

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Ceria Nugraha Indotama merupakan salah satu tambang nikel yang berada di blok lapao-pao Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara, dan bergerak di bidang pertambangan nikel dengan bahan galian nikel laterit. Perusahaan ini memiliki luas area IUP sebesar 6,785 ha. PT Ceria Nugraha Indotama menerapkan metode penambangan *open cast mining*. Salah satu aspek yang harus diperhatikan dalam sistem *open cast mining* adalah faktor-faktor geoteknik pada daerah penambangan. Perencanaan geoteknik yang baik diperlukan untuk menentukan geometri suatu lereng dalam menghindari terjadinya suatu longsor. Hal ini dikarenakan proses disain suatu lereng dipengaruhi oleh beberapa parameter untuk menentukan kemantapan lereng tersebut diantaranya pengaruh geologi, hidrogeologi, dan aktivitas penambangan (Rahim, dkk., 2015).

Optimalisasi pada jenjang lereng adalah kegiatan yang dilakukan dalam mencapai target produksi penambangan. Optimalisasi ini dapat menyebabkan perubahan geometri lereng dari bentuk yang sudah ada menjadi lebih terjal, sehingga mengakibatkan faktor keamanan menurun dari kondisi awal. Tanah atau batuan dalam keadaan tidak terganggu (alami) umumnya berada dalam kondisi stabil atau seimbang. Perubahan kestabilan lereng dapat terjadi akibat pengangkatan, penurunan, penggalian, penimbunan, erosi, atau aktivitas lain di sekitar lereng tersebut. Lereng secara alami akan mencoba mencapai kondisi stabil yang baru untuk menghadapi perubahan tersebut. Cara ini biasanya berupa proses degradasi atau pengurangan beban untuk mencapai keadaan kesetimbangan yang baru, (Arif, 2016).

Pit Samaenre C merupakan salah satu pit di area IUP PT. Ceria Nugraha Indotama yang mulai aktif dilakukan aktivitas penggalian, dengan rencana penggalian dari elevasi 190 mdpl sampai elevasi 135 mdpl pada lantai dasar berdasarkan desain pit. Longsor setinggi 19 meter dengan lebar ± 30 meter yang terjadi pada elevasi penggalian 180 mdpl sampai 161 mdpl terjadi pada tanggal 18 Maret 2024. Setelah terjadinya longsor maka akan terbentuk sudut atau kemiringan

baru. Faktor-faktor penyebab longsor dapat berupa faktor internal yang meliputi geometri lereng, struktur geologi, kondisi air tanah dan faktor eksternal berupa beban dinamik dari proses penambangan dan getaran seismik. Setelah dilakukan pengecekan geometri lereng lokasi penelitian didapati kesesuaian antara desain geometri lereng dan kondisi aktual yang artinya tidak didapati adanya *overcut* maupun *undercut* yang dapat menyebabkan terjadinya kelongsoran sehingga geometri lereng bukanlah faktor yang menyebabkan kelongsoran. Setelah dilakukan identifikasi lapangan ditemukan adanya air pada lantai pit dan rembesan air pada dinding pit bagian selatan yang mengindikasikan terjadinya kenaikan muka air tanah pada daerah penelitian akibat peningkatan frekuensi dan intensitas hujan di daerah penelitian. Pada lokasi penelitian juga ditemukan material dan fragmental batu agak lunak dan hancur dengan tingkat pelapukan yang tinggi. Material dengan fragmen partikel yang mudah lepas disertai mineral-mineral *clay* yang sifatnya licin seperti kaolin, *smectite*, serpentin pada kaki lereng. Cermin sesar (*sliken-slide*) atau biasanya disebut gores garis terbentuk akibat gesekan yang intens antara dua blok batuan yang bergerak sepanjang patahan. Ditemukannya cermin sesar pada lokasi penelitian mendandakan adanya patahan pada lokasi penelitian menurut Sapiie (2011), Sesar adalah suatu bidang yang merupakan zona dari batuan bergerak.

Pada area longsor juga ditemukan material dan fragmental batu agak lunak dan hancur dengan tingkat pelapukan yang tinggi. Material dengan fragmen partikel yang mudah lepas disertai mineral-mineral lempung yang sifatnya licin seperti kaolin, *smectite*, serpentin pada kaki lereng elevasi 170-161 mdpl. Mineral lempung merupakan salah satu mineral penyusun batuan serpentine yang berupa mineral ubahan dari mineral primer sebagai akibat alterasi lanjutan mineral primer serpentin yang terdekomposisi dan rekristalisasi menjadi mineral lempung berbutir halus pada lingkungan kaya akan air. Berdasarkan temuan material heterogen pada area longsor digunakan dua data *assay* dari titik bor XLA 3104 dan titik bor XLB 1108 yang berada di lokasi penelitian untuk mengidentifikasi kemenerusan material heterogen ini. Data *assay* titik bor XLA 3104 diketahui kandungan mineral MgO dan Al₂O₃ yang sangat variative dan diikuti oleh kandungan silika yang cukup tinggi, mengidentifikasikan ciri fisik material pencampuran batu dan tanah pada

meteran pengeboran 21-26 meter terdapat pada zona *saprolite* berdasarkan layer validation yang mengacu pada hasil analisis XRF peningkatan kadar Ni, MgO dan SiO₂ serta menurunnya kandungan FeO. Material ini tidak ditemukan pada titik bor XLB 1108 pada rentang kedalaman yang sama, artinya keterdapat material heterogen dilokasi penelitian tidak menerus. Dilakukan analisis XRD sampel material heterogen tersebut untuk melihat jenis mineralnya sehingga didapati mineral-mineral grup serpentine seperti *antigorite* dan *chrysotile*. Mineral-mineral *olivine* dan piroksen pada batuan beku ultrabasa jika teralterasi akan membentuk mineral serpentine seperti *antigorite* dan *lizardite* sebagai *essential* mineral dan *chrysotile* sebagai *accessories* mineral serta mineral lempung dan magnetit sebagai *accidental* mineral. Mineral esensial dan mineral tambahan sering disebut sebagai mineral primer serta *accidental* mineral sebagai mineral sekunder yang merupakan mineral ubahan dari mineral primer sebagai akibat pelapukan, reaksi hidrotermal, atau hasil metamorfisme. Proses alterasi ini disebut sebagai proses serpentinisasi. Dalam profil laterit nikel, mineral grup serpentin biasanya ditemukan dijumpai di area yang lebih dekat dengan batuan induk (*bedrock*) pada zona *saprolite* bawah yang mengandung fragmen batuan berukuran bongkah lebih dari 50% masuk dalam *sub hard saprolite*, (Arif I., 2018). Sehingga material heterogen ini diidentifikasi sebagai layer *saprolite* rock bertekstur *saprolite rock* pada zona *saprolite*. Material layer *saprolite rock* ini dianggap sebagai material yang berbeda dengan layer *soft saprolite* sehingga memiliki nilai material properties yang berbeda. Nilai material ini sebelumnya tidak diketahui sehingga tidak ditambahkan pada saat *assesment* desain *pit*. Oleh karena itu dilakukan pengujian sifat fisik dan mekanik material *saprolite rock*.

