

ANALISIS PENGARUH PERSISTENSI BIDANG DISKONTINU TERHADAP KESTABILAN LERENG BATUAN TERKEKARKAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

The Analysis of Discontinuity Persistence Effect on Slope Stability of Jointed Rock Masses Using Finite Element Method

Donal R. Nainggolan¹, S. Koesnaryo², dan Barlian Dwinagara³

Magister Teknik Pertambangan Universitas Pembangunan Nasional (UPN) "Veteran"

Jln. Ring Road Utara No. 104 Yogyakarta 55283

Telp/Faks: 0274486369

E-mail: donalnainggolan@gmail.com¹, koesnaryo_s@yahoo.co.id², barlian_dn@yahoo.com³

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan pada kuari tambang batuan andesit, memiliki lereng tunggal dengan ketinggian 46m-48m dengan kemiringan 86° - 90° . Kondisi massa batuan terkekarkan dengan panjang kekar yang terekam sepanjang *scanline* antar 0,5 m-17m, sedangkan spasi kekar antara 6cm-190cm. Pada kedalaman yang rendah, terjadinya longsoran lebih dikendalikan oleh adanya diskontinuitas. Kestabilan lereng penelitian ini di berdasarkan kondisi persistensi (K) bidang diskontinu. Persistensi (K) adalah rasio antara panjang kekar (JL) terhadap panjang bidang lurcur, bidang lurcur merupakan gabungan panjang kekar dan *rock bridge*. *Rock bridge* (RBR) didefinisikan sebagai batuan utuh yang memisahkan bidang diskontinu *coplanar* dan *non-coplanar* dalam massa batuan. Untuk mengetahui pengaruh persistensi bidang diskontinu terhadap kestabilan lereng maka dilakukan pemodelan persistensi dengan menggunakan JL rata-rata hasil pengukuran dan di analisis dengan metode elemen hingga (*finite element*). Hasil ahir penelitian diperoleh bahwa kenaikan rata-rata persistensi 10% memengaruhi penurunan faktor keamanan (FK) sebesar 6,7%, kenaikan nilai probabilitas longsor (PL) sebesar 59%, serta kenaikan tegangan normal sebesar 7,3%. Perubahan nilai FK dan PL cukup signifikan ketika persistensi lebih besar daripada 80%.

Kata Kunci: *persistensi, rock bridge, faktor keamanan, probabilitas longsor, metode elemen hingga*

ABSTRACT

This research was conducted in an quarry andesite mining, which has a single slope with a height of 46m-48m. the degree of slope approximately from 86° - 90° . The rock mass condition at the research location is a jointed rock with joint length was recorded along the scanline between 0.5 m-17m and have a joint spacing between 6cm-190cm. At shallow depths, the rock failure are more controlled by discontinuities. The research is concern on the relationship between slope stability and the persistence condition (K) of the discontinuous. Persistence (K) is the ratio between the joint length (JL) to the length of the failure plane, the failure plane is a combination of the length of joint and the rock bridge. Rock bridge (RBR) is defined as an area of intact rock that separates coplanar and non-coplanar discontinuous planes in the rock mass. To determine the effect of discontinuous persistence on slope stability, persistence modeling was carried out using the average of joint length measurement results and analyzed using the finite element method. The final results of the study showed that an increase in the average persistence of 10% affected a decrease in the safety factor

(FK) by 6.7%, an increase in the value of landslide probability (PL) by 59%, and an increase in normal stress by 7.3%. There was a significant change in FK and PL when the persistence is greater than 80%.

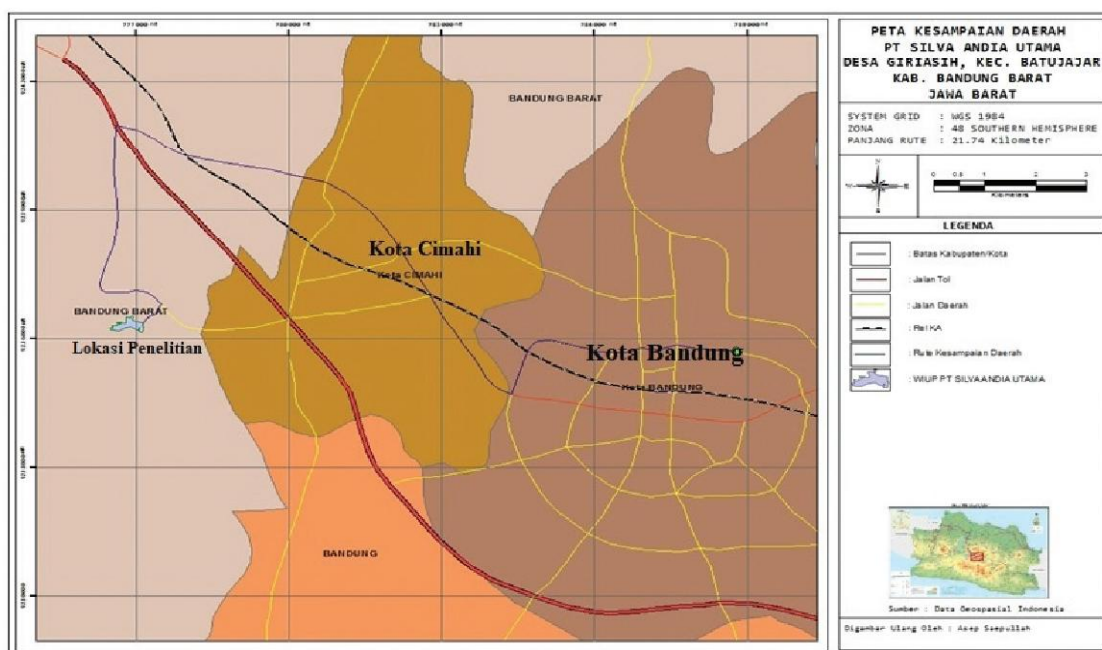
Keyword: persistence, rock bridge, safety factor, probability of failure, finite element method

PENDAHULUAN

Kestabilan lereng penambangan dipengaruhi oleh sifat fisik dan mekanik batuan, kondisi air tanah, karakteristik massa batuan, serta struktur yang ada pada batuan. Kekar merupakan struktur yang paling sering ditemukan pada batuan beku, sering disebut juga sebagai bidang diskontinu.

Salah satu parameter yang penting dalam kekar adalah kondisi persistensi. Persistensi bidang diskontinu memiliki efek besar pada kekuatan massa batuan³⁾.

Pada penelitian persistensi kekar lereng dangkal ($\pm 30\text{m}$) diperoleh bahwa persistensi akan meningkatkan probabilitas kelongsoran lereng yang nilainya sama dengan rata-rata kenaikan persistensi itu sendiri³⁾. Pada pengujian skala laboratorium batuan yang memiliki dimensi *rock bridge* paling kecil di sepanjang jalur rekahan memiliki percepatan keruntuhan terbesar⁹⁾. Semakin banyak fraksi kekar (kekar terputus-putus) pada spesimen batuan terkekarkan maka tegangan akan lebih tersebar di dalam spesimen sehingga menghasilkan *failure stress* yang tinggi¹⁹⁾.



Gambar 1.1 Peta Kesampaian Lokasi Penelitian (Sumber: PT Silva Andina Utama)

Pada batuan yang terdapat banyak segmen kekar, tegangan lebih terdistribusi dalam batuan utuh yang membatasi kekar tersebut. Ketika ada gaya dari luar, akan terjadi perambatan rekahan pada batuan. Jika perambatan ini semakin berkembang maka berpotensi sebagai jalur keruntuhan.

Pada perhitungan numerik elemen hingga, penurunan FK ditandai dengan meningkatnya distorsi atau *distributions of maximum shear strain*, pada area yang memiliki intensitas distorsi terbesar menunjukkan permukaan slip atau bidang lurcur²⁾.

