

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lereng merupakan permukaan tanah atau batuan yang memiliki kemiringan terhadap bidang horizontal (Abramson et al., 2020). Secara alamiah, lereng dapat terbentuk melalui proses geologi seperti erosi, sedimentasi, dan aktivitas tektonik. Sementara itu, lereng buatan dibuat oleh manusia untuk berbagai keperluan seperti konstruksi jalan, bangunan, dan aktivitas pertambangan (Duncan & Wright, 2021). Dalam kegiatan pertambangan terbuka, lereng terbentuk baik pada sisi galian maupun pada area timbunan material buangan yang disebut disposal. Kondisi lereng menjadi aspek yang sangat penting karena kestabilannya berpengaruh langsung terhadap keselamatan kerja, keberlangsungan operasi tambang, serta dampak lingkungan. Lereng yang tidak dirancang dengan baik berpotensi mengalami kelongsoran yang dapat menimbulkan kerugian material maupun korban jiwa.

Kestabilan lereng ditentukan oleh berbagai faktor, antara lain karakteristik material penyusun, geometri lereng, kondisi geologi, serta keberadaan air tanah dan air permukaan. Faktor eksternal seperti curah hujan tinggi, gempa bumi, maupun beban tambahan akibat aktivitas operasional tambang juga dapat memengaruhi stabilitas lereng secara signifikan (Zhang et al., 2021). Apabila gaya pendorong (*driving force*) yang bekerja pada lereng lebih besar daripada gaya penahan (*resisting force*), maka lereng akan mengalami kegagalan atau longsor. Oleh karena itu, perencanaan geometri lereng yang tepat menjadi aspek krusial dalam upaya pencegahan longsor. Dalam kajian geoteknik, analisis kestabilan lereng dilakukan untuk mengevaluasi faktor keamanan (*factor of safety*) sebagai indikator tingkat kestabilan lereng (Duncan & Wright, 2021).

Disposal harus direncanakan secara cermat agar timbunan berada dalam kondisi stabil, mengingat material timbunan umumnya bersifat lepas dan memiliki kekuatan geser relatif rendah (Sari et al., 2020). Seiring dengan meningkatnya volume material buangan di PT Ceria Nugraha Indotama, diperlukan standar geometri lereng disposal yang mempertimbangkan sudut kemiringan, tinggi lereng, dan lebar berm berdasarkan parameter geoteknik setempat. Namun, standar dan batas aman (*limit*) geometri lereng disposal belum tersedia secara spesifik sesuai dengan kondisi lokasi penelitian. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menentukan standar dan batas aman geometri lereng disposal berdasarkan analisis kestabilan lereng, sehingga dapat dijadikan acuan dalam merancang desain secara aman pada lokasi penelitian serta memberikan kontribusi akademik dalam pengembangan kajian geoteknik lereng timbunan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana standar geometri lereng tunggal yang memenuhi kriteria kestabilan pada disposal PT. Ceria Nugraha Indotama?
2. Berapa nilai limit *overall slope* pada berbagai variasi *overall height* berdasarkan hasil analisis kestabilan?
3. Bagaimana rekomendasi geometri lereng disposal yang aman dan sesuai dengan kriteria faktor keamanan pada disposal PT. Ceria Nugraha Indotama?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan standar dan batas aman geometri lereng pada area disposal PT. Ceria Nugraha Indotama
2. Menentukan limit *overall slope* pada variasi *overall height* di area disposal PT. Ceria Nugraha Indotama
3. Menyusun rekomendasi geometri lereng yang aman dan sesuai limit sebagai acuan desain pada area disposal PT. Ceria Nugraha Indotama

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah dalam ruang lingkup, sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian berada di PT. Ceria Nugraha Indotama, Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara
2. Parameter geoteknik yang digunakan hanya berupa kohesi, sudut geser dalam, bobot isi. Parameter lain seperti modulus elastisitas, permeabilitas, atau sifat dinamis detail tidak dianalisis secara mendalam.
3. Analisis kestabilan lereng dilakukan dengan menggunakan bantuan *Rocscience Slide V.6* dengan metode kesetimbangan batas (*Limit Equilibrium Method*), yaitu metode *Bishop Simplified* (longsor *circular*)
4. Kriteria keruntuhan yang digunakan yaitu *Mohr-Coulomb* untuk seluruh material
5. Faktor operasional (misalnya metode penumpukan, akses jalan, alat berat) tidak dianalisis secara teknis
6. Penelitian ini tidak membahas aspek ekonomi dan lingkungan secara rinci, fokus utama adalah pada analisis perencanaan geometri lereng disposal.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian terkait perencanaan geometri dan limit lereng disposal pada PT. Ceria Nugraha Indotama ini diharapkan dapat memberikan manfaat diantaranya sebagai berikut :