Setelah terjadi longsor dilakukan analisis balik pada area longsor untuk mengetahui nilai faktor keamanan serta nilai material properties pada saat terjadi longsor. Analisis balik dilakukan pada material properties lapisan material *saprolite rock*. Material ini dianggap sebagai lapisan terlemah yang memungkinkan untuk terbentuknya bidang gelincir. Nilai input analisis balik menggunakan hasil pengujian sifat mekanik bobot jenis, kohesi dan sudut geser dalam untuk nilai material properties pada saat terjadi longsor. Nilai material properties dari analisis balik digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng setelah longsor dan analisis

kestabilan lereng setelah longsor apabila kemajuan penambangan dilakukan mengikuti geometri desain awal pit pada level <161 mdpl. Apabila analisis kestabilan lereng kemajuan penambangan pada level <161 mdpl menunjukkan nilai faktor keamanan yang tidak stabil sesuai Kepmen ESDM No. 1827 Tahun 2018, maka dilakukan *redesign* geometri dengan nilai faktor keamanan yang stabil sebagai penanggulangan kelongsoran, sehingga operasional penambangan tetap dapat berlangsung dengan aman.

1.2 Rumusan Masalah

Longsoran lokal yang terjadi di Pit Samaenre C area kerja PT. STN pada tanggal 18 Maret 2024 menyebabkan ketidak stabilan dan turunnya faktor keamanan pada lereng. Kestabilan lereng yang tidak terkendali dapat berdampak pada dua faktor yaitu keselamatan dan produktivitas. Kajian geoteknik diperlukan untuk mengetahui faktor penyebab longsor untuk dapat melakukan *redesign* pada lereng yang tidak stabil untuk kemajuan penambangan sebagai penanggulangan kelongsoran lokal yang terjadi, sehingga operasional penambangan tetap dapat berjalan dengan aman. Berdasarkan latar belakang rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

- 1 Bagaimana kestabilan lereng di Pit Samaenre C sebelum, saat dan setelah terjadinya longsor.
- 2 Bagaimana nilai properties material *saprolite rock* dari hasil analisis balik berdasarkan simulasi trial dan error penurunan nilai kohesi dan sudut gesek dalam yang sesuai dengan kondisi kelongsoran dilapangan.
- 3 Bagaimana rekomendasi *redesign* geometri lereng yang stabil dan aman sesuai Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 1827 K/30/MEM/2018.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- 1 Menganalisis kestabilan lereng di Pit Samaenre C sebelum, saat dan setelah terjadinya longsor.

- 2 Menganalisis nilai properties material *saprolite rock* dari hasil analisis balik berdasarkan simulasi trial dan error penurunan nilai kohesi dan sudut gesek dalam yang sesuai dengan kondisi kelongsoran dilapangan.
- 3 Memberikan rekomendasi *redesign* geometri lereng yang stabil dan aman Kepmen ESDM No.1827 Tahun 2018.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai data kajian pendukung bagi kegiatan *assesment* lereng apabila pada area penambangan selanjutnya ditemukan material serupa untuk membantu mengidentifikasi dan memahami mengenai faktor pemicu terjadinya longsor dengan melakukan analisis sehingga dapat mengkaji ulang desain geometri lereng berdasarkan nilai properties material yang diperbaharui sehingga menghasilkan rekomendasi redisan yang stabil dan aman.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian ini dilakukan di Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara, pada Pit Samaenre C pada wilayah kerja mitra PT. STN di area IUP PT. Ceria Nugraha Indotama. Penelitian ini dilakukan selama enam bulan selama masa magang di PT Ceria Nugraha Indotama terhitung sejak bulan Februari 2024 hingga Agustus 2024 dengan mengumpulkan data primer dan data sekunder dari lokasi penelitian. Penelitian ini fokus untuk mengetahui penyebab terjadinya longsor lokal di Pit Samaenre C pada tanggal 18 Maret 2024 sehingga dapat dilakukan *redesign* lereng, apabila analisis kondisi lereng setelah longsor didapati tidak stabil untuk kemajuan penambangan berdasarkan data-data yang diperoleh. Data yang dikumpulkan diolah dan dianalisis menggunakan bantuan perangkat Rockscience Slide untuk mendapatkan nilai faktor keamanan (FK) yang memenuhi ketetapan oleh perusahaan berdasarkan pertimbangan Kepmen ESDM No.1827 Tahun 2018.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Nikel Laterit

Nikel laterit adalah material dari regolit (lapisan hasil pelapukan batuan yang menyelimuti batuan dasar). Endapan laterit daerah Pomalaa terbentuk dari pelapukan batuan ultramafik peridotit yang disebabkan oleh pengaruh perubahan ,(Santoso dan Subagio, 2018). Secara umum deposit nikel laterit dapat dibagi menjadi empat zona utama, yaitu zona top soil atau *ferricrete*, zona *limonite*, zona *saprolite* dan *bedrock* seperti ditunjukkan pada Gambar 1:

1. Zona *top soil* atau *ferricrete*

Zona *top soil* atau *ferricrete* merupakan bagian paling atas dari deposit nikel laterit yang terdiri dari humus, oksida besi dan sisa organik. Lapisan ini berwarna coklat tua kehitaman dan bersifat gembur. Kandungan besi pada lapisan ini sangat tinggi (sekitar 60%) dengan komponen mineral utama berupa hematit. Nikel yang terkandung pada zona ini umumnya kurang dari 0,6%. Biasanya lapisan ini menjadi *overburden* pada proses penambangan.

2. Zona *limonite*

Zona *limonite* berada dibawah zona *ferricrete*. Zona ini merupakan hasil pelapukan lebih lanjut dari batuan beku ultramafik. Lapisan ini berwarna merah kecoklatan dan mengandung oksida besi yang umumnya dalam bentuk senyawa goethite dan hematite. Pada zona *limonite* kandungan nikelnya berkisar antara 0,8-1,5%. Sebagian besar nikel berada dalam larutan padat dengan goethite. Zona *limonite* kandungan besinya cukup tinggi berkisar antara 40-50%.

