

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lereng adalah suatu bidang di permukaan tanah yang menghubungkan permukaan tanah yang lebih tinggi dengan permukaan tanah yang rendah. Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang *horizontal*. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia. Lereng yang terbentuk secara alami, misalnya lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia, antara lain, galian dan timbunan, tanggul dan dinding tambang terbuka (Arief, 2007 dalam Rumansara, 2014).

Longsor merupakan resiko yang harus diterima ketika melakukan penambangan batubara. Peningkatan kedalaman dari suatu tambang terbuka semakin meningkatkan kemungkinan terjadi longsor baik itu di area *lowwall* maupun *highwall* dan dapat menyebabkan terganggunya aktivitas tambang. Longsor pada *lowwall* umumnya disebabkan oleh adanya lapisan *weak material* yang terletak di bawah material yang longsor dan bertindak sebagai bidang gelincir, pengelolaan air permukaan, lereng yang jenuh dan penggalian kaki lereng juga berkontribusi besar sebagai penyebab terjadinya longsor. Apabila perlapisan batuan penyusun lereng *lowwall* mempunyai ketebalan yang relatif kecil, maka kemungkinan longsor yang terjadi adalah longsor jenis *buckling* (Giani, 1992).

Kestabilan suatu lereng dikontrol oleh kondisi geologi daerah setempat, bentuk keseluruhan lereng, dan juga teknik penggalian dalam pembuatan lereng. Faktor pengontrol ini jelas sangat berbeda untuk situasi penambangan yang berbeda dan sangat penting untuk memberikan aturan yang umum untuk menentukan seberapa tinggi atau seberapa landai suatu lereng agar dapat dipastikan lereng tersebut disebut aman atau stabil. Kestabilan lereng dipengaruhi oleh geometri lereng, karakteristik sifat fisik dan mekanik material pembentuk lereng, struktur bidang lemah, massa batuan, getaran, iklim, dan proses penambangan. Satu cara yang umum untuk menyatakan kestabilan suatu lereng batuan adalah faktor keamanan (Moshab, 1977 dalam Arif, 2016).

Faktor Keamanan (FK) merupakan perbandingan antara gaya penahan yang membuat lereng tetap stabil, dengan gaya penggerak yang menyebabkan terjadinya longsor. Berdasarkan penelitian yang dilakukan dan studi tentang kestabilan lereng, maka dibagi tiga kelompok rentang Faktor Keamanan (FK) yang ditinjau dari intensitas kelongsorannya. Menurut Bowles, lereng yang stabil memiliki harga FK yang tinggi ($FK > 1,25$), lereng dengan longsor pernah terjadi (kelas kritis) (FK antara $1,07 - 1,25$), dan lereng yang tidak stabil memiliki harga FK yang rendah ($FK < 1,07$) (Bowless, 1989).

Pit X pada PT Cipta Kridatama site MHU merupakan daerah anomali yang sering terjadi longsor. Kelongsoran masih sering terjadi pada suatu lereng padahal nilai Faktor Keamanan (FK) dianggap telah aman. Selain itu, daerah setempat hanya menggunakan nilai Faktor Keamanan (FK) saja tanpa adanya parameter tambahan. Maka sebab itu diperlukan suatu parameter tambahan agar dapat mengoptimasi nilai Faktor Keamanan (FK) setiap lereng pada *pit X*, yaitu Probabilitas Kelongsoran (PK).

Probabilitas Kelongsoran (PK) adalah peluang terjadinya kelongsoran pada suatu lereng akibat pengaruh satu atau lebih dari faktor-faktor yang memengaruhi kestabilan lereng. Probabilitas Kelongsoran (PK) merupakan indikator stabilitas lereng berbasis pendekatan statistik yang ditentukan oleh rasio distribusi Faktor Keamanan ($FK \leq 1$) terhadap total distribusi Faktor Keamanan (FK) karena adanya nilai acak dari sifat fisik, sifat mekanik batuan, serta model perhitungan FK. Probabilitas kelongsoran dapat digunakan untuk memperkuat usulan Faktor Keamanan dari suatu desain (Azizi dkk, 2014).

Analisis sensitivitas digunakan untuk mengetahui parameter-parameter yang paling berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Hal ini perlu diketahui disebabkan adanya pengaruh ketidakpastian atau variabilitas dari nilai input yang digunakan. Analisis ini digunakan untuk melihat parameter masukan yang memiliki pengaruh paling dominan terhadap perubahan nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Kelongsoran. (Azizi dkk, 2011).

Nilai Faktor Keamanan (FK) yang bersifat deterministik dianggap kurang efektif dalam menggambarkan kestabilan lereng karena terdapat ketidakpastian pada massa batuan. Ketidakpastian ini disebabkan oleh variabilitas yang pasti

terdapat pada *properties* massa batuan dan hal ini sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng (Wang dkk, 2011). Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengidentifikasi serta menganalisis kestabilan suatu lereng dengan menggunakan pendekatan Probabilitas Kelongsoran (PK) lereng agar menjadi solusi untuk mengatasi masalah variabilitas pada massa batuan (Cahyono & Santosa, 2020) serta mengetahui parameter yang paling sensitif terhadap kestabilan lereng. Dengan mengetahui parameter yang paling sensitif, pihak perusahaan dapat melakukan analisis yang lebih mendalam dan akurat terhadap parameter tersebut terhadap kestabilan lereng.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang menjadi dasar pada penelitian ini di antaranya sebagai berikut:

1. Faktor Keamanan (FK) pada Lereng *Lowwall Pit* X PT Cipta Kridatama Site MHU
2. Probabilitas Kelongsoran (PK) pada Lereng *Lowwall Pit* X PT Cipta Kridatama Site MHU
3. Analisis Sensitivitas pada Lereng *Lowwall Pit* X PT Cipta Kridatama Site MHU

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang ingin dicapai pada penelitian ini di antaranya sebagai berikut:

1. Menganalisis nilai Faktor Keamanan (FK) pada Lereng *Lowwall Pit* X PT Cipta Kridatama Site MHU
2. Menganalisis Probabilitas Kelongsoran (PK) pada Lereng *Lowwall Pit* X PT Cipta Kridatama Site MHU
3. Menganalisis variabel yang paling sensitif terhadap Kestabilan Lereng *Lowwall Pit* X PT Cipta Kridatama Site MHU

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberi informasi mengenai parameter yang perlu diperhatikan dalam analisis kestabilan lereng. Selain itu, dapat memberi informasi mengenai potensi kelongsoran di daerah penelitian sehingga perusahaan terkait dapat mengantisipasi hal tersebut agar tidak memakan korban, alat dan dapat mempercepat produksi dan mengurangi biaya (*cost*). Secara akademis, penelitian ini diharapkan dapat sebagai bahan acuan/rujukan dalam kajian geoteknik.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dilakukan di lokasi penambangan PT Cipta Kridatama *Site* MHU. Penelitian ini mencakup periode pengumpulan data dari bulan Januari 2023 hingga Maret 2024. Waktu ini mencakup tahap persiapan, pengumpulan data lapangan, analisis laboratorium, dan analisis data. Populasi penelitian ini adalah seluruh area lereng *Pit X* PT Cipta Kridatama *Site* MHU. Sedangkan sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah beberapa titik yang menjadi *line section* pada lereng yang dipilih.

Variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sifat fisik batuan (*unit weight natural*) dan sifat mekanik (UCS) batuan. Selain itu, data ketebalan litologi *interburden* juga digunakan untuk mengetahui proporsi litologi pada tiap *interburden*. Penelitian ini difokuskan pada analisis beban seismik (*seismic load*) sebagai faktor penyebab eksternal terjadinya longsor dan untuk faktor lainnya, seperti curah hujan, vegetasi, aktivitas manusia (penambangan), dan faktor geologis lainnya, tidak menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

Data-data dikumpulkan melalui pemetaan geoteknik permukaan, pengujian laboratorium (sifat fisik dan sifat mekanik batuan), serta data dari perusahaan (data sekunder). Penelitian ini hanya menggunakan satu *line section* yang dijadikan patokan dalam menganalisis kestabilan lereng serta analisis sensitivitas lereng tersebut. Metode analisis kestabilan lereng yang digunakan adalah *Limit Equilibrium Method* Morgenstern-Price, sedangkan untuk analisis sensitivitas adalah Analisis Sensitivitas Satu Variabel dan Analisis Sensitivitas Banyak Variabel. Data dianalisis menggunakan beberapa perangkat lunak berdasarkan

kebutuhannya: @Risk Software untuk analisis fungsi distribusi probabilitas, *Software Slide 6.0 Rocscience* untuk analisis kestabilan lereng dan analisis sensitivitas satu variabel, *Software Google Coolab* untuk analisis sensitivitas banyak variabel.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lereng

Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horisontal. Lereng dapat terbentuk secara alamiah karena proses geologi atau karena dibuat oleh manusia. Lereng yang terbentuk secara alamiah misalnya lereng bukit dan tebing sungai, sedangkan lereng buatan manusia antara lain yaitu galian dan timbunan untuk membuat jalan raya dan jalan kereta api, bendungan, tanggul sungai dan kanal serta tambang terbuka. Lereng secara umum dibagi menjadi dua: (Arief, 2007)

1. Lereng Alami

Lereng alami yang telah berada dalam kondisi yang stabil selama puluhan atau bahkan ratusan tahun dapat tiba-tiba runtuh sebagai akibat dari adanya perubahan kondisi lingkungan, antara lain seperti perubahan bentuk topografi, kondisi air tanah, adanya gempa bumi maupun pelapukan. Kadang-kadang keruntuhan tersebut juga dapat disebabkan oleh adanya aktivitas konstruksi seperti pembuatan jalan raya, jalan kereta api, saluran air dan bendungan.

Beberapa pertimbangan yang harus dilakukan dalam analisis kestabilan lereng alami antara lain yaitu menentukan apakah longsor yang mungkin terjadi merupakan longsor yang pertama kali atau longsor yang terjadi pada bidang geser yang sudah ada serta kemungkinan terjadinya longsor apabila dibuat suatu pekerjaan konstruksi atau penggalian pada lereng.

2. Lereng Buatan

Lereng buatan adalah lereng yang terjadi akibat terbentuknya daerah galian dan/atau daerah timbunan pada proses perencanaan lereng. Lereng buatan dapat berbentuk lereng buatan dengan penanganan konstruksi berupa penguatan lereng, atau lereng buatan tanpa penanganan konstruksi yaitu lereng yang hanya mengandalkan kemiringan dan tinggi kritis berdasarkan karakteristik tanah pembentuk lereng tersebut.

2.2 Kestabilan Lereng

Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor-faktor yang dinyatakan ke dalam bentuk gaya penahan dan gaya penggerak. Ketika gaya penahannya lebih besar atau sama dengan gaya penggeraknya maka lereng dalam keadaan stabil. Namun, jika gaya penahannya lebih kecil daripada gaya penggerak maka lereng dalam keadaan tidak stabil dan besar kemungkinan terjadi longsor. Untuk menyatakan tingkat keamanan suatu lereng, dikenal istilah Faktor Keamanan (FK). Faktor Keamanan diperlukan untuk mengetahui keamanan atau kemantapan suatu lereng, guna mencegah terjadinya kelongsoran (Arief, 2016).

Faktor-faktor yang memengaruhi kestabilan lereng:

1. Geometri Lereng

Tambang terbuka tersusun atas sekumpulan lereng yang terdiri dari lereng tunggal (*single slope*) dan lereng keseluruhan (*overall slope*) dengan dimensi tinggi dan sudut tertentu. Tinggi lereng adalah jarak vertikal dari bidang kaki (*toe*) hingga puncak lereng (*crest*), sedangkan sudut lereng adalah sudut yang dibuat antara garis yang menghubungkan kaki dan puncak lereng dengan garis *horizontal*. Pada lereng keseluruhan juga terdapat daerah yang menghubungkan antar lereng dikenal dengan jenjang penahan (*catch berm*) dan bagian lereng untuk jalan tambang yang disebut *ramp* (Saptono, 2012).

2. Aktivitas Manusia

Aktivitas seperti penggalian dan peledakan menyebabkan perubahan keseimbangan gaya-gaya dalam sehingga akan menyebabkan bertambahnya gaya geser dan mengurangi kestabilan lereng. Pada kegiatan penggalian pada suatu lereng akan menyebabkan terjadinya perubahan besarnya gaya-gaya pada lereng yang mengakibatkan terganggunya kestabilan lereng dan akhirnya dapat menyebabkan lereng tersebut longsor (Rahim, 2015).

Dalam kegiatan peledakan, pada saat ledakan terjadi terdapat dua energi yang dilepaskan dari bahan peledak yaitu *work energy* dan *waste energy*. *Work energy* merupakan energi peledakan yang menyebabkan pecahnya batuan serta terberainya tanah, energi ini merupakan energi yang diinginkan dari kegiatan peledakan. Sementara itu *waste energy* merupakan energi sisa

yang tidak diinginkan karena dapat menimbulkan efek bahaya dan efek lain yang tidak menguntungkan bagi kegiatan peledakan (Fahlevi, 2012).

3. Struktur Geologi

Struktur yang dimaksud meliputi sesar (*fault*), kekar (*joint*), perlipatan (*fold*), bidang perlapisan (*bedding plane*), dan rekahan (*crack*). Struktur merupakan bidang-bidang lemah sekaligus sebagai tempat merembesnya air sehingga dapat menurunkan kestabilan lereng (Karyono, 2004).