Analisis kestabilan lereng tambang dapat dilakukan dengan berbagai metode. Metode yang dimaksud adalah metode analitik, metode grafik, metode stereografis, metode kesetimbangan batas, metode numerik (metode elemen hingga, elemen diskret, elemen batas, dan lain sebagainya), metode probabilistik, teori blok maupun sistem pakar, serta metode pemodelan fisik⁵⁾.

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pengaruh persistensi kekar terhadap kondisi kestabilan lereng batuan andesit terkekarkan menggunakan variasi persistensi 0, 50%, 60%, 70%, 80% dan 90% menggunakan metode elemen hingga. Hasil penelitian akan diperoleh pengaruh persistensi terhadap kestabilan lereng batuan terkekarkan, status kestabilan lereng penelitian, dan sebagai masukan bagi perencana tambang atau insinyur geoteknik pada saat perencanaan geometri lereng penambangan atau pada analisis kestabilan lereng batuan terkekarkan.

Kondisi Umum

Penelitian dilakukan di tambang batuan andesit PT Silva Andia Utama (PT SAU). Secara administratif lokasi terletak di perbukitan Gunung Padakasih, Kampung Pasir Paku, Desa Giri Asih, Kecamatan Batujajar, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat. Letak geografisnya adalah $6^{\circ} 56' 32,4'' - 6^{\circ} 56' 38,85''$ LS dan $107^{\circ} 30' 00'' - 107^{\circ} 30' 08''$ BT.

Untuk sampai ke lokasi penelitian PT SAU dapat ditempuh dengan berbagai jenis kendaraan bermotor, baik roda dua maupun roda empat. Lokasi penelitian berjarak 7,4 km dari ibu kota Kabupaten Bandung Barat, 27 km dari pusat kota Provinsi Jawa Barat, dan 146 km dari ibu kota negara Republik Indonesia.

Daerah penyelidikan memperlihatkan bentuk topografi perbukitan batuan andesit dengan ketinggian berkisar antara 600 sampai dengan 800 meter di atas permukaan laut (dpml). Berdasarkan distribusi zona fisiografi Van Bemmelen (1949), area penelitian termasuk zona fisiografi dari Bandung¹⁸⁾.

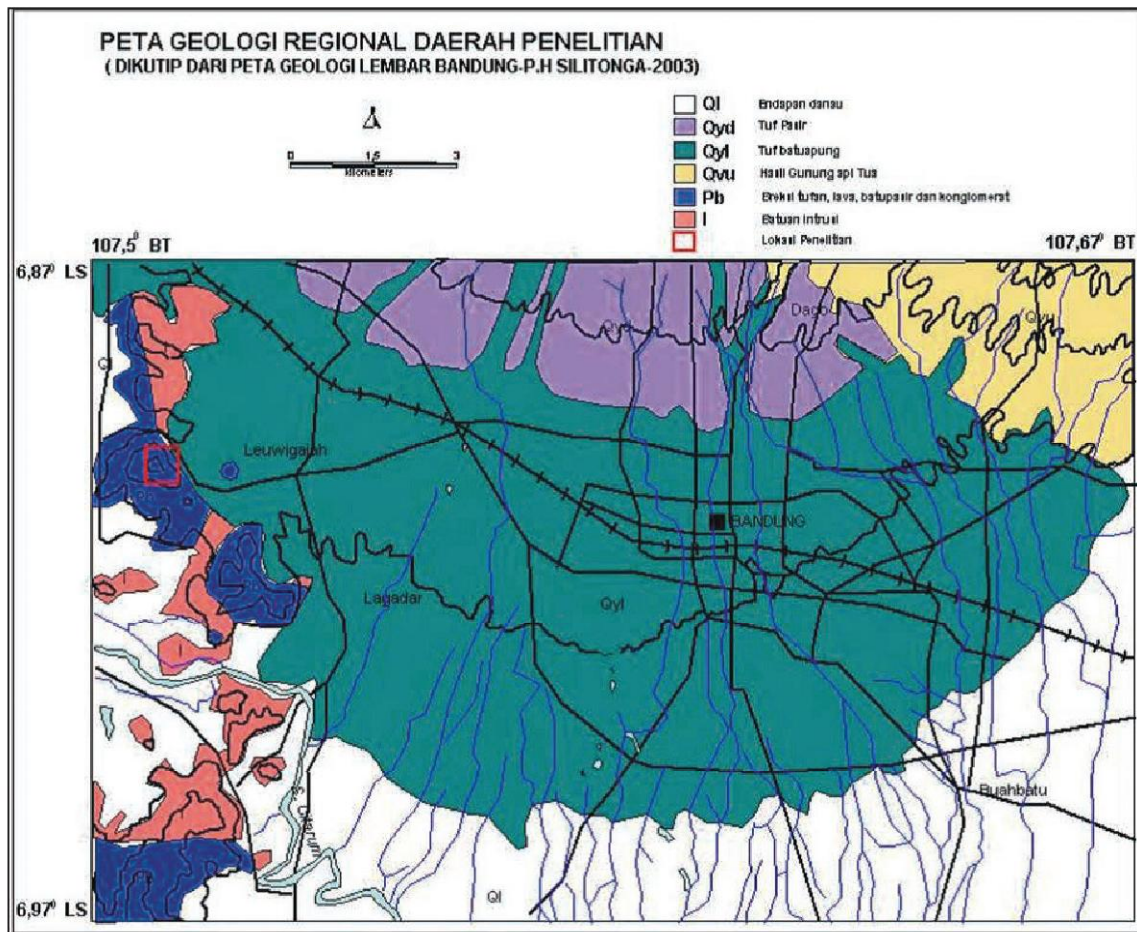


Gambar 1.2 Topografi Lokasi Penelitian (Dokumentasi Penelitian)

Stratigrafi Regional

Berdasarkan literatur, di daerah ini ditemukan dua formasi sebagai batuan vulkanik dan intrusi di barat daya¹²⁾. Peta Geologi daerah Bandung dari batuan muda ke batuan tua adalah sebagai berikut¹⁸⁾:

1. Breksi tufa, lava, batu pasir, dan konglomerat. Formasi batuan bentuknya *ridge* tidak beraturan, kadang-kadang sangat curam dan memiliki umur pliosen.
2. Andesit, umumnya terdiri dari *augite*, *hypersthene hornblende porphyry*, dan *leucocitic andesite*, serta *feldspar* dan *glass* di periode dasar.