3. Zona *saprolite*

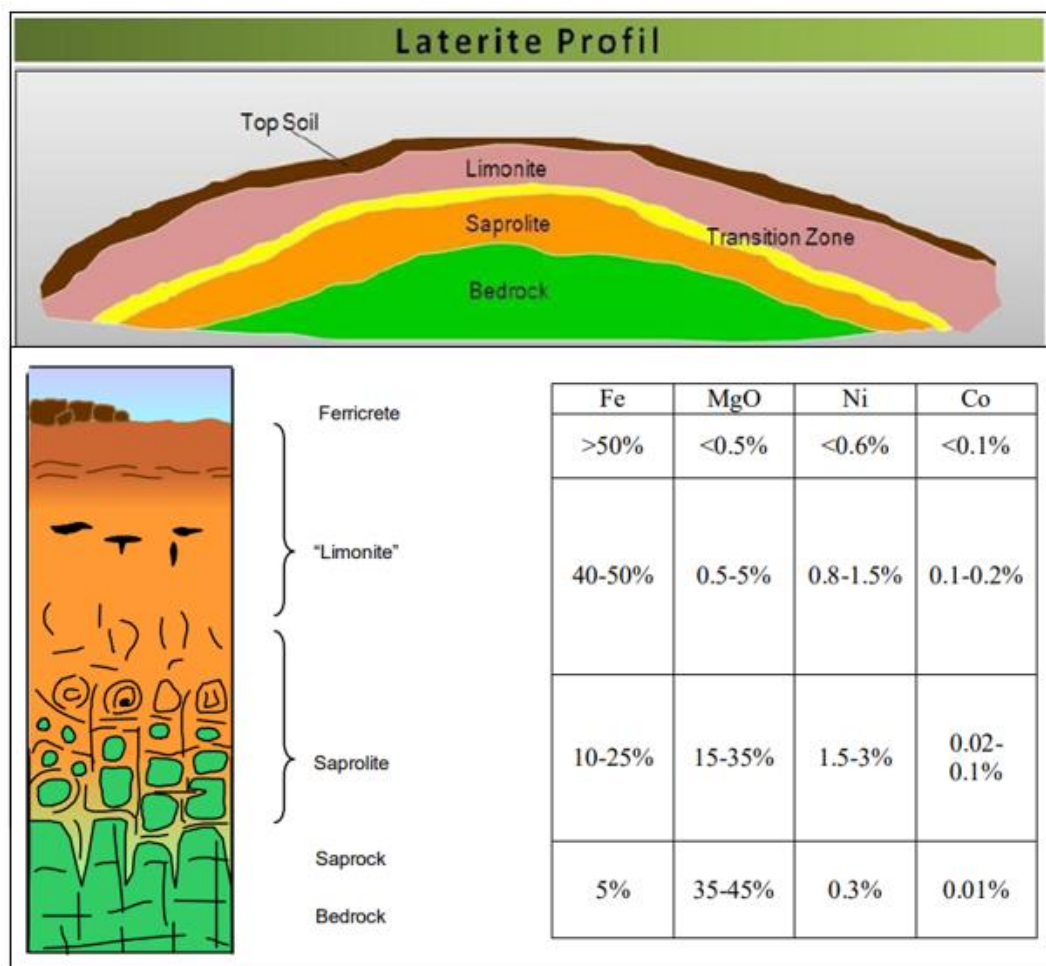
Zona *saprolite* berada di bawah lapisan *limonite*. Zona *saprolite* merupakan zona dengan kandungan nikel paling tinggi dan merupakan zona bijih terdiri dari ubahan (alterasi) batuan dasar (*bedrock*), dengan tekstur batuan dasar masih terlihat. Ketebalan zona ini berkisar antara 3 sampai 14 meter. Mineral utama *saprolite* adalah serpentine ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) dengan nikel

menggantikan Mg untuk membentuk senyawa garnierite ($(\text{Mg},\text{Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$). Kandungan nikel pada zona *saprolite* berkisar 1.5-3%.

4. *Bedrock*

Bedrock merupakan zona terbawah atau zona batuan induk, batuan ini merupakan batuan yang masih segar dengan pengaruh proses pelapukan yang sangat kecil. Batuan ini umumnya berupa peridotit, dunit, serpentin.

Keempat zona di atas, saat ini yang diolah untuk diambil nikelnya adalah zona *limonite* dan *saprolite*. Bijih *saprolite* dan bijih *limonite* memiliki karakter yang berbeda dan bervariasi dari satu tempat ke tempat lain.



Gambar 1 Profil endapan nikel laterit (Elias, 2002)

2.2 Lereng

Lereng merupakan suatu permukaan tanah yang miring yang membentuk sudut tertentu terhadap bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia, (Arif, 2016). Lereng alam (*natural slope*) adalah lereng yang

terbentuk karena fenomena alam yang terjadi akibat dari proses geologi. Dikategorikan sebagai lereng alam apabila tidak ada perlakuan dan/atau penanganan terhadap lereng tersebut, baik berupa perubahan kemiringan ataupun penambahan dengan suatu konstruksi tertentu, sehingga kestabilan dan kemantapan dari lereng alam tersebut benar-benar mengandalkan kestabilan internal yang terbentuk akibat sifat, karakteristik, dan struktur tanah, serta bentuk alaminya, (Arirupa, 2021). Lereng buatan (*man made slope*) adalah lereng yang terjadi akibat terbentuknya daerah galian dan atau daerah timbunan pada proses perencanaan geometrik jalan. Penanganan konstruksi lereng buatan dapat berupa penguatan lereng atau dengan hanya mengandalkan kemiringan dan ketinggian kritis berdasarkan karakteristik tanah lokal pembentuk lereng untuk mempertahankan kestabilannya, (Arirupa, 2021)

Kestabilan lereng merupakan kemampuan lereng untuk bertahan pada kondisi stabil, (Fikri, dkk., 2018). Di alam, tanah maupun batuan umumnya berada dalam kesetimbangan (*equilibrium*), artinya keadaan distribusi tegangan pada tanah atau batuan tersebut dalam keadaan mantap. Apabila tanah ataupun batuan tersebut dikenakan suatu kegiatan, seperti penggalian, penurunan, penimbunan, pengangkutan, erosi atau aktivitas lain yang membuat terganggunya kesetimbangan, tanah ataupun batuan tersebut akan berusaha mencapai kesetimbangan baru dengan cara melepaskan beban terutama dalam bentuk longsor, (Arirupa, 2021).