4. Sifat Fisik dan Mekanik Batuan

Sifat fisik yang mempengaruhi kestabilan lereng antara lain bobot isi, porositas, dan kandungan air. Dalam mengetahui sifat fisik dan mekanik batuan dilakukan dengan pengujian di laboratorium untuk mendapatkan angka bobot isi, kohesi dan sudut geser dalam pada lokasi (Husein dkk, 2018)

5. Airtanah

Menghitung gaya yang disebabkan oleh tekanan air yang bekerja pada lereng, perlu diasumsikan pola aliran air tanah yang mungkin sama dengan kondisi di lapangan (Wyllie, 2004).

2.3 Longsor

Longsoran adalah pergerakan masa tanah atau batuan sepanjang bidang tergelincir atau suatu permukaan bidang geser. Masa batuan adalah kondisi material dan bidang-bidang diskontinu yang dimiliki batuan. Berdasarkan proses longsornya, longsoran batuan dapat dibedakan menjadi empat macam: (Bieniawski, 1989)

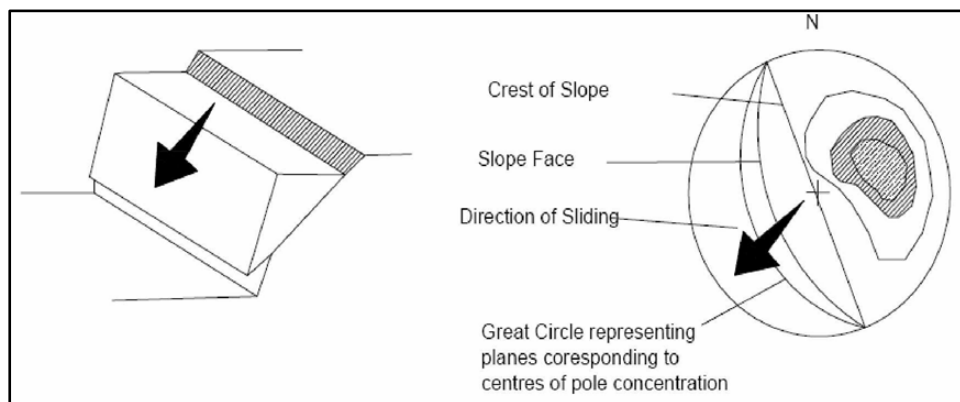
2.3.1 Longsoran Bidang

Longsoran bidang merupakan suatu longsoran batuan yang terjadi sepanjang bidang luncur yang dianggap rata. Syarat-syarat terjadinya longsoran bidang adalah:

1. Terdapatnya bidang luncur bebas, berarti kemiringan bidang luncur harus lebih kecil daripada kemiringan lereng.
2. Arah bidang luncur sejajar atau mendekati sejajar dengan arah lereng (maksimum berbeda 20°)

3. Kemiringan bidang luncur lebih besar daripada sudut geser dalam batumannya.
4. Terdapat bidang bebas (tidak terdapat gaya penahan) pada kedua sisi longsoran.

Bidang luncur pada longsoran bidang dapat berupa sesar, rekahan, maupun bidang perlapisan batuan. Ilustrasi suatu longsoran bidang dapat dilihat pada Gambar 1.



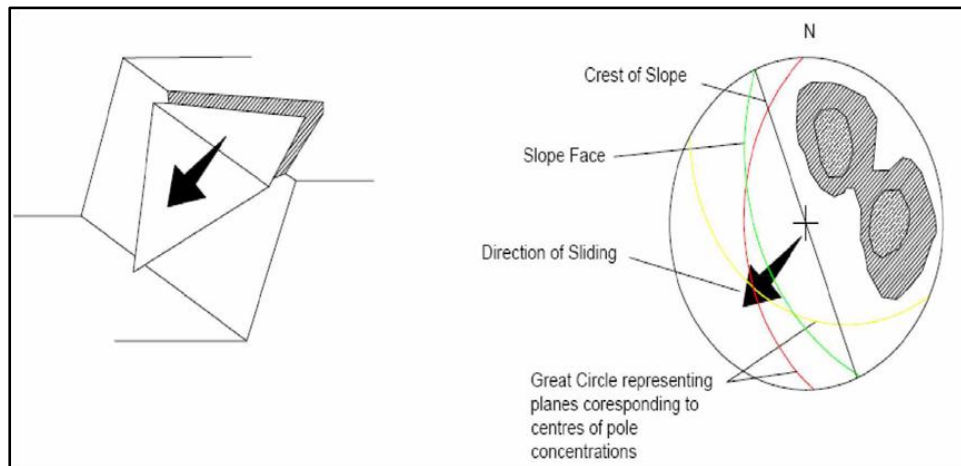
Gambar 1 Longsoran Bidang (Hoek and Bray, 1981)

2.3.2 Longsoran Baji

Longsoran baji dapat terjadi pada suatu batuan jika terdapat lebih dari satu bidang lemah yang bebas dan saling berpotongan. Sudut perpotongan antara bidang lemah tersebut harus lebih besar dari sudut geser dalam batumannya. Bidang lemah ini dapat berupa bidang sesar, rekahan, maupun bidang perlapisan. Longsoran baji dapat terjadi dengan syarat geometri sebagai berikut:

1. Permukaan bidang lemah A dan bidang lemah B rata, tetapi kemiringan bidang lemah B lebih besar daripada bidang lemah A.
2. Arah penunjaman garis potong harus lebih kecil daripada sudut kemiringan lereng.
3. Bentuk longsoran dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dan kedua bidang lemah.

Cara longsoror suatu baji dapat melalui salah satu atau beberapa bidang lemahnya, ataupun melalui garis perpotongan kedua bidang lemahnya. Ilustrasi longsoror baji dapat dilihat pada Gambar 2.

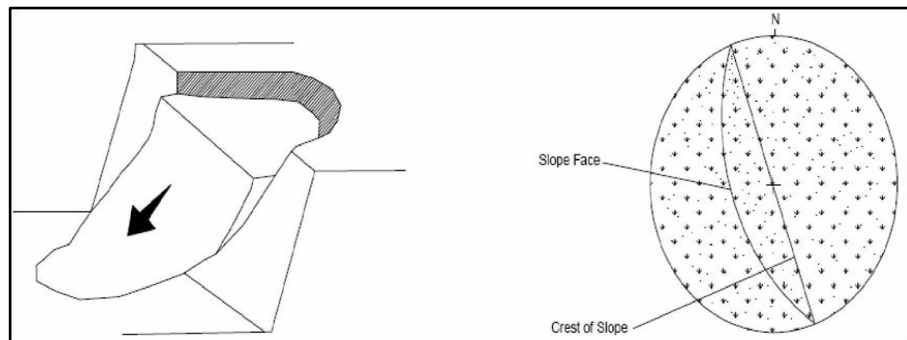


Gambar 2 Longsoror Baji (Hoek and Bray, 1981)