Gambar 1.3 Peta Geologi Regional Batujajar¹⁸⁾

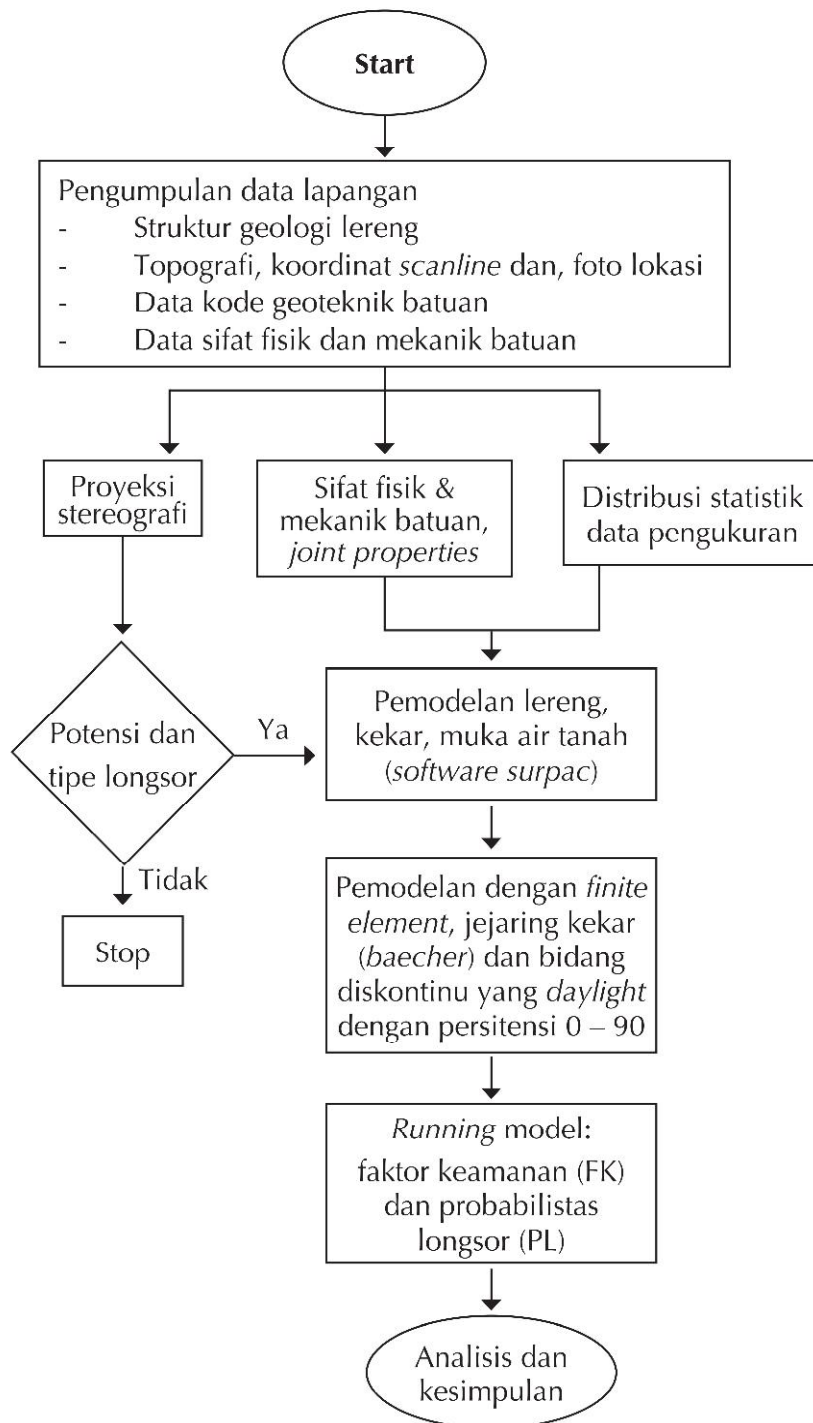
METODOLOGI

Penelitian dilakukan di lokasi tambang batuan andesit PT SAU di Batujajar. Data penelitian yang diambil meliputi: data topografi, pemetaan struktur diskontinu, serta pengujian sifat fisik dan mekanik batuan sesuai standar ISRM 1981.

Hasil pemetaan struktur dianalisis menggunakan analisis kinematik dengan menggunakan perangkat lunak *Dips*. Data pengujian sampel batuan laboratorium dianalisis dengan perangkat lunak *RocLab* untuk mendapatkan parameter kekuatan massa batuan.

Sebelum memodelkan persistensi bidang diskontinu, terlebih dahulu memodelkan topografi lokasi penelitian dan struktur diskontinuitas hasil pengukuran dengan perangkat lunak *surpac*. Hasilnya berupa model 3D, kemudian dilanjutkan dengan membuat irisan 2D untuk proses pemodelan persistensi bidang diskontinu (Gambar 4.3).

Tahapan akhir adalah pemodelan irisan lereng dengan parameter batuan hasil pengujian serta variasi persistensi (gambar 4.4 hingga 4.9). Analisis pengaruh persistensi ini menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak *Rockscience RS2*. Alur proses kegiatan yang dilakukan di jelaskan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Alur Proses Kegiatan

KESTABILAN LERENG

Kondisi alamiah tanah maupun batuan umumnya berada dalam keadaan setimbang. Artinya, keadaan distribusi tegangan pada tanah atau batuan tersebut dalam keadaan stabil. Pada tambang terbuka, rancangan stabilitas lereng merupakan masalah utama dan tantangan perencanaan dalam operasi penambangan. Perencana tambang diharuskan memiliki pengetahuan khusus terkait parameter atau karakteristik batuan yang seringkali sangat kompleks dan bervariasi. Perlu pemahaman praktis untuk diimplementasikan pada perencanaan tambang²¹⁾.

Ada dua gaya yang berlaku dalam kestabilan lereng, yaitu gaya yang menyebabkan massa batuan bergerak (gaya penggerak) dan gaya yang menahan massa batuan tersebut (gaya penahan). Secara matematis, kestabilan suatu lereng dapat dinyatakan dalam bentuk faktor keamanan (FK) sebagai berikut.

$$FK = \frac{\text{gaya penahan}}{\text{gaya penggerak}} \dots\dots\dots (1.1)$$

FK > 1, lereng dianggap stabil.

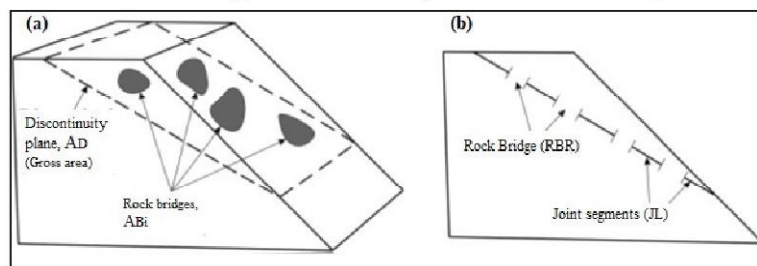
FK = 1, lereng dalam keadaan setimbang, tetapi akan segera longsor jika mendapat sedikit gangguan

FK < 1, lereng dianggap tidak stabil.

Persistensi menjadi parameter yang paling signifikan memengaruhi kekuatan massa batuan^{5,11)} sehingga menjadi parameter penting pada analisis kestabilan lereng penambangan atau penggalian^{13,16,17)}.

Persistensi Bidang Diskontinu

Persistensi (K) adalah rasio antara panjang kekar (JL) terhadap panjang bidang lurus. Bidang lurus merupakan gabungan panjang kekar dan *rock bridge*. *Rock bridge* (RBR) didefinisikan sebagai batuan utuh yang memisahkan bidang diskontinu *coplanar* dan *non-coplanar* dalam massa batuan.



Gambar 3.1 Persistensi Bidang Diskontinu¹⁶⁾

$$K = \frac{\Sigma JL}{\Sigma JL + \Sigma RBR} \dots\dots\dots (1.2)$$

atau

$$K = \Sigma \left(\frac{A_D - A_{Bi}}{A_D} \right) \dots\dots\dots (1.3)$$

Penelitian terkait persistensi kekar telah dilakukan akademisi dan praktisi beberapa dekade terakhir. Namun, kuantifikasi areal persistensi tetap sangat sulit dilakukan. Pada praktiknya, panjang jejak dari singkapan terbatas masih sering digunakan sebagai perkiraan untuk menilai persistensi suatu kekar^{17,20)}.

Pada kondisi bidang diskontinu baru terbentuk, *rock bridge* secara signifikan meningkatkan kekuatan geser batuan. Peningkatan tersebut terutama di bawah batas kekakuan normal (*normal stiffness boundary*) yang konstan.

Rock bridge secara efektif menghasilkan kekuatan cadangan dan dimobilisasi sebelum terjadi keruntuhan di sepanjang bidang kekar^{17,20)}. Kekuatan geser kekar yang baru terbentuk, umumnya meningkat ketika nilai persistensi menurun. Nilainya pun bervariasi dengan skala spasial RBR. Meskipun kehadiran RBR sangat menguntungkan dalam analisis kekuatan massa batuan, pengukurannya sangat sulit dilakukan^{6,15)}.

