengan melihat proses pemberaian material menggunakan peledakan atau peralatan mekanis. Pemberaian material di PT Putra Karya Borneo menggunakan peralatan mekanis berupa excavator dan bulldozer sehingga nilai *Disturbance Factor* (D) yang digunakan yaitu 0,7. Pada Penelitian kali ini nilai *Disturbance Factor* (D) digunakan untuk menghitung kedalaman material yang terdegradasi atau mengalami pelapukan.

Tabel 1. *Disturbed Factor* (Hoek and Marinos, 2000)

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of *D*
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	*D* = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	*D* = 0 *D* = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	*D* = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	*D* = 0.7 Good blasting *D* = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal. In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	*D* = 1.0 Production blasting *D* = 0.7 Mechanical excavation

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang bertujuan untuk menganalisis kedalaman zona degradasi serta pengaruhnya terhadap kestabilan lereng highwall di Pit North PT Karya Putra Borneo. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini berfokus pada pengolahan data numerik berupa parameter geoteknik dan geometri lereng, serta perhitungan matematis untuk menentukan kedalaman zona degradasi. Metode ini memungkinkan analisis yang lebih objektif dan terukur dalam mengevaluasi kondisi lereng serta potensi ketidakstabilannya (Sugiyono, 2019).

Penelitian dilakukan melalui tiga tahapan utama, yaitu tahap pra-lapangan, tahap pengumpulan data, dan tahap analisis data. Tahap pra-lapangan meliputi studi literatur yang berkaitan dengan kestabilan lereng, konsep disturbance factor (D), serta teori Fully Disturbed Limit (FDL) dan Undisturbed Limit (UDL). Studi literatur ini bertujuan untuk memperoleh dasar teoritis yang kuat dalam melakukan analisis serta memastikan bahwa metode yang digunakan sesuai dengan perkembangan ilmu geoteknik pertambangan (Hoek & Marinos, 2000).

Pada tahap pengumpulan data, penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari pihak perusahaan. Data tersebut meliputi geometri lereng (tinggi lereng tunggal dan keseluruhan, sudut lereng), serta parameter geoteknik material seperti kohesi, sudut geser dalam, dan berat jenis. Data geometri lereng digunakan untuk menentukan kondisi aktual lereng highwall, sedangkan parameter geoteknik digunakan dalam analisis kestabilan lereng dan pemodelan zona

degradasi. Penggunaan data sekunder dalam penelitian geoteknik merupakan pendekatan yang umum dilakukan, terutama ketika data lapangan telah tersedia dan terverifikasi oleh perusahaan (Saptono, 2021).

Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan kondisi operasional penambangan yang mempengaruhi tingkat gangguan massa batuan. Aktivitas pemberaian material di lokasi penelitian dilakukan menggunakan alat mekanis seperti excavator dan bulldozer. Berdasarkan kondisi tersebut, nilai disturbance factor (D) ditentukan sebesar 0,7, mengacu pada klasifikasi yang dikemukakan oleh Hoek dan Marinos (2000), di mana nilai tersebut mencerminkan tingkat gangguan menengah hingga tinggi akibat metode penggalian mekanis. Penentuan nilai D ini menjadi parameter penting dalam menghitung kedalaman zona degradasi (Hoek & Marinos, 2000).

Tahap analisis data dilakukan dengan menggunakan pendekatan matematis dan pemodelan geoteknik. Penentuan kedalaman zona degradasi atau Fully Disturbed Limit (FDL) dilakukan dengan menggunakan persamaan distribusi disturbance factor yang menghubungkan tinggi lereng (H), kedalaman titik yang dianalisis (z), serta nilai disturbance factor (D). Persamaan ini digunakan untuk menentukan batas kedalaman di mana massa batuan mengalami gangguan penuh akibat aktivitas penambangan. Pendekatan ini banyak digunakan dalam studi geoteknik karena mampu menggambarkan distribusi gangguan secara logaritmik terhadap kedalaman (Dagdelenler et al., 2020).

Setelah kedalaman zona degradasi diperoleh, tahap selanjutnya adalah melakukan pemodelan lereng menggunakan perangkat lunak Slide 6.0. Software ini digunakan untuk mensimulasikan kondisi lereng dengan memasukkan parameter geometri dan geoteknik yang telah diperoleh. Dalam pemodelan ini, zona degradasi dimasukkan sebagai lapisan dengan sifat mekanik yang lebih lemah dibandingkan lapisan di bawahnya, sesuai dengan karakteristik material yang telah mengalami pelapukan dan gangguan. Penggunaan software geoteknik seperti Slide 6.0 memungkinkan analisis kestabilan lereng dilakukan secara lebih komprehensif dan akurat (Ma et al., 2022).

Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan metode keseimbangan batas (limit equilibrium method), yang merupakan metode umum dalam evaluasi stabilitas lereng. Metode ini menghitung faktor keamanan (factor of safety) dengan membandingkan gaya penahan terhadap gaya penggerak pada bidang gelincir potensial. Dalam penelitian ini, keberadaan zona degradasi dianalisis sebagai salah satu faktor yang mempengaruhi penurunan faktor keamanan lereng, karena zona tersebut memiliki nilai kohesi dan sudut geser dalam yang lebih rendah dibandingkan material asli (Cundall & Damjanac, 2014).

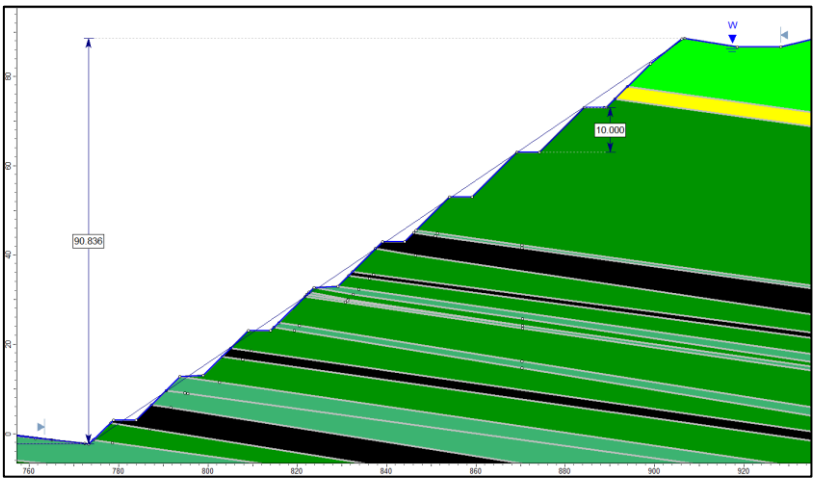
Untuk meningkatkan keakuratan hasil analisis, asumsi yang digunakan dalam penelitian ini disesuaikan dengan kondisi lapangan dan literatur yang relevan. Salah satu asumsi yang digunakan adalah distribusi nilai disturbance factor yang dianggap seragam hingga kedalaman tertentu, mengingat keterbatasan data lapangan dalam menentukan distribusi gangguan secara rinci. Pendekatan ini telah banyak digunakan dalam studi sebelumnya dan dianggap cukup representatif untuk menggambarkan kondisi zona degradasi pada lereng tambang terbuka (Cundall & Damjanac, 2014).

Hasil dari analisis kemudian divisualisasikan dalam bentuk penampang lereng yang menunjukkan posisi dan kedalaman zona degradasi. Visualisasi ini bertujuan untuk mempermudah interpretasi hasil serta memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan antara zona degradasi dan potensi kelongsoran lereng. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya memberikan nilai numerik kedalaman zona degradasi, tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran zona tersebut dalam kestabilan lereng (Ma et al., 2022).

Secara keseluruhan, metode penelitian ini dirancang untuk mengintegrasikan pendekatan teoritis, analisis matematis, serta pemodelan numerik dalam satu kerangka kerja yang sistematis. Dengan pendekatan ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan gambaran yang akurat dan dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan lereng tambang yang lebih aman dan efisien, khususnya dalam mempertimbangkan keberadaan zona degradasi sebagai faktor kritis dalam kestabilan lereng (Dagdelenler et al., 2020).

HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

Berdasarkan hasil dari pengamatan penampang yang dapat dilihat pada gambar 3 didapatkan tinggi lereng keseluruhan yaitu 90.836 m dan tinggi lereng tunggal yaitu 10 m dengan nilai *disturbed factor* (D) yaitu 0,7 ini dikarenakan pemberaian material di PT Karya Putra Borneo menggunakan peralatan mekanis berupa excavator dan bulldozer. Hasil dari perhitungan yang menggunakan rumus 1 dapat dilihat pada tabel 1 dimana didapatkan zona degradasi yaitu 3,9 meter dari permukaan lereng.