Tingkat kestabilan suatu lereng dikenal dengan istilah faktor keamanan (*safety factor*). Faktor keamanan diperlukan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng dalam mencegah bahaya longsor di waktu-waktu yang akan datang. Faktor ini merupakan perbandingan antara gaya penahan yang membuat lereng tetap stabil, dengan gaya penggerak yang menyebabkan terjadinya longsor. Secara matematis faktor kestabilan lereng ditunjukkan pada Persamaan 1 sampai Persamaan 3, (Arif, 2016):

$$F = \frac{\Sigma \text{Gaya Pebahan}}{\Sigma \text{Gaya Penggerak}} \quad (1)$$

$$FK = \frac{\text{Kekuatan geser}}{\text{Gaya penggerak}} = \frac{F^*/A}{F/A} = \frac{\tau^*}{\tau} \quad (2)$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (3)$$

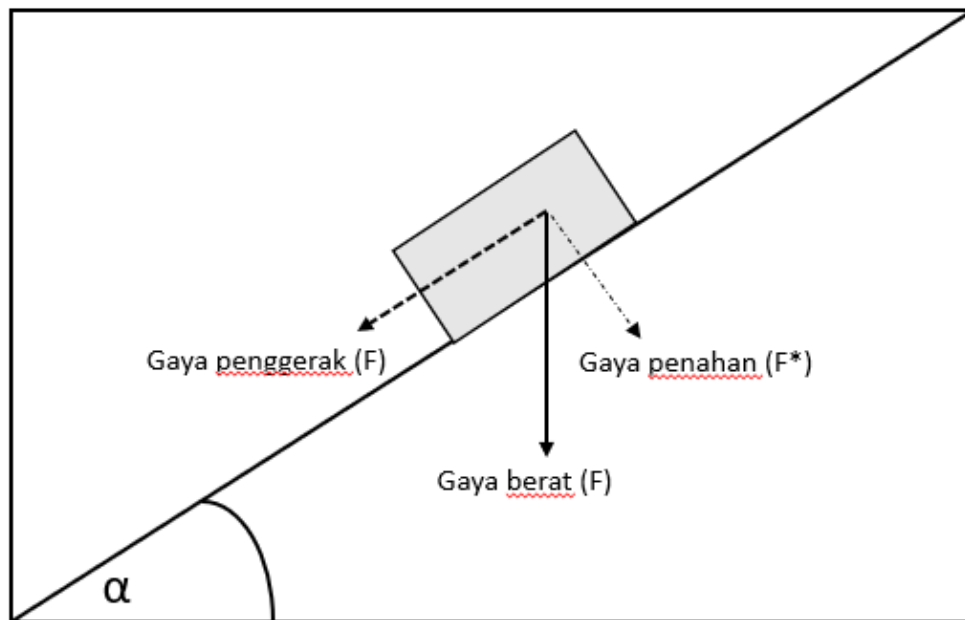
Dimana:

τ = adalah kekuatan geser,

c = adalah kohesi,

σ_n = adalah tegangan normal,

ϕ = adalah Sudut gesek dalam.



Gambar 2 Faktor keamanan sederhana

Apabila $FK > 1$, lereng dianggap stabil dimana gaya penahan lebih besar gaya penggerak, $FK < 1$, lereng dianggap tidak stabil dimana gaya penahan lebih kecil gaya penggerak dan $FK = 1$, lereng dalam keadaan setimbang, tetapi akan segera longsor jika mendapat sedikit gangguan dimana gaya penahan sama dengan gaya penggerak, (Arif, 2016). Persamaan-persamaan yang sering digunakan untuk menentukan nilai faktor keamanan mengasumsikan nilai faktor keamanan tidak akan berubah pada bidang-bidang diskontinu, dan dianggap berhubungan dengan kesetimbangan momen dan kesetimbangan gaya. Kesetimbangan Momen umumnya digunakan untuk analisis momen inersia, dengan mempertimbangkan bidang gelincirnya, maka persamaan kesetimbangan momen ditunjukkan pada Persamaan 4. Sedangkan Kesetimbangan Gaya diaplikasikan pada keruntuhan sejajar maupun rotasional termasuk pada bidang gelincir planar, atau bidang gelincir poligonal. Persamaan kesetimbangan gaya ditunjukkan pada Persamaan 5.

$$F_m = \frac{M_r}{M_d} \quad (4)$$

$$F_f = \frac{F_r}{F_d} \quad (5)$$

Dimana:

M_r = jumlah dari momen penahan (*resisting moment*).

M_d = jumlah momen penggerak (*driving moment*)

F_r = jumlah dari gaya penahan (*resisting forces*)

F_d = jumlah momen penggerak (*driving forces*)

Kriteria kestabilan lereng menggunakan acuan sesuai Kepmen ESDM Nomor 1827 tahun 2018 dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1 Nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor lereng tambang.

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (<i>Consequences of Failure/ CoF</i>)	Kriteria dapat diterima (Acceptance Criteria)		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (Min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (min)	Probabilitas Longsor (<i>Probability of Failure</i>) (maks) PoF (FK≤1)
Lereng tunggal	Rendah s.d.	1,1	Tidak ada	25-50%
	Tinggi			
Inter-ramp	Rendah	1,15-1,2	1,0	25%
	Menengah	1,2-1,3	1,0	20%
	Tinggi	1,2-1,3	1,1	10%
Lereng keseluruhan	Rendah	1,2-1,3	1,0	15-20%
	Menengah	1,3	1,05	10%
	Tinggi	1,3-1,5	1,1	5%

Sumber: Kepmen ESDM RI 1827K/K/30/MEM/2018

2.3 Faktor Pengaruh Kestabilan Lereng

Kestabilan lereng galian bervariasi sepanjang waktu. Hal ini disebabkan oleh adanya perubahan tekanan air pori, tegangan geser, dan pembebanan pada lereng

yang mengakibatkan perubahan kekuatan geser material. Perubahan tersebut umumnya diakibatkan oleh adanya perubahan musim dan adanya proses pelapukan, (Hasibuan dan Heriyadi, 2020):

1. Geometri lereng

Geometri lereng mencakup tinggi dan sudut kemiringan lereng. Semakin besar kemiringan dan tinggi lereng, kestabilan lereng akan semakin berkurang sehingga lereng cenderung semakin mudah longsor. Apabila suatu lereng mempunyai kemiringan yang tetap, maka perubahan ketinggian akan mengakibatkan perubahan kestabilan dari lereng yang bersangkutan karena berat material lereng yang harus ditahan oleh kekuatan geser tanah/batuan semakin besar, sehingga semakin tinggi lereng maka sudut kemiringan lereng yang diperlukan akan semakin kecil.