Pada cakupan yang lebih luas, analisis persistensi dan RBR bidang diskontinu telah dilakukan dengan metode *remote sensing*, namun sulit memperkirakan besaran RBR pada persistensi bidang diskontinu¹⁹⁾. Persistensi diklasifikasikan dari sangat rendah (<1 m) hingga sangat tinggi (>20 m)⁹⁾.

Geometri kekar meliputi: persistensi (K), panjang kekar (JL), dan spasi (SP). Nilai geometri ini sangat memengaruhi probabilitas longsor lereng penggalan. Untuk nilai persistensi < 30% maka probabilitas longsor bergantung pada panjang dan spasi kekar, yakni rasio antara persistensi rata-rata dan spasi rata-rata ($\bar{K} / \bar{SP}$)⁵⁾.

Pada lereng yang relatif dangkal (± 30 meter) dengan nilai kohesi ≥ 24 MPa, kondisi kestabilannya sangat dipengaruhi oleh bidang diskontinu. Lereng dengan panjang rata-rata kekar (JL) tetap, pemodelan dengan persistensi hingga 100% akan meningkatkan probabilitas longsor (PL), nilainya sama dengan kenaikan persistensi rata-rata⁵⁾. Keberadaan *rock bridge* di antara bidang diskontinu dengan persistensi rendah memberikan dampak signifikan terhadap stabilitas lereng. Kondisi ini disebabkan oleh kekuatan batuan sering jauh lebih besar daripada tegangan geser yang bekerja pada lereng. Interaksi antar-rekahan yang berdekatan dapat diabaikan ketika rasio RBR terhadap panjang kekar (JL) lebih besar 0,8¹⁰⁾.

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik. Metode ini menggunakan konsep diferensial yang mempertimbangkan adanya hubungan tegangan dan regangan di dalam material⁸⁾.

Strength Reduction Factor (SRF)

Faktor Keamanan (FK) dapat didefinisikan sebagai rasio antara kuat geser aktual dan kuat geser minimum yang menyebabkan keruntuhan suatu lereng. Hal ini dikenal dengan konsep *Strength Reduction Factor* (SRF).

Konsep SRF pertama kali dipakai untuk menghitung Faktor Keamanan (FK) pada metode elemen hingga. Nilai *Strength Reduction Factor* (SRF) diperoleh dari persamaan berikut⁸⁾:

$$\text{Faktor Keamanan (FK)} = \frac{\tau}{\tau_f} \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

Nilai τ adalah nilai kuat geser material yang dihitung dengan kriteria Mohr–Coulomb sebagai berikut:

$$\text{Kuat geser } (\tau) = c + \sigma \tan \phi \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

Nilai τ_f adalah nilai kuat geser pada saat massa batuan runtuh. Parameter kohesi (c_f) dan sudut gesek dalamnya ϕ_f dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\text{Kohesi } (c_f) = \frac{c}{SRF} \quad \dots\dots\dots (1.6)$$

dengan memasukkan persamaan sudut gesek:

$$\phi_f = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{SRF} \right)$$

Persamaan tersebut dapat diubah menjadi:

$$FK = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{c_f + \sigma_n \tan \phi_f}$$

Persamaan berikutnya diperoleh dengan menguraikan nilai sudut gesek dalamnya.

$$FK = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{\frac{c_f}{SRF} + \sigma_n \tan(\tan^{-1}(\frac{\tan \phi}{SRF}))}$$

$$FK = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{(\frac{c + \sigma_n \tan \phi}{SRF})}$$

$$FK = SRF \quad \dots\dots\dots (1.7)$$

Probabilitas Kelongsoran (PL)

Metode numerik, seperti halnya metode elemen hingga, cukup sukses digunakan dalam perhitungan probabilitas kelongsoran suatu lereng. Hal ini didasarkan pada pendekatan dengan konsep *Strength Reduction Factor* (SRF) untuk menghitung faktor keamanan sebagai fungsi variabel acak⁵⁾. Berikut ini perhitungan PL berdasarkan metode elemen hingga dengan *Point Estimate Method* (PEM).

Point Estimate Method

Point estimate method dikembangkan oleh Rosenbleuth khususnya untuk aplikasi geoteknik. Metode ini melibatkan parameter statistik, yaitu nilai rata-rata dan varians. Metode ini dapat digunakan dalam analisis kestabilan tambang bawah tanah dan permasalahan kestabilan lereng. Berdasarkan rumus umum bahwa faktor keamanan suatu lereng ($F=FK$) merupakan fungsi dari dua variabel acak bebas berupa gaya penahan ($r=X$) dan gaya penggerak ($d=Y$), untuk menyatakan fungsi ini dituliskan sebagai (F):

$$F = g(X,Y) \quad \dots\dots\dots (1.8)$$

Persamaan ini terdiri dari dua variabel acak bebas maka perhitungan (FK) sebagai kombinasi dari variabel acak sebagai berikut:

$$F_{++} = [(\mu_x + \sigma_x), (\mu_y + \sigma_y)]$$

$$F_{+-} = [(\mu_x + \sigma_x), (\mu_y - \sigma_y)]$$

$$F_{-+} = [(\mu_x - \sigma_x), (\mu_y + \sigma_y)]$$

$$F_{--} = (\mu_x - \sigma_x), (\mu_y - \sigma_y)]$$

Kemudian, dari keempat nilai F tersebut digunakan untuk mendapatkan perkiraan rata-rata nilai F keseluruhan dengan cara sebagai berikut:

$$E[F] = \mu_F = \sum x_i \cdot p(x_i) \quad \dots\dots\dots (1.9)$$

Nilai $E[F]$ merupakan *expected value* dari F , x_i merupakan nilai F pada empat arah di atas, sedangkan p adalah bobot dari masing-masing posisi. Jika besaran X dan Y tidak berkorelasi, bobot setiap nilai F pada arah tertentu sebesar 0,25⁴⁾. Nilai varians adalah sebagai berikut:

$$\text{Varians } [F] = E[F^2] - (E[F])^2 \quad \dots\dots\dots (1.10)$$

Perhitungan probabilitas kelongsoran berdasarkan nilai rata-rata (μ) dan standar deviasi (σ) dari nilai FK yang diasumsikan terdistribusi normal. Sebelum menghitung nilai probabilitasnya, dilakukan perhitungan *reability index* (β) dengan cara adalah sebagai berikut⁴⁾:

$$Reliability\ Index = \beta = \frac{\mu - 1}{\sigma} \dots\dots\dots (1.11)$$

$$Probabilitas\ Longsor\ (PL) = 1 - \phi[\beta] \dots\dots\dots (1.12)$$

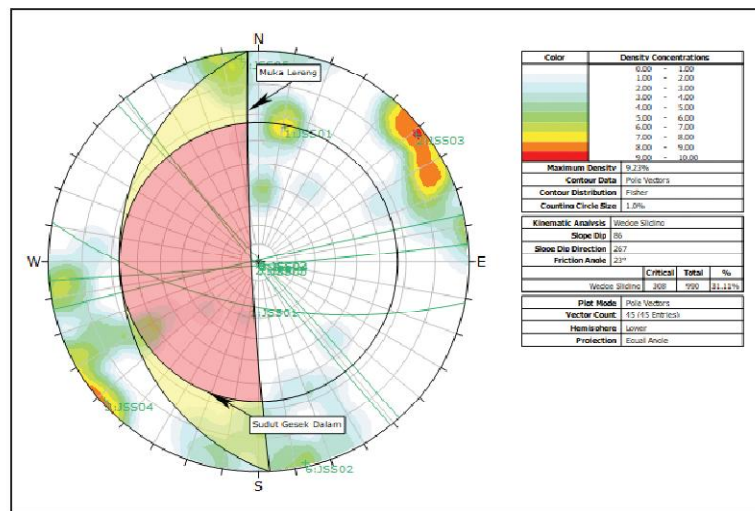
Koefisien ϕ merupakan nilai yang didapatkan dari Tabel Z yang menunjukkan hubungan antara nilai tingkat kepercayaan dengan jumlah variabel bebasnya.