2.3.3 Longsoror Busur

Longsoror busur adalah yang paling umum terjadi di alam, terutama pada batuan yang lunak (tanah). Pada batuan yang keras longsoror busur hanya terjadi jika batuan tersebut sudah mengalami pelapukan dan mempunyai bidang-bidang lemah (rekahan) yang sangat rapat dan tidak dapat dikenali lagi kedudukannya. Pada longsoror bidang dan baji, kelongsoran dipengaruhi oleh struktur bidang perlapisan dan kekar yang membagi tubuh batuan ke dalam massa diskontinu. Pada tanah pola strukturnya tidak menentu dan bidang gelincir bebas mencari posisi yang paling kecil hambatannya. Longsoror busur akan terjadi jika partikel individu pada suatu tanah atau massa batuan sangat kecil dan tidak saling mengikat. Oleh karena itu, batuan yang telah lapuk cenderung bersifat seperti tanah. Tanda pertama suatu longsoror busur biasanya berupa suatu rekahan tarik permukaan atas atau muka lereng, kadang-kadang disertai dengan menurunnya sebagian permukaan atas lereng yang berada disamping rekahan. Penurunan ini menandakan adanya gerakan lereng yang pada akhirnya akan terjadi kelongsoran lereng, hanya dapat dilakukan apabila

belum terjadi gerakan lereng tersebut. Ilustasi longsoran busur dapat dilihat pada Gambar 3.



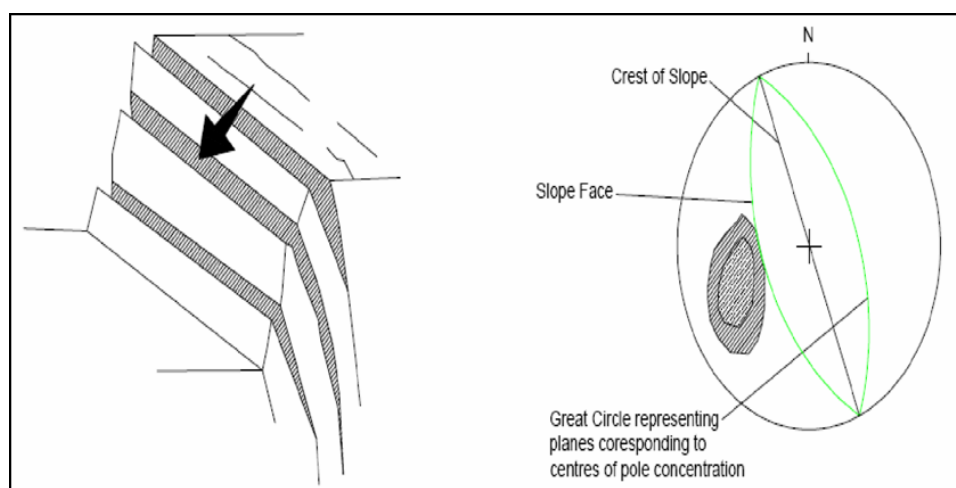
Gambar 3 Longsoran Busur (Hoek and Bray, 1981)

2.3.4 Longsoran Guling

Longsoran guling akan terjadi pada suatu lereng batuan yang acak kemiringannya berlawanan dengan kemiringan bidang-bidang lemahnya. Berdasarkan bentuk dan proses menggulingnya, maka longsoran guling dibedakan menjadi tiga:

1. Longsoran guling setelah mengalami benturan (*flexural toppling*)
2. Longsoran guling yang berupa blok (balok-balok)
3. Gambaran kedua longsoran diatas (*block-flexural*)

Longsoran guling dapat digambarkan dengan balok-balok yang diletakkan diatas sebuah bidang miring. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Longsoran Guling (Hoek and Bray, 1981)

2.4 *Limit Equilibrium Method*

Metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*) merupakan metode yang sangat populer untuk digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng tipe gelinciran dan rotasional. Metode ini relatif sederhana, mudah digunakan, serta terbukti keandalannya dalam praktik rekayasa bertahun-tahun (Arif, 2016).

Metode kesetimbangan batas menggunakan geometri representatif, kekuatan geser material dan/atau sambungan, berat unit material, air tanah, dan kondisi pembebanan/dukungan eksternal untuk menentukan faktor keamanan lereng berdasarkan serangkaian asumsi mekanis penyederhanaan (Read and Stacey, 2009).

Metode kesetimbangan batas atau metode *limit equilibrium method* merupakan metode yang sangat populer dalam analisis kestabilan lereng. Metode ini juga dikenal sebagai metode irisan karena bidang longsor dari lereng tersebut dibagi-bagi menjadi beberapa bagian irisan. Metode ini telah terbukti efektif dan dapat diandalkan dalam praktik rekayasa kestabilan lereng tambang dan membutuhkan data yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan metode-metode lainnya, seperti metode elemen hingga (*finite element*), metode beda hingga (*finite difference*) ataupun metode elemen diskrit (*discrete element*) (Krahn, 2004).

Analisis kesetimbangan batas (*limit equilibrium analysis*) merupakan metode yang mempertimbangkan kesetimbangan gaya sepanjang bidang gelincir. Pada metode ini diasumsikan terdapat bidang gelincir yang potensial, dimana kondisi gaya (*force*) dan moment equilibrium ditentukan berada pada kondisi statis. Analisis ini membutuhkan informasi tentang kekuatan material. Perhitungan dilakukan dengan membagi tanah yang berada di atas bidang longsor menjadi irisan-irisan, sehingga metode ini dikenal juga dengan nama metode irisan. Metode irisan yang pertama kali dipublikasikan oleh Fellenius merupakan cara yang paling sederhana dimana semua gaya antar irisan diabaikan dan hanya memperhitungkan keseimbangan momen. Kemudian Bishop mengembangkan cara yang lebih kompleks dengan memasukkan gaya yang bekerja di sekitar bidang irisan dan memperhitungkan keseimbangan momen. Untuk setiap jenis longsor, dapat diasumsikan ke dalam Mohr-Columb dimana

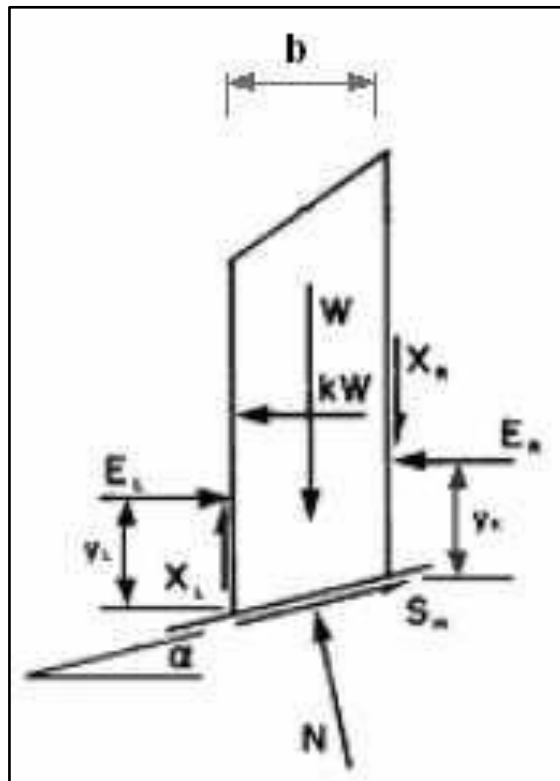
kekuatan material ditentukan berdasarkan kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ). Kestabilan lereng bisa dihitung berdasarkan rasio dari gaya penahan dan gaya pendorong, yang diistilahkan sebagai *Safety-Factor* (FS) (Williey dan Mah, 2004).