1. Dapat dijadikan referensi dan rujukan dalam bidang pendidikan khususnya pada bidang ilmu geologi teknik maupun industri pertambangan.
2. Dapat dijadikan pertimbangan bagi perusahaan untuk langkah pengambilan keputusan untuk penentuan geometri lereng disposal.

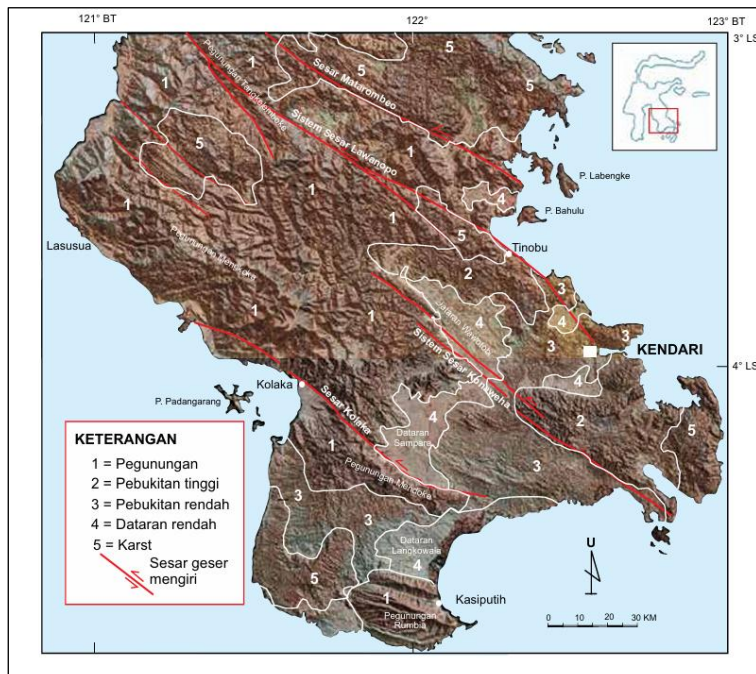
1.6 Kajian Teori

1.6.1 Geologi Regional

Geologi regional daerah penelitian merujuk pada Peta Geologi Lembar Lasusua Kendari, Sulawesi, skala 1:250.000 yang disusun oleh Simanjuntak et al. (1997). Pembahasan geologi regional mencakup tiga aspek utama, yaitu geomorfologi regional, stratigrafi regional, serta tektonik regional yang menggambarkan kondisi geologi umum di daerah tersebut.

1.6.1.1 Geomorfologi Regional

Setidaknya ada lima satuan morfologi yang dapat dibedakan dari citra IFSAR di bagian tengah dan ujung selatan Lengan Tenggara Sulawesi, yakni satuan pegunungan, satuan perbukitan tinggi, satuan perbukitan rendah, satuan dataran rendah, dan satuan karst (Gambar 1).