PROYEKSI STEREOGRAFI DAN PEMODELAN PERSISTENSI

Hasil pemetaan bidang diskontinu menunjukkan lereng dominan disusun oleh struktur kekar. Kekar dibagi menjadi kekar *embedded* dan jejaring kekar²⁾.

Kekar *Embedded*

Pada penelitian ini, kekar *embedded* merupakan kekar dengan kategori mayor dengan panjang lebih dari 3m. Kekar ini akan diproyeksikan untuk mengetahui potensi dan tipe longsor.



Gambar 4.1 Hasil Proyeksi Stereografi (Hasil Pengolahan Data)

Hasil analisis stereografi menggunakan perangkat lunak dips diperoleh lima set kekar (tabel 4.1). Orientasi umum lereng adalah N267E/86°. Hasil akhir proyeksi diperoleh potensi longsor dominan tipe baji dengan probabilitas sebesar 31,11%.

Longsor tipe baji (*wedge failure*) akan terjadi jika memenuhi syarat berikut:

1. Terdapat dua atau lebih bidang lemah yang berpotongan dan membentuk baji terhadap lereng.
2. Kemiringan lereng lebih besar daripada kemiringan garis potong kedua bidang lemah ($\psi_{fi} > \psi_i$).
3. Sudut garis potong kedua bidang lemah lebih besar daripada sudut geser dalamnya ($\psi_{fi} > \phi$).

Hasil proyeksi ini akan digunakan untuk memodelkan bidang-bidang diskontinu yang *daylight* untuk selanjutnya dianalisis menggunakan elemen hingga.

Tabel 4.1 Set Kekar Hasil Proyeksi

ID	Strike	Dip
JSS01	101	66
JSS02	257	89
JSS03	141	88
JSS04	313	89
JSS05	85	88

Berdasarkan hasil proyeksi stereografi di atas maka disimpulkan:

1. Kasus baji 1, kemiringan lereng 86° , sudut gesek dalam (ϕ_r) 23° , sedangkan sudut perpotongan bidang diskontinu 48° . Artinya, $86^\circ > 48^\circ$, $48^\circ > 23^\circ$ (terpenuhi syarat longsoran baji).
2. Kasus baji 2, kemiringan lereng 86° , $\phi_r = 23^\circ$, sedangkan sudut perpotongan bidang diskontinu 3° . Artinya, $86^\circ > 3^\circ$, $3^\circ > 23^\circ$ (tidak terpenuhi).
3. Kasus baji 3, kemiringan lereng 86° , $\phi_r = 23^\circ$, sedangkan sudut perpotongan bidang diskontinu 45° . Artinya, $86^\circ > 45^\circ$, $45^\circ > 23^\circ$ (terpenuhi syarat longsoran baji).
4. Kasus baji 4, kemiringan lereng 86° , $\phi_r = 23^\circ$, sedangkan sudut perpotongan bidang diskontinu 56° . Artinya, $86^\circ > 56^\circ$, $56^\circ > 23^\circ$ (terpenuhi syarat longsoran baji).

Jejaring Kekar (*Joint Network*)

Pemodelan kekar ataupun jaringan kekar harus memperhatikan statistik hasil pengukuran^{3,5)}. Hasil pemetaan struktur di lapangan diperoleh bahwa jejaring kekar mengikuti model *baecher*. Parameter jejaring kekar hasil perhitungan terdistribusi Fisher seperti pada tabel 4.2¹⁴⁾. Parameter ini digunakan pada pemodelan jejaring kekar dalam perangkat lunak *Rockscience RS2*.

Tabel 4.2 Parameter Jejaring Kekar

Parameter "input"	Keterangan
<i>Orientation definition</i>	
<i>Joint method</i>	<i>Fisher</i>
<i>Trace plane dip direc. (°)</i>	0
<i>Mean dip (°)</i>	70,2
<i>Mean dip direc. (°)</i>	296,9
<i>Fisher K</i>	1,4
<i>Joint length</i>	
<i>Mean</i>	1,4
<i>Distribution</i>	<i>Lognormal</i>
<i>Std. Dev.</i>	0,85
<i>Rel. minimum (m)</i>	0,5
<i>Rel. maximum (m)</i>	2,9
<i>Joint intensity measure</i>	
<i>Intensity type</i>	$P1 = \text{joint/area}$
<i>Value</i>	0,35
<i>Joint end condition</i>	
<i>Open at surface contact</i>	Yes
<i>Open at external contact</i>	Yes
<i>Open at excavation contact</i>	Yes
<i>Open at material contact</i>	No
<i>Open at stage contact</i>	No

Hasil Pengujian Laboratorium

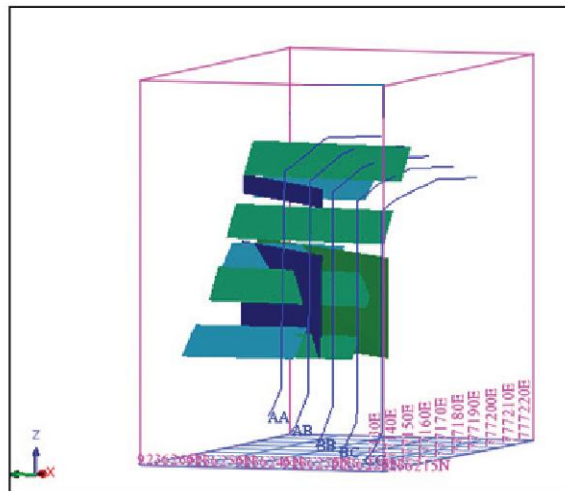
Sampel batuan yang diambil dari lapangan sebanyak lima bongkah besar dengan ukuran 50 cm x 50 cm x 50 cm. Bongkahan ini akan dipreparasi sesuai dengan standar ISRM 1981. Data hasil uji fisik dan mekanik batuan ini digunakan untuk menentukan parameter kekuatan batuan menggunakan perangkat lunak *RocLab*.

Tabel 4.3 Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Parameter	Nilai
Young's modulus	40898,6 MPa 0,026
Densitas batuan	gr/cm ³
Nisbah poisson	0,218
Kuat tekan uniaksial (UCS)	81,068 MPa
Sudut gesek dalam (ϕ_p)	23,146 MPa
mb (peak)	1,8026
s (peak)	0,0024
a (peak)	0,5024.

Pemodelan Persistensi

Bidang diskontinu yang dimodelkan merupakan set kekar hasil proyeksi yang berpotensi membentuk longsoran baji.



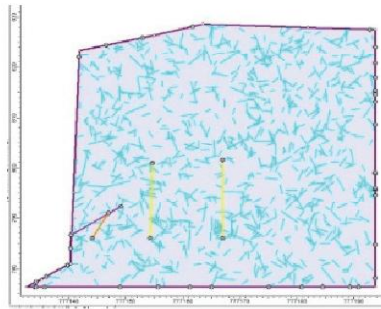
Gambar 4.2 Bidang Diskontinu 3D (Hasil Pengolah Data)

Hasil akhir pemodelan 3D ini kemudian dibuat sayatan 2D untuk dijadikan input pemodelan pada perangkat lunak RS2. Pada pemodelan lereng dengan RS2, parameter sifat fisik dan mekanik batuan serta jejaring kekar nilainya tetap untuk semua lereng, yang membedakan adalah variasi persistensinya.