2. Struktur geologi

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

- a. Sesar adalah suatu rekahan pada batuan yang telah mengalami pergeseran sehingga terjadi perpindahan antara bagianbagian yang berhadapan dengan arah yang sejajar dengan bidang patahan. Terjadi apabila blok batuan yang dipisahkan oleh rekahan telah bergeser sedemikian rupa hingga lapisan batuan pada blok yang satu terputus atau terpisah dan tidak bersambungan lagi dengan lapisan pada blok yang lainnya. Ukuran panjang maupun kedalaman sesar dapat berkisar antara beberapa sentimeter saja sampai mencapai ratusan kilometer. Berdasarkan pada sifat gerakannya, sesar dapat dibedakan menjadi 3 jenis yaitu; Sesar Normal (Gravity Fault), Sesar Naik (Reverse Fault) dan Sesar Mendatar (Horizontal Fault), (Bujung, 2020).

- b. Kekar adalah struktur rekahan dalam blok batuan dimana tidak ada atau sedikit sekali mengalami pergeseran (hanya retak saja), umumnya terisi oleh sedimen setelah beberapa lama terjadinya rekahan tersebut. Rekahan atau struktur kekar dapat terjadi pada batuan beku dan batuan sedimen.

Pada batuan beku, kekar terjadi karena pembekuan magma dengan sangat cepat (secara mendadak). Pada batuan sedimen, kekar terjadi karena intrusi atau ekstrusi dan pengaruh iklim atau musim, (Bujung, 2020).

- c. Lipatan adalah perubahan bentuk dan volume pada batuan yang ditunjukkan oleh lengkungan atau melipatnya batuan tersebut akibat pengaruh suatu tegangan (gaya) yang bekerja pada batuan tersebut yang umumnya refleksi perlengkungannya ditunjukkan oleh perlapisan pada batuan sedimen serta bisa juga pada foliasi batuan metamorf . Secara umum, jenis-jenis lipatan yang terpenting adalah antiklin, yaitu lipatan yang kedua sayapnya mempunyai arah kemiringan yang saling berlawanan dan sinklin, yaitu lipatan yang kedua sayapnya mempunyai arah kemiringan yang menuju ke satu arah yang sama, (Bujung, 2020).

3. Aktivitas manusia

Aktivitas seperti pengalihan, pembuatan jalan tambang, dan bendungan menyebabkan perubahan keseimbangan gaya-gaya dalam sehingga akan menyebabkan bertambahnya gaya geser dan mengurangi kestabilan lereng.

4. Iklim dan curah hujan

Iklim berpengaruh terhadap kemandapan lereng karena iklim mempengaruhi perubahan temperatur. Temperatur yang cepat berubah akan mempercepat proses pelapukan batuan, yang mengurangi gaya tahan dari lereng tersebut. Pelapukan berlangsung lebih cepat pada daerah tropis akibatnya kelongsoran pada lereng lebih cepat berlangsung. Adanya kandungan air pada pori batuan yang lebih besar dapat menyebabkan bertambahnya gaya penggerak untuk terjadinya kelongsoran. Air mempunyai fungsi sebagai pelarut dan sebagai media transportasi material pengisi celah rekahan yang bertambah akibat adanya peningkatan curah hujan dan pengaruh air tanah dapat menimbulkan tegangan air yang akan mengurangi tegangan normal sehingga akan memperkecil kekuatan geser.

5. Sifat fisik dan mekanik tanah dan batuan

Sifat fisik dan mekanik batuan atau tanah yang diperlukan sebagai data kemandapan lereng adalah:

a. Bobot isi material

Nilai bobot isi material akan menentukan besarnya beban yang diterima pada permukaan bidang longsor. Semakin besar bobot isi pada suatu lereng tambang maka gaya geser penyebab kelongsoran akan semakin besar, dengan demikian kestabilan lereng semakin berkurang.

b. Porositas material

Material yang mempunyai porositas besar akan banyak menyerap air, dengan demikian bobot isinya menjadi lebih besar, sehingga memperkecil kestabilan lereng. Adanya air dalam batuan juga akan menimbulkan tekanan air pori yang akan memperkecil kuat geser batuan. Batuan yang mempunyai kuat geser kecil akan lebih mudah longsor.

c. Kandungan air

Keberadaan air, terutama air tanah (*ground water*) sangat mempengaruhi kestabilan suatu lereng. Air tanah memiliki tekanan air pori (*pore water pressure*) yang dapat menimbulkan gaya angkat (*uplift force*) sehingga menurunkan kekuatan geser dan mengakibatkan lereng mudah longsor.

d. Kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ)

Kohesi (c) adalah gaya tarik menarik antara partikel dalam batuan atau tanah, dinyatakan dalam satuan berat per satuan luas. Kohesi batuan atau tanah akan semakin besar jika kekuatan gesernya makin besar. Sedangkan sudut gesek dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam batuan atau tanah. Terbentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut gesek dalam suatu material, maka kuat geser batuan juga akan semakin besar, Nilai kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) diperoleh dari pengujian laboratorium yaitu pengujian kuat geser langsung (*direct shear strength test*).

2.4 Longsoran

Kelongsoran lereng terjadi ketika gaya-gaya penggerak, yang menyebabkan material bergerak ke bawah, lebih besar daripada gaya penahannya seperti

ditunjukkan pada Gambar 3. Secara garis besar, kelongsoran lereng tambang terbuka terjadi pada beberapa kondisi berikut ini (Azizi, dkk., 2012) :

1. *Global failure* (longsor besar)

Longsor yang terjadi pada overal slope dapat membahayakan keselamatan pekerja dan keberlangsungan tambang. Longsor ini memerlukan waktu rehabilitasi cukup lama, mengganggu jadwal produksi dan pemenuhan kontrak penjualan.

2. *Inter-ramp failure* (longsor multi jenjang)

Longsor yang terjadi pada lebih dari 1 jenjang, dan kadangkala merusak jalan angkutan ke tambang.