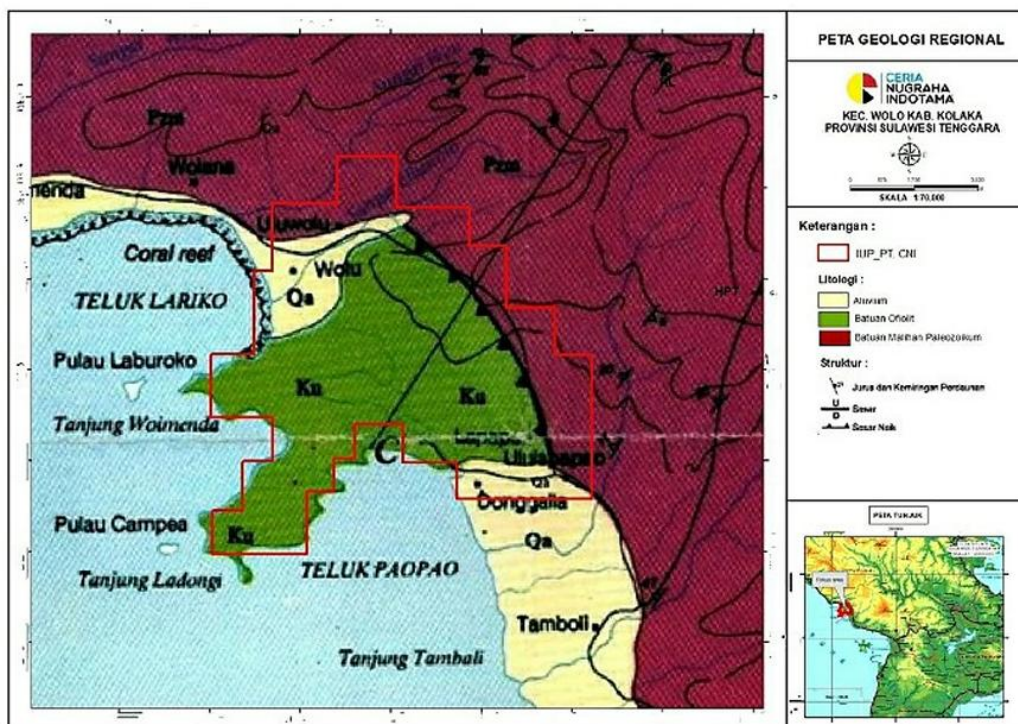
Gambar 1 Bagian selatan Lengan Tenggara Sulawesi dari citra IFSAR (Surono,2013)

Satuan morfologi pegunungan menempati bagian terluas di kawasan ini. Pegunungan Mendoke, dan Pegunungan Rumbia yang terpisah di ujung selatan Lengan Tenggara. Satuan morfologi ini mempunyai topografi yang kasar dengan kemiringan lereng tinggi. Rangkaian pegunungan dalam satuan ini mempunyai pola yang hampir sejajar berarah barat laut – tenggara. Arah ini sejajar dengan pola struktur sesar regional di kawasan ini. Pola tersebut mengindikasikan bahwa pembentukan morfologi pegunungan itu erat hubungannya dengan sesar regional. Satuan pegunungan terutama dibentuk oleh batuan malihan dan setempat oleh batuan ofiolit. Ada perbedaan morfologi yang khas di antara kedua batuan penyusun itu. Pegunungan yang disusun dari batuan ofiolit mempunyai punggung gunung yang panjang dan lurus dengan lereng relatif lebih rata, serta kemiringan yang tajam. Sementara itu, pegunungan yang dibentuk batuan malihan, punggung gunungnya terputus pendek pendek dengan lereng yang tidak rata walaupun bersudut tajam.

1.6.1.2 Stratigrafi Regional

Formasi batuan di sekitar daerah penelitian (secara regional dari yang paling muda) berdasarkan peta geologi lembar Lasusua-Kendari, Sulawesi meliputi Aluvium (Qa),

Batuan Ofiolit (Ku) dan Batuan Malihan Paleozoicum (Pzm) seperti terlihat pada Gambar 2 (Rusmana dkk, 1993)



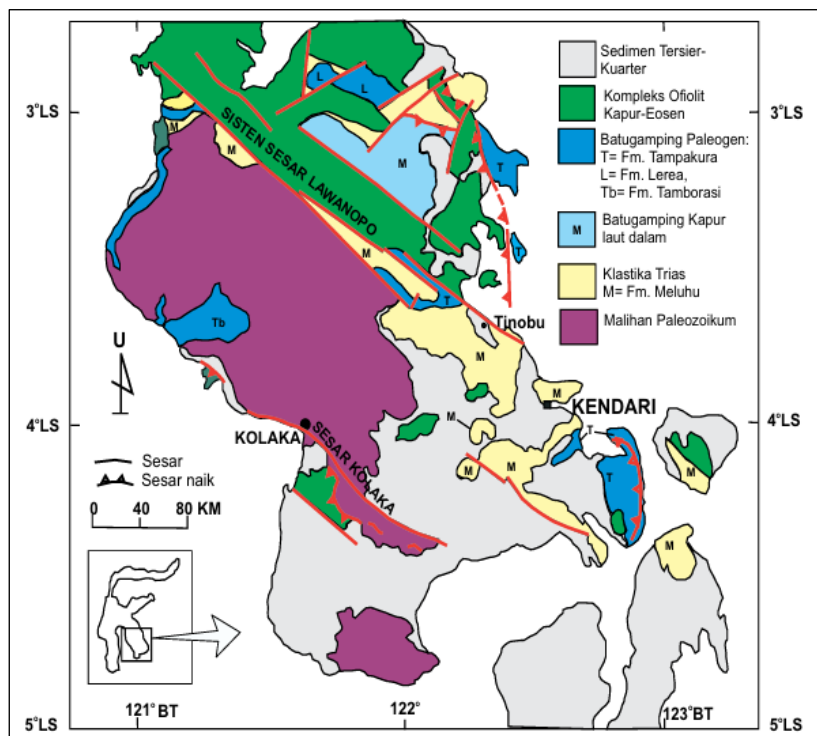
Gambar 2 Peta Geologi Regional Daerah Penelitian (CNI, 2017)