2.5 Morgenstern-Price

Morgenstern-Price merupakan salah satu metode yang berdasarkan prinsip keseimbangan batas yang dikembangkan oleh Morgenstern dan Price pada tahun 1965. Metode ini dapat digunakan untuk semua bidang runtuh dan telah memenuhi semua kondisi kesetimbangan. Proses dalam metode ini adalah dilakukan asumsi penyederhanaan untuk menunjukkan hubungan antara gaya geser di sekitar irisan (X) dan gaya normal di sekitar irisan (E). Penyederhanaan tersebut dapat dirumuskan ke dalam persamaan:

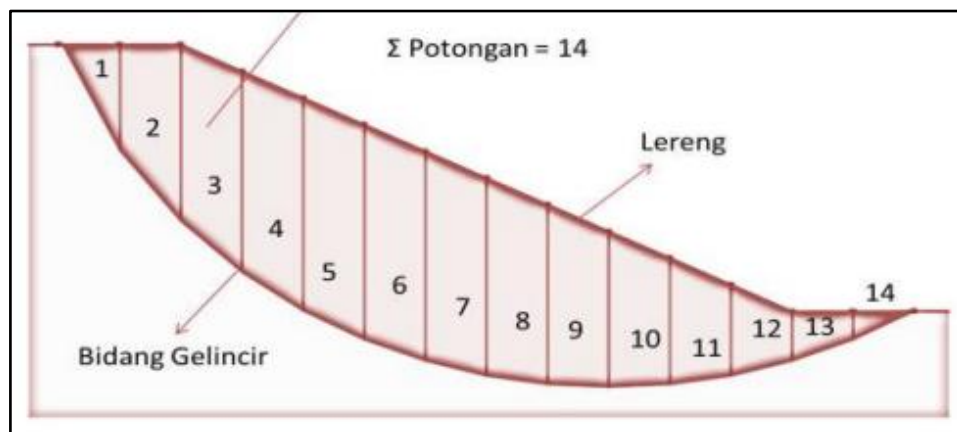
$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (1)$$

Bentuk beberapa fungsi $f(x)$ yang dapat digunakan dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Gaya-gaya yang bekerja pada tiap irisan Metode *Morgenstern-Price*

Metode perhitungan Faktor Keamanan dilakukan dengan metode *Morgenstern-Price*. Pemilihan metode *Morgenstern-Price* dalam analisis dilakukan karena metode ini mempertimbangkan enam kriteria, yaitu keseimbangan momen, keseimbangan gaya, gaya normal antar potongan (X), gaya geser antar potongan (E), inklinasi dari resultan X/E, dan hubungan antara X-E. Keunggulan lain dari digunakannya metode *Morgenstern-Price* untuk analisis stabilitas lereng menurut Krahn (2003) adalah variasi dari gaya antar potongan dapat dimodelkan. Perhitungan *safety factor* pada dasarnya adalah perhitungan jumlah gaya antar potongan pada model lereng yang dibuat. Lereng yang dibuat dibagi menjadi potongan-potongan kecil untuk memudahkan perhitungan. Ilustrasi pembagian potongan-potongan kecil dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Pembagian Potongan pada Suatu Lereng dan Bidang Gelincir di dalam Lereng

Metode *Morgenstern-Price* dapat digunakan dalam (Krahn, 2003):

1. memperhitungkan gaya-gaya antar irisan
2. mengasumsikan gaya-gaya antar irisan adalah fungsi $f(x)$ menghitung angka keamanan dengan keseimbangan momen dan keseimbangan gaya

2.6 *Rock Mass Rating (RMR '89)*

Rock Mass Rating atau dikenal dengan *Geomechanics Classification* dikembangkan oleh Bieniawski pada tahun 1973, 1976, dan 1989. Metode

klasifikasi ini menggunakan *rating* yang besarnya didasarkan pada pengalaman Bieniawski dalam mengerjakan proyek-proyek terowongan dangkal. Metode ini telah dikenal luas dan banyak diaplikasikan pada keadaan dan lokasi yang berbeda-beda seperti tambang pada batuan kuat, terowongan, tambang batubara, kestabilan lereng, dan kestabilan pondasi. Metode ini dikembangkan selama bertahun-tahun seiring dengan berkembangnya studi kasus yang ada dan disesuaikan dengan standar dan prosedur yang berlaku secara internasional (Bieniawski, 1976).

Masing-masing dari parameter di atas memiliki nilai pembobotan yang dibuat berdasarkan pengalaman di berbagai lokasi tambang. Bobot-bobot nilai dari setiap parameter tersebut akan dijumlahkan untuk memperoleh bobot total massa batuan. Alasan utama penggunaan RMR adalah kemudahan dan fleksibilitasnya dalam berbagai tujuan praktis di bidang *engineering* (Bieniawski, 1989).

Dalam penerapan sistem klasifikasi RMR, massa batuan dibagi menjadi beberapa wilayah struktural dan setiap wilayah diklasifikasikan secara terpisah. Batas-batas wilayah struktural biasanya bertepatan dengan fitur struktural utama seperti sesar atau dengan perubahan jenis batuan. Dalam beberapa kasus, perubahan signifikan dalam jarak atau karakteristik diskontinuitas pada jenis batuan yang sama mungkin memerlukan pembagian massa batuan menjadi sejumlah wilayah struktural kecil (Hoek dkk, 1995).

Dalam mengklasifikasikan massa batuan berdasarkan sistem Klasifikasi RMR, Bieniawski menggunakan enam parameter utama yang dijumlahkan untuk memperoleh nilai total RMR, yaitu (Bieniawski, 1989):

1. Kuat tekan uniaksial batuan utuh atau *Unconfined Compressive Strength*
Pengujian UCS (*Unconfined Compressive Strength*) adalah pengujian kuat tekan satu arah dengan geometri sampel batuan seperti silindris, prisma, dan kubik. Pada pengukuran stabilitas di tambang bawah tanah, nilai kuat tekan menjadi parameter penting dalam stabilitas lubang bukaan. Uji UCS mengacu pada standar *International Society of Rock Mechanics* (ISRM) tahun 1981. Adapun bobot nilai UCS untuk penentuan RMR dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Bobot Nilai UCS dan PLI

Nilai UCS (MPa)	<i>Point Load Index</i> (MPa)	Bobot
>250	>10	15
100-250	4-10	12
50-100	2-4	7
25-50	1-2	4
5-25	-	2
1-5	-	1
<1	-	0

2. *Rock Quality Designation* (RQD)