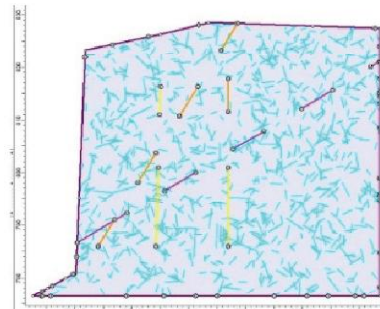
Hasil Perhitungan FK dan PL dengan *Rockscience RS2*

Lokasi penelitian dibagi menjadi lima irisan (AA, AB, BB, BC, dan CC). Set kekar yang berpotensi mengalami kelongsoran (*daylight*) hanya empat irisan lereng (kecuali irisan CC).

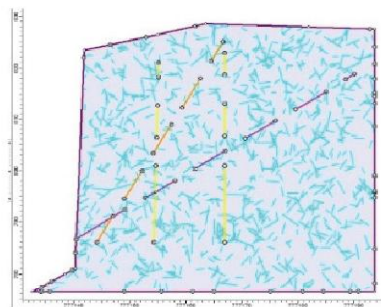
Setiap pemodelan lereng menggunakan persistensi kekar bervariasi K= 0%; 50%; 60%; 70%; 80%; dan 90%. Masing-masing model disusun oleh jejaring kekar (*joint network*) model *baecher*. Pemodelan lereng dengan *Rockscience RS2* sebagai berikut:



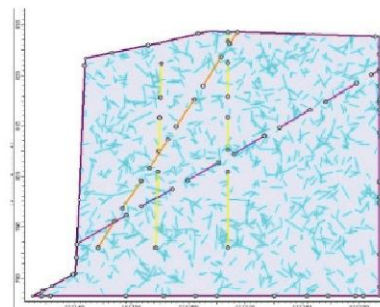
Gambar 4.3 Pemodelan Lereng AA
Persistensi (K) = 0



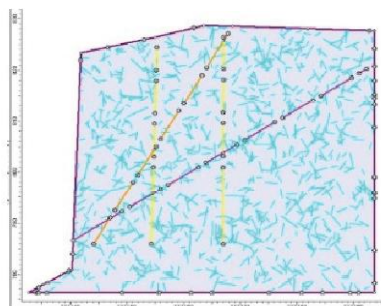
Gambar 4.4 Pemodelan Lereng AA
Persistensi (K) = 50%



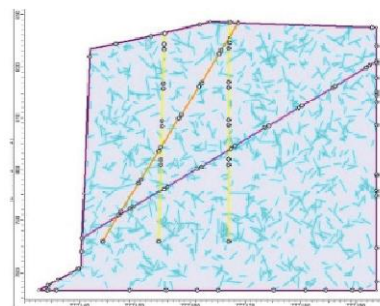
Gambar 4.5 Pemodelan Lereng AA
Persistensi (K) = 60%



Gambar 4.6 Pemodelan Irisan AA
Persistensi (K) = 70%



Gambar 4.7 Pemodelan Lereng AA
Persistensi (K) = 80%



Gambar 4.8 Pemodelan Lereng AA
Persistensi (K) = 90%

Pemodelan persistensi lereng AB, BC, dan CC perlakuannya sama dengan gambar 4.3 hingga 4.8. Setiap model lereng dikomputasi dengan program *Rockscience RS2* dan iterasi dilakukan sebanyak 500 kali.

Hasil perhitungan pemodelan masing-masing lereng sebagai berikut:

Tabel 4.4 Hasil Pemodelan Lereng AA

Lereng AA	H (m)	FK	PL (%)	$\bar{JL}$ (m)	$\bar{RBR}$ (m)
K 0	46,9	3,54	3,69	11,645	37,226
K50%	46,9	3,44	4,15	7,519	8,885
K60%	46,9	3,41	4,39	6,899	4,600
K70%	46,9	3,41	4,03	6,842	3,450
K80%	46,9	3,31	4,47	7,108	1,777
K90%	46,9	3,28	4,51	6,767	0,845

H = tinggi lereng

Tabel 4.5 Hasil Pemodelan Lereng AB

Lereng AB	H (m)	FK	PL (%)	$\overline{JL}$ (m)	$\overline{RBR}$ (m)
K 0	47,5	3,51	3,72	11,794	36,530
K50%	47,5	3,38	4,43	7,435	7,434
K60%	47,5	3,36	4,39	7,732	5,154
K70%	47,5	3,34	4,70	7,517	3,221
K80%	47,5	3,19	6,54	7,029	1,757
K90%	47,5	2,20	22,43	7,249	0,805

Tabel 4.6 Hasil Pemodelan Lereng BB

Lereng BB	H (m)	FK	PL (%)	$\overline{JL}$ (m)	$\overline{RBR}$ (m)
K 0	48,9	3,31	5,55	11,371	33,426
K50%	48,9	3,24	6,05	6,892	6,892
K60%	48,9	3,2	6,00	7,167	4,778
K70%	48,9	3,16	6,34	6,968	2,986
K80%	48,9	3,08	7,20	6,826	1,707
K90%	48,9	2,76	15,90	6,719	0,721

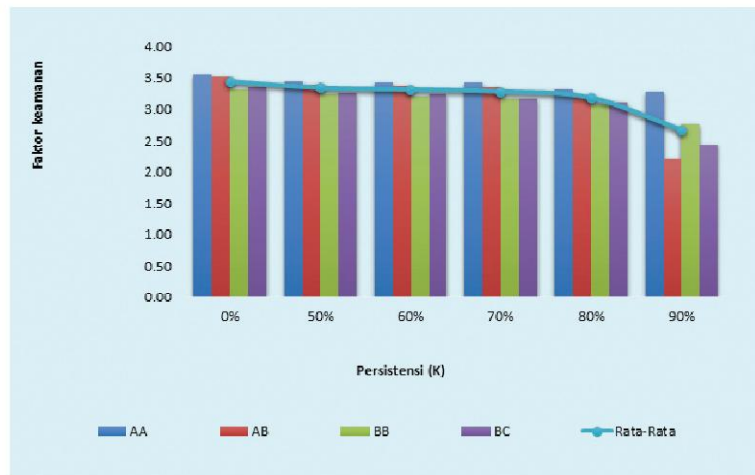
Tabel 4.7 Hasil Pemodelan Lereng BC

Lereng BC	H (m)	FK	PL (%)	$\overline{JL}$ (m)	$\overline{RBR}$ (m)
K 0	48,7	3,35	4,78	10,084	36,014
K50%	48,7	3,25	5,51	6,286	6,286
K60%	48,7	3,24	5,69	6,915	4,610
K70%	48,7	3,17	6,22	6,454	2,766
K80%	48,7	3,11	7,05	6,508	1,627
K90%	48,7	2,44	17,85	6,551	0,728

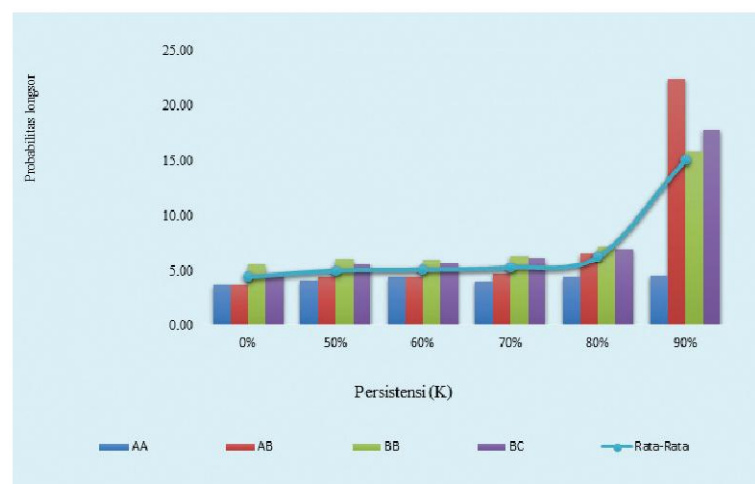
PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis statistik bahwa panjang kekar berdistribusi lognormal. Panjangnya rata-rata 6,464 m, panjang minimal 3,2 m, dan maksimal 17 m.