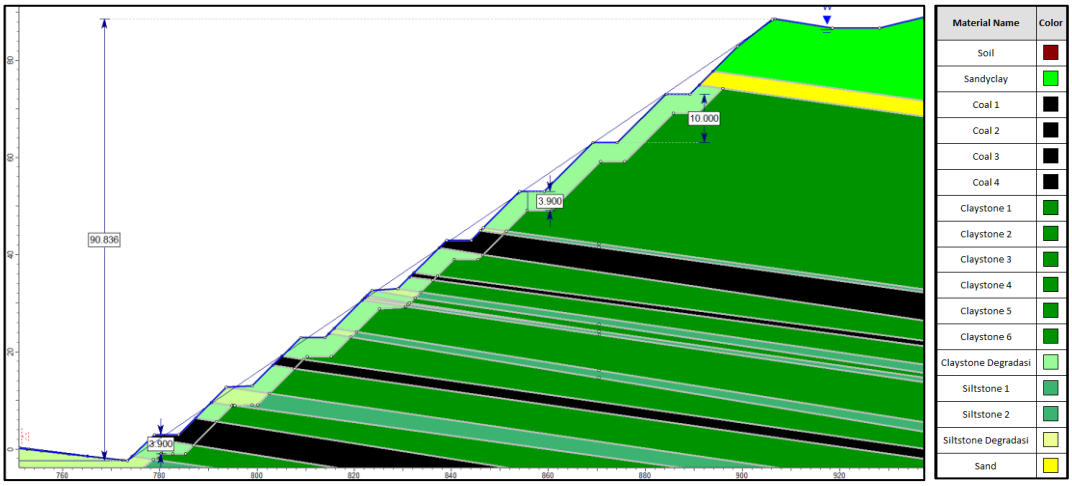


Gambar 3. Sayatan Lereng *Highwall*

Tabel 2. Kedalaman Zona Degradasi

H (m)	z (m)	D	FDL (m)
90.836	10	0.7	3.9

Hasil penambahan zona degradasi dapat dilihat pada gambar 2 dimana digunakan software slide 6.0 untuk menambahkan zona degradasi atau FDL dengan kedalaman 3,9 m. Zona degradasi tersebut membentuk lapisan permukaan yang relatif lebih lemah dibandingkan lapisan di bawahnya.