3. *Bench failure* (longsor tunggal)

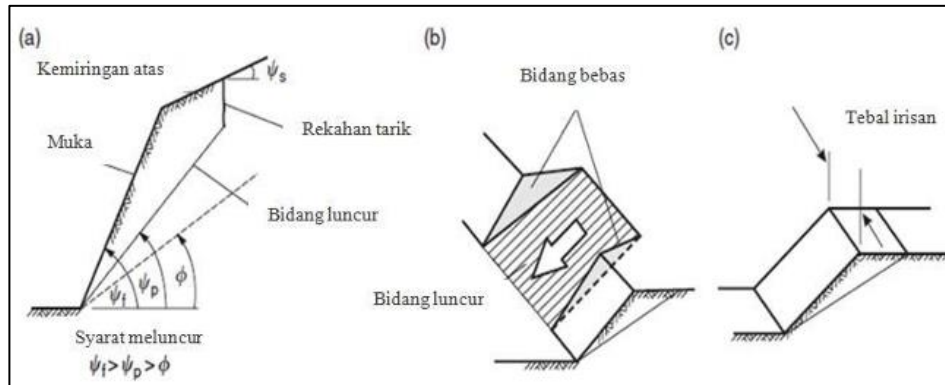
Kelongsoran lereng hanya mempengaruhi operasi produksi di sekitar jenjang yang longsor

Macam-macam longsor yang sering terjadi pada lereng tambang berdasarkan proses longsornya dapat dibedakan menjadi empat macam, yaitu, (Pane & Anaperta, 2016):

1. Longsoran bidang (*plane failure*)

Longsoran bidang merupakan suatu longsor batuan yang terjadi sepanjang bidang lurur yang dianggap rata. Bidang lurur tersebut dapat berupa sesar/patahan, kekar (*joint*) maupun bidang perlapisan batuan. Syarat-syarat terjadinya longsor bidang sebagai berikut (Wyllie dan Mah, 2004):

- a. Terdapatnya bidang lurur bebas, berarti kemiringan bidang lurur harus lebih kecil daripada kemiringan lereng ($\phi_p < \phi_f$);
- b. Arah bidang lurur sejajar atau mendekati sejajar dengan arah lereng (maksimum 20°);
- c. Kemiringan bidang gelincir lebih besar daripada sudut gesek dalam batumannya ($\phi_p > \phi$); dan
- d. Terdapat bidang bebas (tidak terdapat gaya penahan) pada kedua sisi longsor.

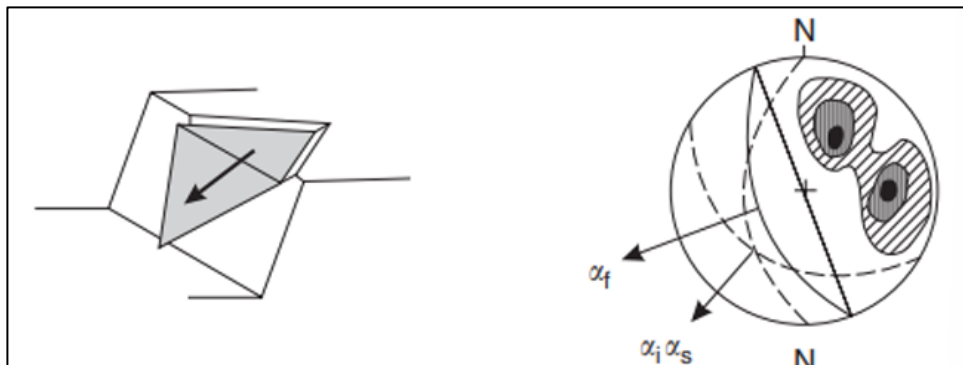


Gambar 3 Geometri longsor bidang

2. Longsor baji (wedge failure)

Longsor baji dapat terjadi pada suatu batuan jika terdapat lebih dari satu bidang lemah yang bebas dan saling berpotongan seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Sudut perpotongan antara bidang lemah tersebut harus lebih besar dari sudut gesek dalam batumannya. Longsor baji dapat terjadi dengan syarat geometri sebagai berikut:

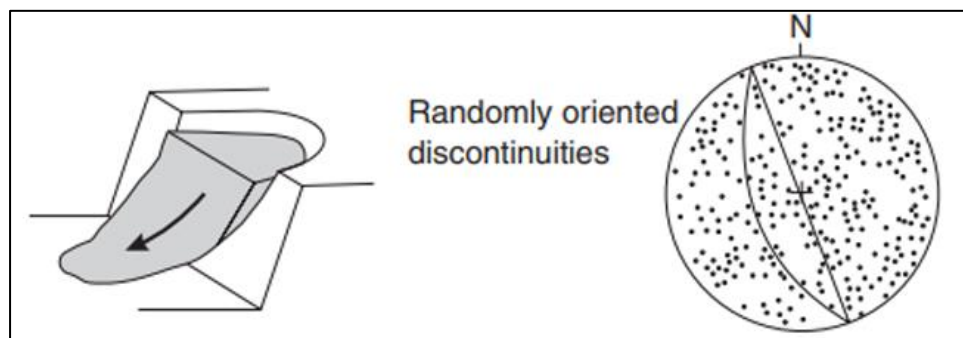
- Permukaan bidang lemah A dan bidang lemah B rata, tetapi kemiringan bidang lemah B lebih besar daripada bidang lemah A;
- Arah penujaman garis potong harus lebih kecil daripada sudut kemiringan lereng;
- Bentuk longsor dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dan kedua bidang lemah; dan
- Bentuk longsor dibatasi oleh muka lereng, bagian atas lereng dari kedua bidang lemah.



Gambar 4 Geometri longsor baji

3. Longsoran busur (*circular failure*)

Longsoran busur hanya terjadi pada tanah atau material yang bersifat seperti tanah. Antara partikel tanah tidak terikat satu sama lain. Longsoran busur berbeda dengan tipe longsoran lain yang dikontrol oleh struktur geologi seperti adanya bidang perlapisan dan joint. Batuan dengan tingkat alterasi dan pelapukan tinggi serta memiliki orientasi bidang diskontinu acak cenderung longsor dalam bentuk busur seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Hancuran batuan yang terdapat pada daerah penimbunan dengan dimensi besar juga memiliki kecenderungan longsor dalam bentuk ini.

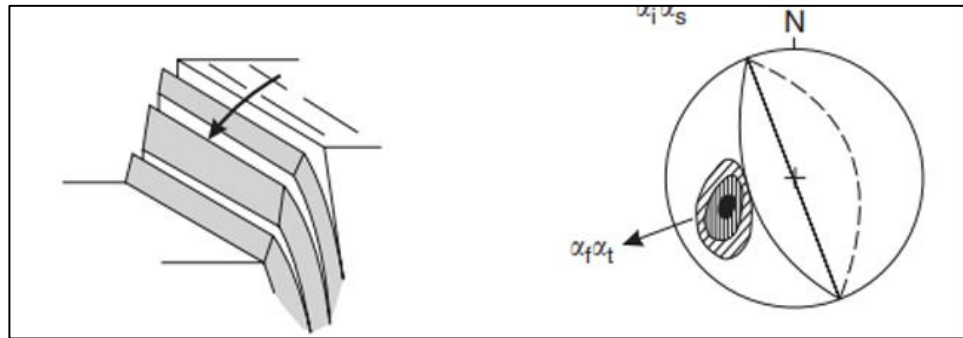


Gambar 5 Geometri longsoran busur

4. Longsoran guling (*toppling*)

Longsoran guling terjadi apabila bidang-bidang lemah yang hadir di lereng mempunyai kemiringan yang berlawanan dengan kemiringan lereng dimana struktur bidang lemahnya berbentuk kolom seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Keadaan tersebut dapat digambarkan dengan balok-balok yang diletakkan diatas sebuah bidang miring. Berdasarkan bentuk dan proses menggulingnya, longsoran guling dapat dibedakan dalam tiga jenis, yaitu:

- a. Longsoran guling setelah mengalami benturan (*flexural toppling*);
- b. Longsoran guling yang berupa blok (balok-balok); dan
- c. Gabungan antara kedua longsoran sebelumnya (*block-flexural*).