Rock Quality Designation (RQD) dikembangkan oleh Deere pada tahun 1967 untuk memberikan perkiraan kualitas massa batuan dari *log* inti bor. RQD didefinisikan sebagai persentase potongan inti utuh yang lebih panjang dari 100 mm (4 *inci*) dalam total panjang inti. Inti harus berukuran minimal diameter 54.7 mm atau 2.15 *inci* dan harus dibor dengan laras inti tabung ganda. Adapun pembobotan nilai RQD dapat dilihat pada Tabel 2. Persamaan 2 memperlihatkan perhitungan RQD dengan parameter inti bor.

$$RQD = \frac{\text{Jumlah panjang inti} > 10 \text{ cm}}{\text{Total panjang inti}} \times 100\% \quad (2)$$

Palmström (1982) mengemukakan bahwa, ketika tidak ada inti yang tersedia tetapi jejak diskontinuitas terlihat pada permukaan maupun saat eksplorasi, RQD dapat diperkirakan dari jumlah diskontinuitas per unit volume, dengan menggunakan Persamaan 3.

$$RQD = 115 - 3,3 Jv \quad (3)$$

Di mana:

$$Jv = \text{Jumlah joint volumetrik}$$

Selain itu, jika dilapangan tidak ditemukan hasil pemboran inti, Priest dan Hudson (1967) mengemukakan bahwa, RQD dapat ditentukan dengan memperhatikan jumlah diskontinuitas per meter. Dengan persamaan 4 sebagai berikut:

$$RQD = 100(0,1\lambda + 1)e^{-0,1\lambda} \quad (4)$$

Di mana:

λ = Banyaknya bidang diskontinu per meter

Tabel 2 Bobot RQD pada penentuan nilai RMR (Bieniawski, 1989)

RQD (%)	Bobot
>90	20
75-90	17
50-75	13
25-50	8
<25	3

3. Spasi bidang diskontinu

Bidang diskontinuitas yang dapat dilihat di lapangan seperti patahan, lipatan, dan kekar. Adapun pembobotan untuk spasi diskontinuitas dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Bobot spasi diskontinuitas nilai RMR (Bieniawski, 1989)

Spasi diskontinuitas (m)	Bobot
>2	20
0.6-2	15
0.2-0.6	10
0.06-0.2	8
<0.06	5

4. Kondisi bidang diskontinyu

Kondisi diskontinuitas yang diamati di lapangan seperti persistensi atau panjang diskontinuitas, pemisahan diskontinuitas bukaan (*aperture*), kekasaran, bahan pengisi, dan jenis pelapukan. Pembobotan kondisi diskontinuitas dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Bobot kondisi diskontinuitas nilai RMR (Bieniawski, 1989)

Spasi diskontinuitas (m)	Bobot
Sangat kasar, tidak kontinu, tidak terpisah, tidak terlapukkan.	30
Sedikit kasar, bukaan < 1 mm, sedikit terlapukkan.	25
Sedikit kasar, bukaan < 1 mm, banyak terlapukkan.	20
Licin atau isian < 5 mm atau spasi 1-5 mm	10

Adapun pembobotan untuk kondisi diskontinuitas secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Petunjuk klasifikasi kondisi diskontinuitas (Bieniawski, 1989)

Panjang diskontinuitas	<1 m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
Bobot	6	4	2	1	0
Bukaan	Tidak ada	<0,1 mm	0,1 – 1 mm	1-5 mm	>5 mm
Bobot	6	5	4	1	0
Kekasaran	Sangat kasar	Kasar	Sedikit kasar	Halus	Licin
Bobot	6	5	3	1	0
Pengisi	Tidak ada	Isian keras	Isian keras >5 mm	Isian lembut <5 mm	Isian lembut >5 mm
Bobot	6	4	2	2	0
Pelapukan	Tidak ada	Sedikit	Sedang	Tinggi	Dekomposisi
Bobot	6	5	3	1	0

5. Kondisi air tanah

Kondisi air tanah adalah kondisi tekanan dan kecepatan aliran air. Jika kondisi air tinggi maka membuat tanah mudah longsor. Pembobotannya dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6 Bobot kondisi air tanah dalam penentuan RMR (Bieniawski, 1989)

Aliran masuk per 10 m panjang terowongan (L/menit)	Tidak ada	<10	10-25	25-125	>125
Rasio tekanan air joint dengan tegangan utama mayor	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5
Deskripsi	Kering	Lembab	Basah	Menetes	Mengalir
Bobot	15	10	7	4	0

6. Orientasi bidang diskontinu

Orientasi diskontinuitas terlihat dari struktur dominan di lapangan. Pembagiannya disesuaikan dengan terowongan, pondasi, dan lereng. Pada tambang bawah tanah jika struktur dominan tegak lurus dengan sumbu terowongan maka akan menguntungkan tetapi sebaliknya jika sejajar maka tidak stabil dan akan sangat tidak menguntungkan. Pembobotan orientasi kekar dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7 Pembobotan Orientasi Kekar (Bieniawski, 1989)

Penggunaan	<i>Very favourable</i>	<i>favourable</i>	<i>Fair</i>	<i>Unfavourable</i>	<i>Very Unfavourable</i>
Terowongan	0	-2	-5	-10	-12
Pondasi	0	-2	-7	-15	-25
Lereng	0	-5	-25	-50	-50

Nilai RMR akhir dari massa batuan dapat dihitung dengan menjumlahkan bobot dari enam parameter yang ditentukan. Adapun penentuan nilai RMR dapat dilihat pada Persamaan 5.

$$RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 \quad (5)$$

Di mana nilai A1 sampai A6 merupakan bobot dari enam parameter batuan yang sesuai dengan Tabel 1 sampai Tabel 7. Nilai RMR yang dihitung berada antara 0 sampai 100. Nilai RMR yang tinggi menunjukkan kualitas batuan yang baik. Klasifikasi RMR memiliki aplikasi yang luas seperti pada tambang, pondasi, lereng, dan

terowongan. Penentuan klasifikasi nilai RMR dapat dilihat pada Tabel 8 (Bieniawski, 1989; Khatik dan Nandi, 2017).

Tabel 8 Klasifikasi nilai RMR (Bieniawski, 1989)

Bobot	81-100	61-80	41-60	21-40	0-20
Kelas	I	II	III	IV	V
Deskripsi	Sangat baik	Baik	Sedang	Jelek	Sangat jelek

2.7 *Geological Strenght Index (GSI)*

Identifikasi karakteristik massa batuan bertujuan untuk mengetahui kualitas batuan. Setiap klasifikasi massa batuan mempunyai parameter-parameter tertentu yang berbeda untuk menentukan kualitas massa batuan. Klasifikasi massa batuan pada penelitian ini menggunakan sistem *Geological Strenght Index (GSI)*. Pengklasifikasian kualitas massa batuan berdasarkan metode *Geological Strenght Index (GSI)*, mengkombinasikan 2 (dua) parameter utama, yaitu struktur dari sifat blok atau *Structure Rating (SR)*, dan kondisi permukaan atau *Surface Condition Rating (SCR)* yang memiliki subparameter berupa tingkat kekasaran, derajat pelapukan atau alterasi, dan pengisi diskontinuitas. *Chart* standar batuan terkekarkan digunakan dalam mengestimasi kualitas massa batuan secara kualitatif, untuk mendapatkan nilai GSI dari setiap stasiun pengamatan lapangan (Hoek and Marinos, 2005).