1. Aluvium (Qa) terdiri atas kerikil, kerakal, pasir lempung dan lumpur. Satuan ini merupakan hasil dari endapan sungai, rawa dan endapan pantai.
2. Batuan Ofiolit (Ku), Satuan ini terdiri dari peridotit harzburgit, dunit, gabro, basalt, dan serpentinit. Pada umumnya, batuan ultramafik di daerah ini telah mengalami pelapukan yang cukup kuat sehingga menghasilkan lapisan laterit, mencapai ketebalan beberapa meter sampai belasan meter. Mineral garnierit, magnetit, dan oksida besi sering dijumpai di daerah ini. Batuan ofiolit ini ditindih tak selaras oleh Formasi Matano yang berumur Kapur Akhir, sehingga umur batuan diduga lebih tua dari Kapur Akhir. Batuan ofiolit ini tersebar luas di bagian timur laut dan utara lembar, serta sedikit di pantai barat (Teluk Bone), yaitu di Tanjung Ladongi dan Tanjung Toli-Toli
3. Batuan Malihan Paleozoicum (Pzm), Satuan ini terdiri dari batuan metamorf seperti sekis, gneiss, fikit, batusabak, dan sedikit pualam. Satuan ini diperkirakan berumur Karbon sampai Perem dan mempunyai hubungan menjemari dengan Batuan Pualam Paleozoikum.

1.6.1.3 Struktur Regional

Struktur regional daerah penelitian di Sulawesi Tenggara didominasi oleh keberadaan Sesar Kolaka, yaitu sesar geser mengiri berarah barat laut–tenggara yang masih aktif hingga sekarang. Sesar ini berasosiasi dengan sistem sesar besar lainnya seperti Sesar

Lawanopo, Sesar Konawehea, dan Sesar Matano yang merupakan bagian dari jejaring tektonik Sulawesi (Gambar 3). Akibat pergerakan sesar ini terbentuk dua cekungan tektonik utama, yaitu Cekungan Wawotobi yang berarah barat laut–tenggara dengan panjang sekitar 75 km dan lebar 10 km, serta Cekungan Sampara yang berarah timur laut–barat daya dengan panjang sekitar 20 km dan lebar 10 km. Kedua cekungan tersebut terbentuk akibat aktivitas Sesar Kolaka dan Sesar Konawehea yang terus mengalami penurunan hingga kini.



Gambar 3 Peta geologi Lengan Tenggara Sulawesi (disederhanakan dan dimodifikasi dari Rusmana dkk., 1993; Simandjuntak dkk., 1993)

Selain sesar geser, di wilayah barat laut Kolaka juga berkembang sesar naik, seperti Sesar Naik Labengke, yang mengangkat ofiolit ke atas Formasi Tampakura sehingga membentuk struktur imbrikasi. Analisis lineasi menunjukkan dua arah dominan, yaitu barat laut dan timur laut. Arah barat laut berkaitan dengan sistem sesar utama (Kolaka, Konawehea, dan Lawanopo), sedangkan arah timur laut berhubungan dengan sesar naik seperti Labengke dan Tolo. Keseluruhan struktur ini merupakan hasil dari interaksi antara kepingan benua Sulawesi Tenggara dengan ofiolit Sulawesi Timur, sehingga menjadikan daerah Kolaka sebagai zona tektonik yang sangat kompleks, aktif, dan terus berkembang. (Surono, 2013)