Gambar 4. Lereng *Highwall* dengan Zona Degradasi

Zona degradasi atau *Fully Disturbed Limit* (FDL) dengan kedalaman sekitar 3,9 m merupakan salah satu faktor utama yang mengontrol kestabilan lereng. Zona ini terbentuk akibat proses pelapukan dan infiltrasi air yang dominan terjadi pada bagian permukaan, sehingga menghasilkan lapisan material yang memiliki karakteristik berbeda dibandingkan material di bawahnya. Keberadaan zona degradasi ini sangat penting karena berpotensi menjadi bidang lemah yang mengontrol mekanisme kelongsoran.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, zona degradasi atau *Fully Disturbed Limit* (FDL) pada lereng *highwall* di Pit North PT Karya Putra Borneo berkembang hingga kedalaman sekitar 3,9 meter dari permukaan lereng. Zona ini terbentuk akibat proses pelapukan dan infiltrasi air yang menyebabkan penurunan kualitas material, khususnya pada parameter kuat geser. Keberadaan zona degradasi menghasilkan lapisan permukaan yang relatif lebih lemah dibandingkan lapisan di bawahnya, sehingga berpotensi menjadi bidang lemah yang mengontrol mekanisme kelongsoran. Dengan demikian, kedalaman dan posisi zona degradasi merupakan faktor utama yang mempengaruhi kestabilan lereng, sehingga identifikasi zona ini sangat penting dalam analisis geoteknik dan perencanaan lereng tambang.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang membantu dalam penelitian ini sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan baik dan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anjani, A. P., & Radityo, D. (2025). Slope stability analysis of disposal "X" in an open-pit coal mining area, Balangan Regency, South Kalimantan. *Jurnal Ilmiah Geologi PANGEA*, 12(2). https://doi.org/10.31315/jigp.v12i2.15934 (Jurnal UPN Veteran Yogyakarta)
2. Azzuhry, Y. (2016). Stability analysis and failure mechanisms of open pit rock slope. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 2(3). https://doi.org/10.22146/jcef.26589 (Jurnal Universitas Gadjah Mada)
3. Azizi, M. A., Kramadibrata, S., Wattimena, R. K., & Sidi, I. D. (2014). Risk assessment of open pit slope design at PT Adaro Indonesia. *Indonesian Mining Journal*, 17(3). https://doi.org/10.30556/imj.Vol17.No3.2014.317 (Jurnal Tekmira)
4. Devy, S. D., & Hutahayan, P. P. (2021). Groundwater effect on slope stability in open pit mining: A case of West Kutai Regency. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 6(4). https://doi.org/10.25299/jgeet.2021.6.4.6226 (UIR Press Journal)
5. Deny, T. T., & Hariyadi, S. (2021). Stability study of open mine slopes at PIT 22 GN PT Kitadin Site Embalut. *Indonesian Mining Journal*, 24(1). https://doi.org/10.30556/imj.Vol24.No1.2021.1044 (Jurnal Tekmira)
6. Fahrezi, M. A., Zakaria, Z., Khoirullah, N., & Laksana, P. (2025). Landslide probability in the east Asam dump in pit area. *Indonesian Mining Journal*, 28(1). https://doi.org/10.30556/imj.Vol28.No1.2025.1628 (Jurnal Tekmira)
7. Fandy, P. M., Hutagalung, M. J., Tambing, F. S., Sahetapy, G. B., & Sanggamele, H. (2023). Analysis of limestone quarry slope stability, Papua. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 5(3). https://doi.org/10.55338/saintek.v5i3.2375 (JOS168)
8. Irianto, I., & Afasedanya, M. T. (2024). Stability of open mine slope using the limit equilibrium method. *INTAN Jurnal Penelitian Tambang*, 8(2). https://doi.org/10.56139/intan.v8i2.316 (Intan Jurnal Penelitian Tambang)
9. Najib, N., Belia, N. P., Hidayatillah, A. S., & Nugroho, K. S. A. (2024). Coal mine slope stability analysis using RMR and SMR method. *TEKNIK*, 45(2). https://doi.org/10.14710/teknik.v45i2.57786 (Undip E-Journal System)
10. Suratha, I. G. (2007). Numerical modelling and slope stability analysis for optimizing open pit coal mine. *Indonesian Mining Journal*, 10(1). https://doi.org/10.30556/imj.Vol10.No1.2007.626 (Jurnal Tekmira)
11. Seyed Mousavi, S. M., Rezaei, M., & others. (2024). Slope stability analysis considering weathering effects. *Engineering Geology*, 333. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107503 (ScienceDirect)
12. Hoek, E., & Marinos, P. (2000). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunnelling International*. https://doi.org/10.1201/9781315274980
13. Cundall, P. A., & Damjanac, B. (2014). Rock mass characterization using Hoek-Brown criterion. https://doi.org/10.13140/2.1.4475.0408
14. Ma, T., Cami, B., Javankhoshdel, S., Yacoub, T., Corkum, B., & Curran, J. (2022). Effect of disturbance factor distribution on open pit stability. https://doi.org/10.56952/ARMA-2022-0194
15. Dagdelenler, G., Sonmez, H., & Saroglou, C. (2020). Flexible system for rock excavation method selection. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79. https://doi.org/10.1007/s10064-020-01827-1
16. Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). Rock slope engineering. https://doi.org/10.1201/9781482291888
17. Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). Soil strength and slope stability. https://doi.org/10.1002/9781118651650
18. Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*. https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387
19. Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. https://doi.org/10.1002/9780470172759
20. Zhou, W., & others. (2023). Weathering effects on rock slope stability. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2023.105321
21. Song, D., & others. (2021). Mechanical degradation of rock due to weathering. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106012
22. Li, X., & others. (2020). Numerical simulation of slope stability. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103834
23. Su, Y., & Shao, L. (2021). 3D slope stability analysis in mining. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104742
24. Kong, X., & others. (2023). Rock mass degradation and slope instability. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107112
25. Zhang, Y., & others. (2022). Strength reduction in weathered rock slope. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2022.104923
26. Wen, H., & others. (2015). Slope stability under freeze-thaw cycles. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.04.010
27. Luo, Y., & others. (2015). Stability of open pit slopes after weathering. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.012
28. Korshunov, V., & others. (2016). Numerical modelling of slope degradation. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.02.014