GSI mencirikan massa batuan berdasarkan pengamatan stuktur (ukuran blok dan bentuk) dan kondisi permukaan diskontinuitas (pelapukan, derajat kekasaran dan alterasi). Ukuran blok dan bentuk menunjukkan geometri massa batuan keseluruhan dan proporsi volume batuan yang ditempati oleh diskontinuitas. Nilai GSI berkisar dari 0 hingga 100, di mana nilai GSI 100 adalah setara dengan massa batuan utuh (Hoek and Marinos, 2005).

Geological Strenght Index (GSI) adalah sistem karakterisasi massa batuan yang telah dikembangkan dalam rekayasa mekanika batuan untuk memenuhi kebutuhan akan input data yang handal terkait sifat massa batuan yang diperlukan sebagai input untuk analisis numerik atau solusi bentuk tertutup untuk merancang terowongan, lereng, atau fondasi di bebatuan. Karakter geologis material batuan, bersama dengan penilaian visual dari massa yang terbentuk, digunakan sebagai

input langsung untuk pemilihan parameter untuk memprediksi kekuatan dan deformabilitas massa batuan. Pendekatan ini memungkinkan massa batuan dianggap sebagai kontinum mekanis tanpa kehilangan pengaruh geologi terhadap sifat mekaniknya. Ini juga menyediakan metode lapangan untuk mengkarakterisasi massa batuan yang sulit dideskripsikan (Hoek and Marinos, 2007).

2.8 Faktor Keamanan (FK)

Longsor suatu lereng penambangan umumnya terjadi melalui suatu bidang tertentu yang disebut dengan bidang gelincir (*slip surface*). Kestabilan lereng tergantung pada gaya penggerak dan gaya penahan yang bekerja pada bidang gelincir tersebut. Gaya penahan (*resisting force*) adalah gaya yang menahan agar tidak terjadi longsor, sedangkan gaya penggerak (*driving force*) adalah gaya yang menyebabkan terjadinya longsor. Perbandingan antara gaya-gaya penahan terhadap gaya-gaya yang menggerakkan tanah inilah yang disebut dengan Faktor Keamanan (FK) lereng penambangan. Secara sistematis faktor keamanan suatu lereng dapat ditulis dengan rumus sebagai berikut (Romana, 1993):

$$\text{Faktor Keamanan} = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}} \quad (6)$$

Dengan ketentuan, jika:

$FK > 1,0$: Lereng dalam kondisi stabil

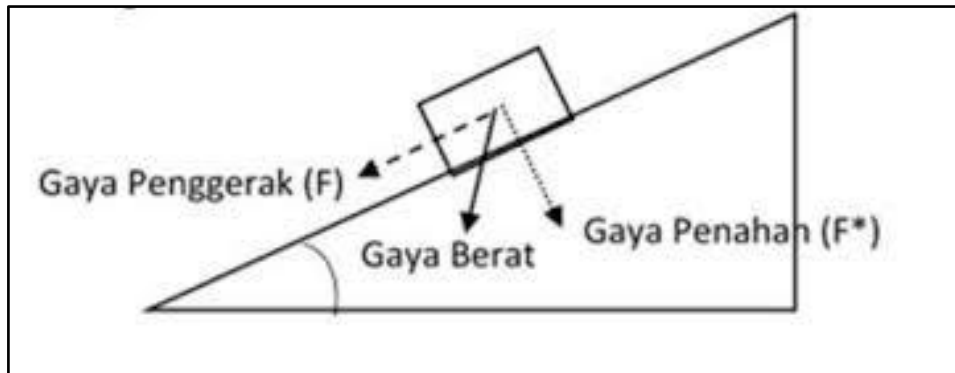
$FK < 1,0$: Lereng tidak stabil

$FK = 1,0$: Lereng dalam kondisi kritis

Mengingat banyaknya faktor yang mempengaruhi tingkat kestabilan lereng penambangan maka hasil analisa dengan $FK = 1,0$ belum dapat menjamin bahwa lereng tersebut dalam keadaan stabil. Hal ini disebabkan karena ada beberapa faktor yang perlu diperhitungkan dalam analisa faktor keamanan lereng penambangan seperti kekurangan dalam pengujian contoh di laboratorium, contoh batuan yang diambil belum mewakili keadaan sebenarnya di lapangan, tinggi muka air tanah pada lereng tersebut dan sebagainya. Dengan demikian, diperlukan suatu nilai faktor keamanan minimum dengan suatu nilai tertentu yang disarankan sebagai batas faktor keamanan terendah yang masih aman sehingga lereng dapat dinyatakan stabil atau tidak. Sehingga pada penelitian ini, faktor

keamanan minimum yang digunakan adalah FK sama dengan atau lebih besar dari 1,25, dengan ketentuan sebagai berikut: (Bowles, 1989)

1. $FK \geq 1,25$: *Lereng Aman*
2. $FK = 1,07 - 1,25$: *Lereng Tidak Aman*
3. $FK < 1,07$: *Lereng kritis*



Gambar 7 Faktor Keamanan Sederhana (Romana, 1993)

2.9 Analisis Probabilitas Kelongsoran (PK)

Perancangan dan analisis kestabilan lereng merupakan pokok bahasan geoteknik yang paling banyak didominasi oleh unsur ketidakpastian. Ketidakpastian tersebut umumnya disebabkan oleh masalah variabilitas spasial dan adanya kesalahan pengukuran. Variabilitas spasial terkait dengan karakteristik alamiah batuan yang heterogen, *anisotrop* dan diskontinu sehingga memiliki sifat yang berbeda di setiap titiknya. Sedangkan, kesalahan pengukuran yang dimaksud adalah keterbatasan jumlah sampel sehingga terdapat kesalahan statistik serta adanya nilai bias yang dihasilkan oleh kesalahan prosedur pada saat pengujian (Setiawan dkk, 2017).

Suatu alternatif selain pendekatan faktor keamanan untuk desain lereng adalah metode probabilistik yang didasarkan pada perhitungan probabilitas kelongsoran (PK) lereng. Pada metode ini, nilai Faktor Keamanan (FK) digambarkan sebagai variabel acak yang mempunyai fungsi distribusi dengan parameter yang diperlakukan seperti nilai rata-rata dan standar deviasi. Dengan mengkombinasikan distribusi ini dalam model deterministik yang digunakan dalam menghitung nilai FK, maka PK lereng dapat diestimasi. Hal menarik dari metode probabilistik adalah representasi yang eksplisit dari ketidakpastian dalam

kajian stabilitas lereng. Nilai Faktor Keamanan (FK) desain lereng dapat dioptimasi dengan nilai probabilitas kelongsoran, sehingga dapat memberikan tingkat keyakinan terhadap desain lereng tersebut (Azizi dkk, 2012).