1.6.2 Pengertian Lereng

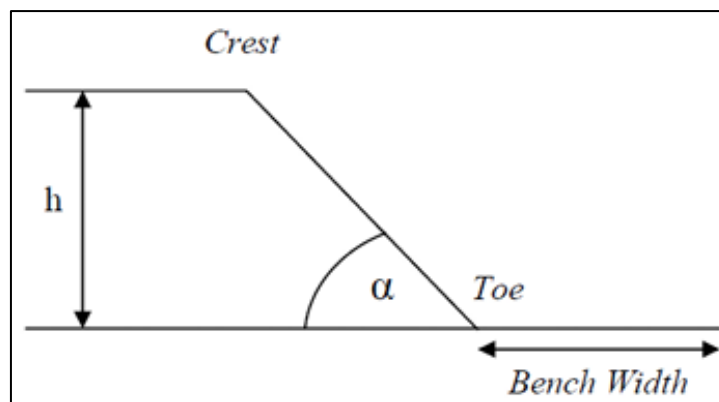
Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia (Arif, 2016). Lereng dibedakan menjadi dua, yaitu lereng alam dan lereng buatan. Adapun

perbedaan antara lereng alam dan lereng buatan menurut Rahardjo (2012) sebagai berikut :

- Lereng alam adalah lereng yang terbentuk karena fenomena alam yang terjadi akibat dari proses geologi. Lereng alam adalah lereng yang apabila tidak ada perlakuan dan atau penanganan terhadap lereng tersebut, baik berupa perubahan kemiringan atau 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.
- Lereng buatan adalah lereng yang terjadi akibat terbentuknya daerah galian dan/atau daerah timbunan pada proses perencanaan geometrik. Lereng buatan dibentuk dengan memperhatikan kemiringan dan tinggi kritis berdasarkan karakteristik material pembentuk lereng tersebut.

1.6.3 Geometri Lereng

Geometri lereng mencakup tinggi lereng dan sudut kemiringan lereng. Kemiringan dan tinggi suatu lereng sangat mempengaruhi kestabilan nya. Semakin besar kemiringan dan ketinggian suatu lereng, maka kestabilan semakin berkurang. 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 (Arif, 2016). Geometri lereng mencakup tinggi lereng, sudut kemiringan lereng dan lebar jenjang (Gambar 4).



Gambar 4 Geometri Lereng Tunggal (Mondol dkk, 2013)

Keterangan :

h : tinggi lereng

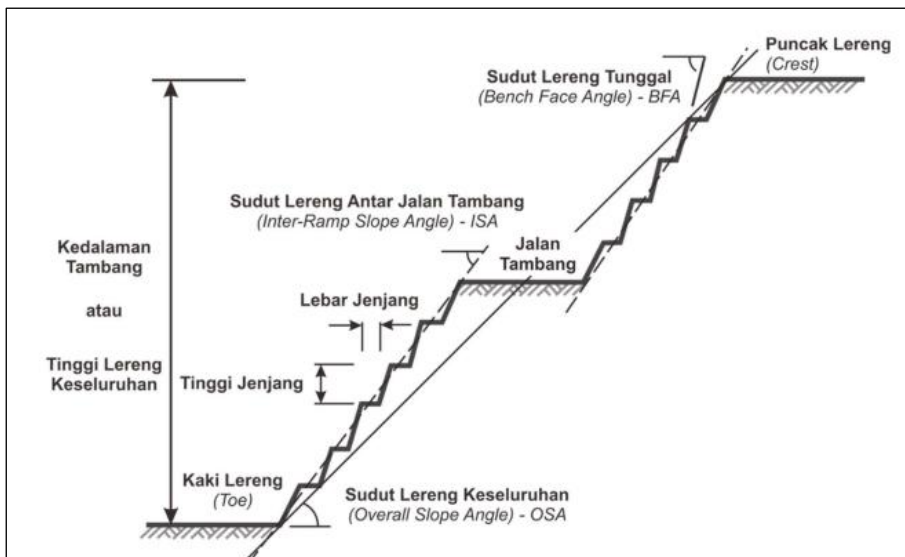
α : sudut lereng

Toe : kaki lereng

Crest : kepala lereng

Bench Width : lebar jenjang

Pada penambangan, lereng dapat dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu lereng tunggal, lereng *inter-ramp* dan lereng keseluruhan (Nurhidayat, 2017). Lereng tunggal adalah sebuah lereng yang memiliki satu buah jenjang dimana jenjang ini memiliki kemiringan dan ketinggian. Lereng *inter-ramp* atau biasa disebut *ramp* adalah sebuah lereng pada lereng keseluruhan yang berfungsi sebagai jalan angkut bagi alat transportasi maupun alat penggali pada tambang terbuka. Lereng keseluruhan adalah sebuah lereng skala besar pada tambang terbuka yang terdiri dari beberapa lereng *inter-ramp* maupun lereng tunggal dari mulai bagian paling atas maupun sampai bagian paling bawah (Gambar 5) (Said dkk, 2015).