Gambar 6 Geometri longsoran guling

2.5 Metode Kestimbangan Batas (Limit Equilibrium Methods)

Metode kestimbangan batas merupakan metode penentuan faktor keamanan yang menggunakan prinsip kestimbangan pada gaya yang berkerja bidang gelincir lereng. Metode kestimbangan batas secara umum membagi masa batuan menjadi beberapa bagian atau irisan, (Arifadillah, dkk., 2021). Metode kestimbangan batas atau metode *limit equilibrium* dikenal sebagai metode irisan karena bidang longsoran dari lereng tersebut dibagi menjadi beberapa irisan. Salah satu karakteristik metode irisan yaitu geometri dari bidang gelincir harus ditentukan atau diasumsikan terlebih dahulu. Penyederhanaan perhitungan bidang runtuh biasanya dianggap sebagai sebuah busur lingkaran, gabungan busur lingkaran dengan garis lurus, atau gabungan dari beberapa garis lurus. Setelah geometri bidang runtuh ditentukan, massa di atas bidang runtuh kemudian dibagi ke dalam sejumlah irisan tertentu. Tujuan dari pembagian tersebut adalah untuk mempertimbangkan adanya variasi kekuatan geser dan tekanan air pori sepanjang bidang runtuh. Langkah selanjutnya adalah menghitung gaya-gaya yang bekerja di setiap irisan menggunakan data-data pada setiap irisan besarnya faktor keamanan dapat dihitung menggunakan persamaan kestimbangan, (Marini, dkk., 2019).

Menurut Krahn 2004 dalam Arif 2016, terdapat sejumlah variasi dari metode irisan disebabkan oleh perbedaan asumsi-asumsi yang dan kondisi kestimbangan yang dapat dipenuhi:

Tabel 2 Asumsi dan kondisi kesetimbangan pada metode irisan

Metode	Asumsi
Irisan Biasa (Fellenius)	Resultan gaya antar-irisan sama dengan nol dan bekerja sejajar dengan permukaan bidang runtuh.
Bishop yang disederhanakan (Bishop <i>Simplified</i>)	Gaya geser antar irisan sama dengan nol.
Janbu yang disederhanakan (Janbu <i>Simplified</i>)	Gaya geser antar-irisan sama dengan nol. Faktor koreksi digunakan sebagai faktor empiris untuk memasukkan efek dari gaya geser antar-irisan
Lowe-Karafiath	Kemiringan dari resultas gaya geser dan normal antar-irisan sama dengan rata-rata dari kemiringan permukaan lereng dan kemiringan bidang runtuh
Crops of Engineer	Kemiringan dari resultan gaya geser normal antar irisan besarnya sama dengan: a. Kemiringan permukaan lereng; atau b. Kemiringan dari kaki bidang runtuh ke puncak bidang runtuh.
Spencer	Kemiringan dari resultan gaya geser dan normal antar-irisan adalah sama untuk semua irisan.
Morgenstern-Price	Kemiringan gaya geser antar-irisan besarnya sebanding dengan diasumsikan
Kesetimbangan Batas Umum	Sudut gaya antar-irisan besarnya sebanding dengan fungsi tertentu yang diasumsikan

Sumber: Arif (2016)

Berdasarkan kondisi kesetimbangan yang dapat dipenuhi, metode irisan dapat dikelompokkan menjadi dua kategori metode yang tidak memenuhi semua kondisi kesetimbangan gaya dan momen, antara lain yaitu metode irisan biasa, metode Bishop yang disederhanakan (*bishop simplified*), metode Janbu yang disederhanakan (*Janbu simplified*), dan metode Corps of Engineer; dan metode yang memenuhi semua kondisi kesetimbangan gaya dan momen, antara lain yaitu Metode Spencer, Metode Morgenstern-Price dan Metode Kesetimbangan Batas Umum, (Marini, dkk., 2019).

Tabel 3 Kondisi kesetimbangan yang dipenuhi

Metode	Keseimbangan Gaya		Kesetimbangan Momen	Kemiringan Resultan
	Vertikal	Horizontal		
Irisan Biasa (Fellenius)	Tidak	Tidak	Ya	Tidak ada
Bishop yang disederhanakan (Bishop <i>Simplified</i>)	Ya	Tidak	Ya	Horizontal
Janbu yang disederhanakan (Janbu <i>Simplified</i>)	Ya	Ya	Tidak	Horizontal
Janbu yang Umum	Ya	Ya	Tidak	Rata-rata kemiringan permukaan dan kemiringan dasar irisan
Lowe-Karafiath	Ya	Ya	Tidak	
Crops of Engineer	Ya	Ya	Tidak	
Spencer	Ya	Ya	Ya	Konstan

Metode	Keseimbangan Gaya		Kesetimbangan	Kemiringan
	Vertikal	Horizontal	Momen	Resultan
Morgenstern-Price	Ya	Ya	Ya	Bervariasi
Kesetimbangan Batas Umum	Ya	Ya	Ya	Bervariasi

Sumber: Arif (2016)

2.6 Probabilitas Kelongsoran (Probabilitas Failure)

Analisis kestabilan lereng dihadapkan pada berbagai kondisi ketidakpastian. Ketidakpastian menjadikan analisis kestabilan lereng dipengaruhi oleh nilai parameter yang acak yang tidak dapat direpresentasikan oleh suatu nilai spesifik melainkan cenderung berada pada suatu rentang nilai tertentu, (Fikri, dkk., 2018). Metode kesetimbangan batas dapat menunjukkan beberapa nilai yaitu SF (*safety factor*), POF (*probability of failure*), dan RI (*reliability index*), (Kosim, dkk., 2015). Metode probabilitas dapat menghasilkan nilai dari perkiraan keterjadian sesuatu dengan memperhatikan variabel acak yang ditentukan secara statistik.