Analisis pengaruh persistensi dilakukan dengan beberapa simulasi nilai persistensi. Simulasi dilakukan dengan mengubah geometri bidang gelincir yang *daylight* pada tiap model irisan. Panjang kekar ke-i (JL_i) untuk tiap model persistensi dibuat tetap, yaitu sebesar 6,464 m sesuai dengan rata-rata hasil pengukuran. Panjang RBR tiap model menyesuaikan dengan nilai persistensi pemodelan (Persamaan 1.2).



Gambar 5.1 Grafik Hubungan K dan FK



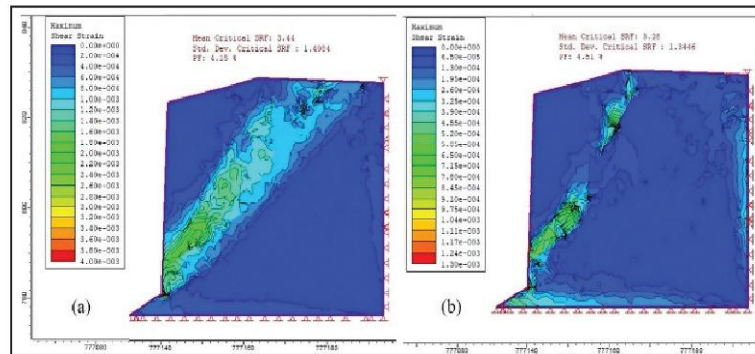
Gambar 5.2 Grafik Hubungan K dan PL

Interaksi antara RBR dan JL menunjukkan nilai parameter kestabilan lereng yang signifikan ketika rasio RBR/JL lebih kecil daripada 0,8, sebaliknya pada rasio di atas 0,8 relatif sangat kecil. Pada penelitian ini, rasio 0,8 dimaksud terletak di antara persistensi 50% - 60%.

Berdasarkan pemodelan ini, kenaikan nilai persistensi secara otomatis menurunkan dimensi *rock bridge* (RBR) pada massa batuan. Sejatinya, *rock bridge* merupakan batuan utuh yang menambah kekuatan atau stabilitas massa batuan.

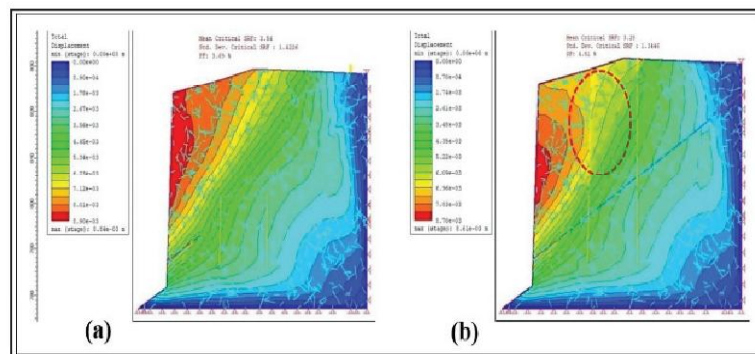
Kenaikan persistensi secara umum menyebabkan terjadinya penurunan nilai faktor keamanan dan meningkatnya PL. Pada persistensi (K) 0-50%, perubahan rata-rata FK sebesar 2%. Pada persistensi 50% - 90%, perubahan rata-ratanya 6,7%, sedangkan pada transisi persistensi 80%-90% terjadi perubahan yang cukup besar (kenaikan 15,8%).

Penurunan FK seiring semakin besarnya perubahan regangan (*strain*), perubahan regangan akibat penurunan dimensi RBR. Pada persistensi rendah (K=0), regangan lebih terkonsentrasi pada ujung kekar. Pada persistensi tinggi (K=90%), pola regangan lebih menyebar sepanjang bidang gelincir dengan nilai regangan maksimum terdistribusi pada RBR yang berdimensi paling kecil. FK terkecil terdistribusi pada bidang diskontinu yang memiliki kemiringan 30°-50° terhadap tegangan aksial (Gambar 5.4), selaras dengan penelitian terdahulu²⁾. Pada kasus ini, kemiringan bidang diskontinu yang berpotensi sebagai bidang luncur membentuk *pathwork* yang melalui bidang diskontinu dengan kemiringan 33° dan 60°.



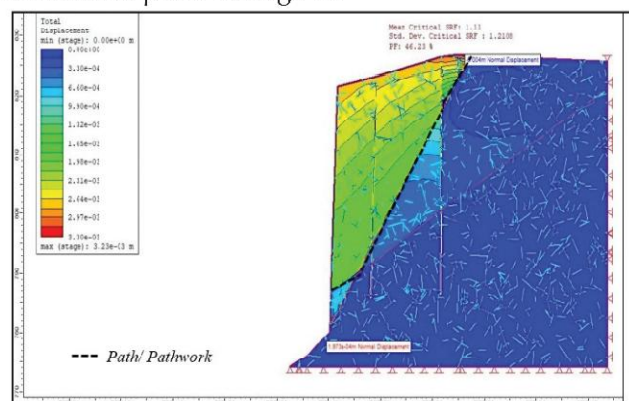
Gambar 5.4 Distribusi Regangan
(a) Persistensi 50%, (b) Persistensi 90%

Perubahan yang sama juga terjadi pada nilai *total displacement* yang ditunjukkan oleh kontur *displacement*. Ketika persistensi meningkat dan dimensi *rock bridge* semakin kecil, terjadi peningkatan *displacement* pada bidang diskontinu massa batuan (Gambar 5.5b). Hasil ini sejalan dengan hasil terdahulu ^{7,11,20}.



Gambar 5.5 Perubahan Kontur Displacement
(a) Persistensi 0; (b) Persistensi 90%

Ketika persistensi naik, dimensi RBR menurun. Oleh karena itu, regangan-regangan maksimum pada tiap bidang diskontinu berpotensi saling terkoneksi sehingga terbentuk jalur kelongsoran baru yang dapat melalui dua atau lebih bidang diskontinu, istilah jalur ini disebut *pathwork* atau *path* ^{13,19}. *Pathwork* paling jelas terlihat pada lereng AB.



Gambar 5.6 Pathwork atau Jalur Kelongsoran Lereng AB

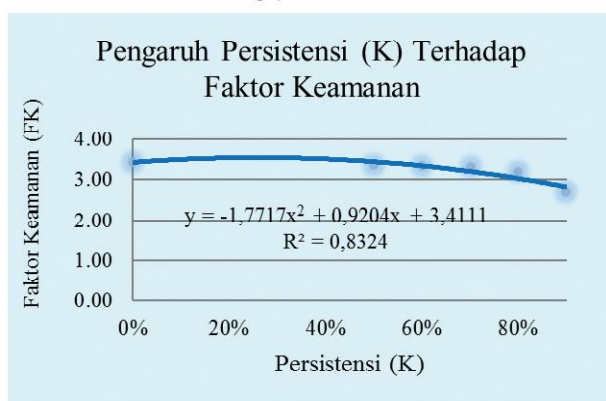
Hasil pengolahan data tiap pemodelan dengan *Rockscience RS2*, diperoleh rata-rata amplitudo perubahan FK untuk rasio RBR/JL > 0,8 sebesar 0,02 dan untuk rasio < 0,8 sebesar 0,16. Perubahan amplitudo PL untuk rasio RBR/JL > 0,8 sebesar 0,12 dan untuk rasio < 0,8 sebesar 2,53.