Nilai Faktor Keamanan lereng dapat dioptimasi dengan nilai PK, sehingga dapat memberikan tingkat keyakinan terhadap desain lereng tersebut. Nilai Probabilitas Kelongsoran di optimasi dengan menggunakan metode probabilistik yang memberikan representasi eksplisit dari ketidakpastian dalam kajian stabilitas lereng (Masagus dkk, 2011). Probabilitas Kelongsoran (PK) adalah tingkat kemungkinan suatu lereng berpotensi longsor akibat nilai dari satu atau lebih parameter geoteknik yang menyimpang dari perhitungan Faktor keamanan lereng (Faktor Keamanan $\leq 1,2$) (Kepmen 1827, 2018). Tabel 9 menjelaskan mengenai nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Kelongsoran lereng tambang sesuai dengan Kepmen ESDM No. 1827. K/30/MEM/2018, 2018.

Tabel 9 Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Kelongsoran Lereng Tambang (Kepmen ESDM No. 1827. K/30/MEM/2018, 2018)

Jenis Lereng	Keparahan Longsor	Kriteria dapat diterima		
		FK statis (min)	FK dinamis (min)	PK (maks)
Lereng Tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1,1	Tidak ada	25-50%
	Rendah	1,15-1,2	1	25%
<i>Inter-ramp</i>	Menengah	1,2-1,3	1	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng Keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

Desain probabilitas merupakan suatu cara yang digunakan untuk menguji pengaruh variabilitas setiap parameter terhadap stabilitas lereng. Distribusi probabilitas dari Faktor Keamanan (FK) dihitung dari Probabilitas Kelongsoran (PK) suatu lereng. Analisis probabilitas kelongsoran pertama kali dikembangkan pada tahun 1940-an dalam bidang teknik struktural dan *aeronautika* untuk memeriksa keandalan sistem yang kompleks. Pemanfaatan analisis probabilitas

pada rekayasa geoteknik pertama kali dalam desain lereng tambang terbuka, di mana risiko kegagalan tertentu dapat diterima, dan jenis analisis ini dapat juga dimasukkan ke dalam perencanaan ekonomi tambang (Savely, 1987).

2.9.1 Fungsi Distribusi Probabilitas

Fungsi Distribusi Probabilitas menggambarkan bagaimana nilai variabel acak terdistribusi. Adanya variabel acak yang digunakan untuk menentukan nilai probabilitas suatu parameter dapat menunjukkan suatu jenis distribusi tertentu. Dalam analisis probabilitas, fungsi distribusi probabilitas yang umum digunakan adalah fungsi distribusi normal. Fungsi distribusi merupakan turunan dari fungsi distribusi yang lainnya. Suatu fungsi distribusi artinya turunan asal fungsi yang lainnya. Misalnya, pada fungsi distribusi eksponensial merupakan turunan dari fungsi distribusi gama menggunakan parameter $(\alpha) = 1$ (Aziz dkk, 2011)

2.9.2 Simulasi *Monte Carlo*

Simulasi Monte Carlo pertama kali dilakukan oleh John von Newmann atas perintah Stanislaw Ulam (Pathak dkk, 2006). Simulasi Monte Carlo digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng dengan metode kesetimbangan batas untuk menghitung probabilitas kelongsoran. Simulasi ini dimaksudkan untuk membuat banyak data dalam bentuk acak sesuai fungsi yang telah ditentukan. Beberapa keuntungan metode Monte Carlo yakni sederhana, lebih fleksibel dalam menggabungkan suatu varietas distribusi probabilitas yang cukup besar tanpa banyak penarfsiran, dan kemampuan untuk memodelkan korelasi di antara variable dengan mudah (Hammah and Yacoub, 2009). Umumnya analisis stabilitas lereng dengan metode kesetimbangan batas menggunakan simulasi Monte Carlo untuk menghitung probabilitas kelongsoran. Hasil analisis statistik dari parameter-parameter tersebut di antaranya nilai minimum, nilai maksimum, nilai rata-rata, dan standar deviasi. Kemudian diinput ke dalam 7 fungsi asumsi yang ada pada program *Software Slide Rockscience 6.0*, meliputi fungsi normal, seragam, triangular, beta, eksponensial, lognormal, dan gamma.

2.9.3 Uji Baik Suai Fungsi Distribusi Probabilitas

Jika suatu distribusi teoritis telah diasumsikan dan ditentukan berdasarkan bentuk histogram, maka kebenaran dari distribusi asumsi dapat dibenarkan atau disangkal secara statistik dengan uji baik suai. Salah satu metode yang digunakan adalah uji *Chi-Square*. Uji *Chi-Square* merupakan analisis dalam bidang statistik yang biasanya digunakan untuk menguji sebuah populasi yang sampelnya memiliki skala yang besar (Sugiyono, 2007). Untuk menghitung nilai *Chi-Square*, maka data-data tersebut dibagi-bagi menjadi beberapa interval atau biasa disebut dengan *bin*. Formula untuk menghitung nilai *Chi-Square* adalah sebagai berikut (Azazi dan Handayani, 2011).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^K (N_i - E_i)^2}{E_i} \quad (7)$$

2.10 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas adalah pendekatan yang digunakan untuk mengetahui parameter-parameter yang paling berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Hal ini perlu diketahui disebabkan adanya pengaruh ketidakpastian atau variabelitas dari nilai input yang digunakan. Pada analisis sensitivitas, hanya satu variabel yang bervariasi pada satu waktu sedangkan variabel lain dibuat konstan pada satu waktu. Analisis ini digunakan untuk melihat parameter masukan yang memiliki pengaruh paling dominan terhadap perubahan nilai faktor keamanan dan probabilitas kelongsoran. Hal ini berguna dalam proses penanganan lereng untuk perencanaan lereng jangka pendek dan jangka panjang (Azizi dan Handayani, 2011).

Analisis sensitivitas dalam konteks kestabilan lereng adalah metode untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh dari variabel acak terhadap kestabilan lereng. Dalam praktiknya, analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan variabel-variabel input yang memengaruhi kestabilan lereng, seperti sifat fisik dan sifat mekanik batuan. Analisis sensitivitas sebaiknya dilakukan ketika parameter geometris atau lainnya tidak terdefinisi dengan baik (Norman dan Duncan, 1996).

Analisis sensitivitas adalah sebuah alat penting dalam konteks analisis probabilistik yang digunakan untuk mengidentifikasi parameter-parameter

masukan yang paling mempengaruhi hasil akhir suatu sistem, seperti Faktor Keamanan (FK) atau parameter lain yang krusial. Proses identifikasi ini dilakukan dengan mengkonversikan nilai-nilai parameter ke dalam skala persentase dari nilai mereka terhadap nilai masukan yang dipertimbangkan (Masagus dkk, 2019).