Gambar 5 Geometri Lereng Keseluruhan (Said dkk, 2015)

1.6.4 Konsep Dasar Kestabilan Lereng

Menurut Kliche (1999) kestabilan lereng didefinisikan sebagai ketahanan suatu blok yang berada di atas suatu permukaan miring terhadap gelinciran dan runtuh. Kestabilan suatu lereng tambang dapat diketahui dari besar gaya penggerak dan gaya penahan yang terdapat pada lereng tersebut. Gaya penahan adalah gaya yang berperan untuk menahan suatu blok yang berada pada bidang miring agar tidak runtuh, sedangkan gaya penggerak adalah gaya yang berperan untuk menggerakkan blok yang berada pada bidang miring untuk runtuh. Suatu lereng dikatakan stabil apabila gaya penahannya lebih besar dibanding gaya penggerakannya. Jika kekuatan geser dari suatu material penyusun suatu lereng relatif kecil dan gaya penggerakannya besar, maka longsoran dapat terjadi (Terzhagi dan Peck, 1967).

Suatu kestabilan lereng dinyatakan dalam suatu istilah yang disebut sebagai Faktor Keamanan (FK). Parameter ini umumnya digunakan untuk mengetahui suatu kestabilan massa batuan atau tanah dalam suatu permasalahan geoteknik. Faktor Keamanan (FK) merupakan nilai yang didapatkan dari perbandingan gaya penahan dengan gaya penggerak. Dilihat pada Gambar 6 gaya berat yang bekerja pada suatu lereng akan menghasilkan gaya penggerak dan gaya penahan. Agar benda yang berada pada bidang miring tersebut tidak mengalami runtuh atau jatuh maka diperlukan

perhitungan sesuai dengan faktor keamanan yang diinginkan. Faktor Keamanan (FK) secara sederhana dapat dirumuskan sebagai berikut (Arif, 2016).

$$\begin{aligned} \text{Faktor Keamanan} &= \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}} = \frac{F'}{F} \\ &= \frac{\text{Momen Penahan}}{\text{Momen Penggerak}} = \frac{F' \times r}{F \times r} \end{aligned} \quad (1)$$

Adapun gaya penahan adalah kekuatan yang menahan lereng tersebut bergerak, yaitu kekuatan dari material tersebut seperti kohesi dan sudut gesek dalam. Sedangkan gaya penggerak adalah, gaya yang menyebabkan pergerakan pada lereng. Keruntuhan (*failure*) terjadi akibat tegangan geser melampaui kekuatan geser material. Mohr menjelaskan bahwa keruntuhan sebagai akibat dari kombinasi kritis antara tegangan normal dan geser dan bukan hanya akibat tegangan normal maksimum dan tegangan geser maksimum saja. Dengan menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb, maka kekuatan geser material dirumuskan sesuai dengan persamaan 2.

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

Keterangan :

τ_f = kekuatan geser maksimum (kN/m²)

c = kohesi (kN/m²)

σ = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

φ = sudut geser dalam (°)

Dengan menggunakan perhitungan yang lebih rinci, didapatkan nilai faktor keamanan pada persamaan di bawah ini:

$$\begin{aligned} \text{Faktor Keamanan} &= \frac{c \cdot A + \sigma_n \cdot A \tan \varphi}{W \cdot \sin \varphi F} \\ &= \frac{c \cdot A + W \cdot \cos \varphi F \cdot \tan \varphi}{W \cdot \sin \varphi F} \end{aligned} \quad (3)$$

Keterangan :

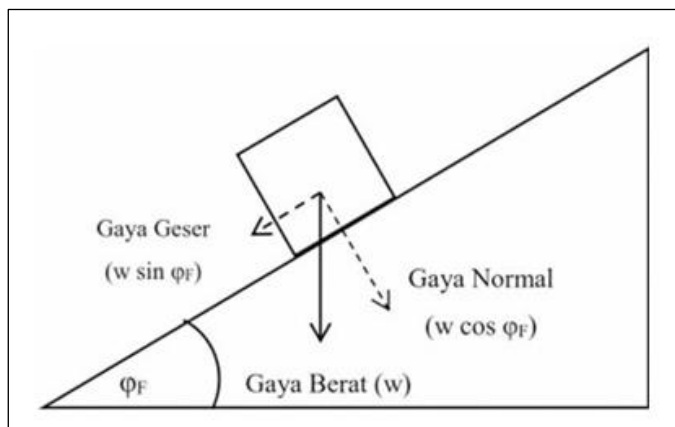
c = kohesi (kN/m²)