Perubahan persistensi juga berkorelasi pada perubahan tegangan normal (σ_n), batuan. Semakin kecil nilai RBR pada persistensi model maka tegangan normal semakin besar. Hasil akhir dari ke-4 model bahwa kenaikan persistensi 10% memengaruhi kenaikan tegangan normal sebesar 7,3%. Hubungan ini menunjukkan bahwa kestabilan lereng cenderung dipengaruhi oleh kekuatan geser batuan terkekarkan.

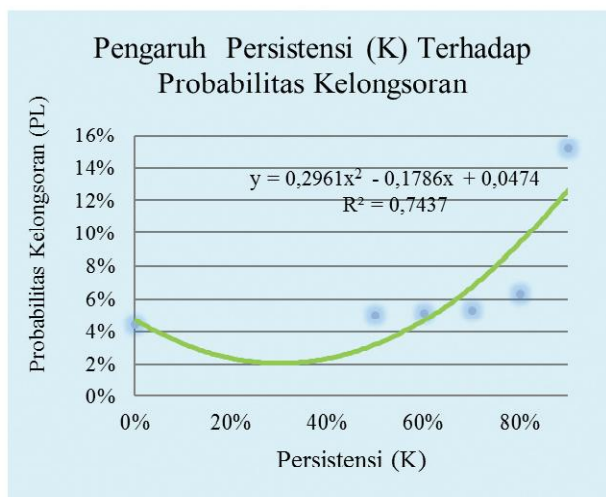
Berdasarkan analisis regresi, diperoleh persamaan hubungan antara Persistensi (K), FK, dan PL sebagai berikut:

1. Faktor Keamanan, $y = -1,7717x^2 + 0,9204x + 3,4111$ dengan koefisien $R^2 = 0,832$ (*polynomial*).
2. Probabilitas Kelongsoran, $y = 0,2961x^2 - 0,1786x + 0,0474$ dengan koefisien $R^2 = 0,7437$ (*polynomial*).

Kedua persamaan di atas menunjukkan hubungan yang cukup erat antara nilai Persistensi (K), FK, dan PL yang mengontrol kestabilan lereng penelitian.



Gambar 5.7 Analisis Regresi K dan FK (Hasil Pengolahan Data)



Gambar 5.8 Analisis Regresi K dan PL (Hasil Pengolahan Data)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Pada persistensi dengan rasio RBR/JL lebih besar daripada 0,8 tidak memberikan pengaruh yang besar pada parameter kestabilan lereng. Sebaliknya, untuk nilai rasio RBR/JL lebih kecil daripada 0,8 terlihat perubahan yang signifikan (dasar teori terbukti).

2. Kenaikan rata-rata persistensi 10% menyebabkan penurunan faktor keamanan (FK) sebesar 6,7%, kenaikan nilai probabilitas longsor (PL) sebesar 59%, serta kenaikan tegangan normal sebesar 7,3%.
3. Perubahan amplitudo FK dan PL secara signifikan pada transisi persistensi K80% ke K90%; FK sebesar 15% dan PL sebesar 176%.
4. Semakin besar persistensi maka dimensi RBR semakin kecil, tegangan yang dialami RBR semakin meningkat sehingga cenderung terjadi kerusakan lokal yang dapat saling terkoneksi dalam massa batuan terbentuk jalur keruntuhan.
5. Faktor keamanan minimum terdistribusi di sepanjang bidang yang memiliki distorsi terbesar (*maximum shear strain*).
6. Potensi kelongsoran lokasi penelitian adalah tipe baji dengan nilai FK minimum 2,2 dan PL maksimum 22,43%.
7. Berdasarkan poin 1–5, perencana tambang maupun insinyur geoteknik harus memperhatikan pemodelan persistensi bidang diskontinu untuk mendapatkan hasil analisis kestabilan lereng yang realistis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen PT Silva Andia Utama atas bantuan selama pelaksanaan penelitian di lokasi perusahaan. Kemudian, terima kasih juga kepada manajemen PPSDM Geologi Mineral, dan Batubara atas bantuan peralatan dalam menunjang pengambilan data penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arif, Irwandy., (2016). *Geoteknik Tambang, Mewujudkan Produksi Tambang yang Berkelanjutan dengan Menjaga Kestabilan Lereng*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta
2. Azami, A., T. Yacoub, & J. Curran.,(2012). Effects of strength anisotropy on the stability of slopes." *65th Canadian Geotechnical Conference, CGS Geo-Manitoba*.
3. Baecher, G.B. (1983). Statistical analysis of rock mass fracturing. *Journal of Mathematical Geology*, 15, 329–347
4. Baecher,B., & Christian,T., (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Willey & Sons Ltd. England
5. Einstein, H.H., Veneziano, D., Baecher, G.B., & O'Reilly, K.J. (1983). The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*. 20, p.227–236
6. Elmo, D., Donati, D., & Stead, D. (2018). Challenges in the characterisation of intact rock bridges in rock slopes. *Engineering geology* doi:10.1016/j. enggeo.2018.06.014
7. Guo, Qifeng., Pan, Jiliang., Cai, Meifeng., & Zhang, Ying.(2020). Investigating the effect of rock bridge on the stability of locked section slopes by the direct shear test and acoustic emission technique. *Sensors. University of Science and Technology Beijing*, Beijing; doi:10.3390/s20030638
8. Hammah, R.E. T. Yacoub, B. Corkum & F. Wibowo.(2007). Analysis of blocky rock slopes with finite element shear strength reduction analysis. *Rock Mechanics: meeting Society's Challenges and Demands. Eberhardt, Stead Morrison (eds). Pp 329-324*. Taylor & Francis Group. London
9. ISRM (1981). *Rock characterization, testing and monitoring*. International Society for Rock Mechanics, Suggested Methods

10. Jina, Jin, Cao, Ping, & Liu, Jie. (2015). The influence of bridge length on failure patterns of specimens containing two coplanar cracks under uniaxial compression load. *Trans Tech Publications, Switzerland, Applied Mechanics and Materials* Vol 711 pp 410-413
11. Kim, B. H., Kaiser P. K. & Grasselli G. (2007). Influence of persistence on behaviour of fractured rock masses. *Geological Society, London, Special Publications*, 284, pp 161-173 doi. org/10.1144/SP284.11
12. Nugroho, Agus. & B.P, Asep (2015). Displacement distribution model of andesite rock mass due to blasting activity using FEM, *Indonesian Mining Journal* vol, 18, p.47 -58
13. Park, Hyuck-Jin. (2005). A new approach for persistence in probabilistic rock slope stability analysis. *Geosciences Journal* Vol. 9, No. 3, p. 287 – 293
14. Priest, Stephen D. (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. UK: Chapman & Hall
15. Romer, C., Ferentinou, M. (2019). Numerical investigations of rock bridge effect on open pit slope stability, *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.03.006>
16. Shang, J., Hencher, S.R., West, L.J., & Handley, K. (2017). *Forensic excavation of rock masses: a technique to investigate discontinuity persistence*. Springer, doi 10.1007/s00603-017-1290-3
17. Shang, J., West, L.J., Hencher, S.R., & Zhao, Z. (2018). Geological discontinuity persistence: Implications and quantification. *Engineering Geology*, 241. pp. 41-54. ISSN 0013-7952
18. Silitonga, P.H. (2003). Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa. P3G Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Bandung
19. Tuckey, Z. & Stead, D. (2016). Improvements to field and remote sensing methods for mapping discontinuity persistence and intact rock bridges in rock slopes. *Engineering geology*.10.1016/j.enggeo.2016.05.001
20. Wasantha, P.L.P., Ranjith, P.G., Xu, T., Zhao, J., & Yan, Y.L (2014). A New Parameter to describe the persistency of Non-persistent Joints, *Engineering Geology*. 10.1016/j.enggeo.2014.08.003
21. Willey, D.C. (2018). *Rock Slope Engineering Civil and Mining, 5th edition*. London: CRC Press