Fungsi distribusi probabilitas akan menggambarkan penyebaran suatu variabel acak yang digunakan untuk memperkirakan nilai probabilitas kemunculan suatu parameter. Fungsi distribusi probabilitas memiliki sifat-sifat penyebaran yang khas dan unik yang menjadikan fungsi yang satu akan berbeda dengan yang lainnya. Hal ini tidak menutup kemungkinan bahwa suatu fungsi distribusi merupakan turunan dari fungsi yang lainnya. Probabilitas Kelongsoran (PK) didefinisikan sebagai rasio antara jumlah lereng longsor hasil analisis ($FK < 1$) dengan jumlah total analisis (sampel atau simulasi) yang dinyatakan dalam persen, dapat ditunjukkan pada Persamaan 6, (Putra dan Heriyadi, 2019):

$$PK = \frac{\text{numfailed} (FK < 1)}{\text{numtotal}} \times 100\% \text{ atau } PK = P[FK < 1] \times 100\% \quad (6)$$

Semakin tinggi nilai PoF maka kondisi lereng semakin tidak stabil. Standar aman PoF yang dapat digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Deskripsi nilai PoF pada lereng tambang

<i>Category</i>	<i>Description</i>	<i>Acceptable PoF</i>
1	<i>Critical slopes where failure may affect continuous operation and pit safety</i>	<5%
2	<i>Slopes where failure have a significant impact on costs and safety</i>	<15%
3	<i>Slopes where failure has no impact on costs and where minimal safety hazards exist</i>	<30%

Sumber: Read dan Stacey (2009)

Metode probabilitas untuk analisis kestabilan lereng membutuhkan parameter statistik sebagai batasan probabilitas. Parameter statistik tersebut yaitu nilai rata-rata, standar deviasi, nilai relatif maksimum dan minimum.

1. Nilai rata-rata

Nilai rata-rata adalah nilai jumlah total ($\sum X$) dari data yang ada dibagi dengan banyaknya data (N). Nilai rata-rata berguna untuk menentukan sebuah perwakilan dari berbagai data yang ada

2. Standar deviasi

Standar deviasi merupakan metode statistik dalam mengukur penyebaran data secara kuantitatif. Standar deviasi digunakan dalam analisis kestabilan lereng dalam menentukan variasi dari data mekanik dan fisik.

3. Nilai relatif maksimum dan minimum

Nilai relatif maksimum yang didapatkan dari nilai maksimum dikurangi dengan nilai rata-rata sedangkan nilai relatif minimum dihasilkan dari pengurangan antara rata-rata dengan nilai minimum.

Probabilitas kelongsoran adalah salah satu hasil analisis kestabilan lereng yang ditunjukkan dalam bentuk persentase dari jumlah nilai faktor keamanan lereng yang memiliki nilai $FK < 1$ dibagi dengan total FK yang dilakukan pengujian. Analisis probabilitas kelongsoran dapat menggunakan metode Probabilitas Monte Carlo. Monte Carlo (MC) merupakan metode yang sederhana dan sering digunakan untuk mengevaluasi permasalahan berulang kali dengan parameter masukan berupa parameter acak. Simulasi Monte Carlo dikategorikan sebagai metode sampling

karena parameter masukan acak dihasilkan dari distribusi probabilitas untuk mensimulasikan proses pengambilan sampel dari populasi yang sebenarnya. Metode yang paling banyak digunakan dalam perhitungan probabilitas kelongsoran (PK) adalah metode kesetimbangan batas dengan simulasi Monte Carlo, (Ganang, dkk., 2018)

2.7 Analisis Balik (*Back analysis*)

Analisis balik merupakan metode analisis yang dilakukan untuk mengetahui parameter kekuatan batuan, yakni kohesi dan sudut gesek dalam sebelum terjadi longsor atau lereng dalam keadaan setimbang (Hoek and Bray, 1981). Analisis balik bertujuan untuk mencari prediksi nilai kohesi dan sudut gesek dalam terendah yang dapat mengakibatkan kelongsoran. Analisis balik dilakukan pada longsor yang telah terjadi dengan menggunakan geometri lereng sebelum longsor terjadi. Lebih lanjut, analisis balik juga menggunakan bidang gelincir yang disesuaikan dengan kondisi bidang gelincir lereng yang telah mengalami longsor. Nilai kohesi dan sudut gesek dalam bidang gelincir diperkirakan hingga diperoleh nilai faktor keamanan lereng (FK) sama dengan 1 atau mendekati 1 (Suryadi dan Heriyadi, 2018).

Prosedur analisis balik ini sepenuhnya merupakan perhitungan terbalik dari analisis biasa, sehingga disebut “*back analysis*”, sedangkan analisis biasa disebut “*forward analysis*”. Dalam analisis biasa, program komputer canggih apapun dapat digunakan, tidak peduli berapa banyak data input yang diperlukan, selama semua data dapat ditentukan dengan uji laboratorium dan in situ, sedangkan analisis balik hanya sejumlah data pengukuran (data input untuk analisis balik) yang tersedia. Ini berarti bahwa semua data masukan yang diperlukan untuk analisis biasa hampir tidak dapat diidentifikasi oleh analisis balik. Untuk mengatasi kesulitan ini, persamaan konstitutif massa batuan yang digunakan dalam analisis balik harus cukup sederhana untuk dapat menghitung kembali semua parameter mekanik persamaan dari sejumlah data pengukuran lapangan yang terbatas. Untuk mencapai tujuan ini, hasil pengukuran lapangan harus ditafsirkan dengan benar selama konstruksi.

Metode analisis balik dari deformasi aktual permukaan lereng tersebut telah dikembangkan oleh Sakurai dan Nakayama (1999) dengan memperkenalkan anisotropic parameter (m) dalam analisisnya. Secara umum, metode ini dilakukan melalui pemodelan geoteknik dengan salah satu input variabelnya yaitu anisotropic parameter (m). Parameter anisotropik m merupakan fungsi dari maximum shear strain. Kemudian dilakukan iterasi parameter anisotropik (m) pada lapisan-lapisan batuan dalam model untuk mendapatkan deformasi lereng pemodelan yang mendekati deformasi aktual lereng hasil pemantauan instrumen. Selanjutnya, nilai-nilai parameter anisotropik (m) tersebut digunakan untuk menentukan nilai kekuatan lapisan-lapisan batuan pada lereng yang kemudian dapat digunakan dalam perhitungan faktor keamanan lereng. Beberapa penelitian yang dilakukan Andhini (2020), Rizaldi dan Heriyadi, (2019) dan Febriadi (2020) menunjukkan hasil perkiraan nilai kohesi (C) dan sudut gesek dalam (ϕ) hasil analisis balik umumnya lebih kecil dari nilai hasil uji laboratorium. Hasil perkiraan nilai C dan ϕ dijadikan masukan dalam menghitung FK rekomendasi desain rekayasa keteknikan.