σ = tegangan normal pada bidang runtuh (kN/m²)

φ = sudut geser dalam (°)

W = berat (kN)

A = luas bidang runtuh (m)



Gambar 6 Skema gaya-gaya yang bekerja pada sebuah lereng (Arif, 2016)

Apabila nilai FK untuk suatu lereng $> 1,0$ (Gaya Penahan $>$ Gaya Penggerak), lereng tersebut dalam kondisi stabil. Namun, apabila nilai $FK < 1,0$ (Gaya Penahan $<$ Gaya Penggerak), lereng tersebut berada dalam kondisi tidak stabil dan mungkin akan terjadi longsoran pada lereng tersebut (Arif, 2016). Adapun nilai faktor keamanan dan probabilitas longsor pada lereng tambang berdasarkan Keputusan Menteri ESDM Nomor 1827 Tahun 2018 terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai Faktor Keamanan dan Probabilitas Longsor Lereng Tambang (Kepmen ESDM No. 1827 Tahun 2018)

Jenis Lereng	Keparahan Longsor (Consequences of Failure/ CoF)	Kriteria dapat diterima (Acceptance Criteria)		
		Faktor Keamanan (FK) Statis (Min)	Faktor Keamanan (FK) Dinamis (min)	Probabilitas Longsor (Probability of Failure) (maks) PoF ($FK \leq 1$)
Lereng tunggal	Rendah s.d. Tinggi	1,1	Tidak ada	25-50%
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%

1.6.5 Faktor Yang Memengaruhi Kestabilan Lereng

Kestabilan lereng dapat didefinisikan sebagai ketahanan blok di atas suatu permukaan miring (diukur dari garis horizontal) terhadap runtutan (*collapsing*) dan gelinciran (*sliding*) dalam hal ini setiap permukaan tanah yang memiliki kemiringan terhadap garis horizontal disebut lereng, baik alami maupun buatan manusia (Azhary dkk, 2015). Pada kondisi gaya penahan (terhadap longsoran) lebih besar dari gaya penggerak, lereng tersebut akan berada dalam kondisi yang stabil (aman). Namun apabila gaya penahan menjadi lebih kecil dari gaya penggeraknya, lereng tersebut akan menjadi tidak stabil dan akan terjadi longsoran. Kestabilan lereng dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Geometri Lereng

Geometri lereng mencakup tinggi lereng, sudut kemiringan lereng dan lebar jenjang, Kemiringan dan tinggi suatu lereng sangat mempengaruhi kestabilannya. Semakin besar kemiringan dan ketinggian suatu lereng, maka kestabilan semakin berkurang. 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. (Arif, 2016)

2. Penyebaran Batuan

Macam penyebaran dan hubungan antar batuan yang terdapat di daerah penyelidikan harus diketahui. Hal ini perlu dilakukan karena sifat fisis dan mekanis batuan berbeda sehingga kekuatan batuan dalam menahan bebannya sendiri juga berbeda. (Triyadi, 2015)

3. Relief Permukaan Bumi

Faktor ini memengaruhi laju erosi dan pengendapan serta menentukan arah aliran air permukaan dan air tanah. Hal ini disebabkan karena untuk daerah yang curam, kecepatan aliran air permukaan tinggi dan mengakibatkan pengikisan lebih intensif dibandingkan pada daerah yang landai, karena erosi yang intensif banyak dijumpai singkapan batuan menyebabkan pelapukan yang lebih cepat. Batuan yang lapuk mempunyai kekuatan yang rendah sehingga kemantapan lereng menjadi berkurang.

4. Struktur Geologi Regional dan Lokal

Struktur geologi yang perlu diketahui adalah bidang diskontinuitas atau bidang lemah seperti sesar, kekar, perlapisan, bidang ketidakselarasan dan sebagainya. Struktur geologi ini merupakan bidang lemah dalam massa batuan dan dapat menurunkan kemantapan lereng. Struktur Geologi ini juga mempengaruhi kekuatan batuan atau paling tidak merupakan tempat rembesan air sehingga akan mempengaruhi cepat lambatnya pelapukan dimana penentuan arah jurus dan kemiringan bidang tersebut merupakan bagian yang sangat penting dalam melengkapi data analisis. (Syakinah H, 2020)

5. Air tanah

Keberadaan air tanah pada pori-pori atau celah-celah tanah jelas akan menambah berat satuan material dan memperbesar beban pada lereng. keberadaan air, terutama air tanah (*ground water*) sangat mempengaruhi kestabilan suatu lereng. Air tanah

memiliki tekanan air pori (*uplift force*) sehingga menurunkan kekuatan geser dan mengakibatkan lereng mudah longsor (Karyono, 2004).

6. Iklim dan Curah Hujan

Iklim berpengaruh terhadap kemantapan lereng karena iklim mempengaruhi perubahan temperatur. Temperatur yang cepat berubah akan mempercepat proses pelapukan batuan, yang jelas mengurangi gaya tahanan dari lereng tersebut. Untuk daerah tropis pelapukan berlangsung lebih cepat dan kelongsoran pada lereng lebih cepat berlangsung. Adanya kandungan air pada pori batuan yang lebih besar dapat menyebabkan bertambahnya gaya penggerak untuk terjadinya kelongsoran. Untuk masalah curah hujan dimana air mempunyai fungsi sebagai pelarut dan sebagai media transportasi material pengisi celah rekahan dimana akibat adanya kehadiran air tersebut dapat menimbulkan tegangan air yang akan mengurangi tegangan normal sehingga akan memperkecil kekuatan geser. (Syakinah H, 2020)

7. Sifat Fisik dan Mekanik Batuan atau Tanah

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

1) Bobot isi batuan atau tanah

Nilai bobot isi batuan atau tanah akan menentukan besarnya beban yang diterima pada permukaan bidang longsor, dinyatakan dalam satuan berat per volume. Bobot isi batuan juga dipengaruhi oleh jumlah kandungan air dalam batuan tersebut. Semakin besar bobot isi pada suatu lereng tambang maka gaya geser penyebab kelongsoran akan semakin besar, dengan demikian kestabilan lereng semakin berkurang. Bobot isi diketahui dari pengujian laboratorium. Nilai bobot isi batuan atau tanah untuk analisa kestabilan lereng terdiri dari tiga parameter yaitu nilai Bobot isi batuan pada kondisi asli, kondisi kering dan Bobot isi pada kondisi basah. (Arif, 2016)

2) Porositas batuan atau tanah

Batuan atau tanah 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.

3) Kandungan air

Semakin besar kandungan air dalam batuan, maka tekanan air pori menjadi semakin besar juga. Dengan demikian berarti bahwa kuat geser batumannya menjadi semakin kecil, sehingga kestabilannya berkurang.

4) Kohesi dan Sudut Geser Dalam

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. Sudut geser dalam merupakan sudut yang dibentuk dari hubungan antara tegangan normal dan tegangan geser di dalam batuan atau tanah. Sudut geser dalam (ϕ) adalah sudut rekahan yang dibentuk jika suatu material dikenai tegangan atau gaya terhadapnya yang melebihi tegangan gesernya. Semakin besar sudut geser dalam suatu material, maka kuat geser batuan juga akan semakin besar, dengan demikian batuan (lereng) akan lebih stabil dan material

tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang dikenakan terhadapnya. (Syakinah H, 2020)

8. Pengaruh Gaya Luar

Gaya-gaya dari luar yang dapat memengaruhi kestabilan lereng antara lain getaran alat-alat berat yang bekerja pada atau sekitar lereng, peledakan, gempa bumi dan lain-lain. Gaya-gaya tersebut akan memperkecil tegangan geser sehingga dapat mengakibatkan keruntuhan pada lereng.

1.6.6 Metode Keseimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method*)

Salah satu metode yang digunakan dalam analisis kestabilan lereng adalah metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*). Metode keseimbangan batas merupakan metode yang memperhitungkan antara gaya penahan longsor terhadap gaya yang menjadi penyebab longsor. Metode ini mempertimbangkan keseimbangan gaya yang terjadi sepanjang bidang gelincir pada lereng (Gorucak dkk., 2008). Pada metode ini perhitungan dilakukan dengan cara membagi tanah atau batuan yang berada di atas bidang gelincir longsor menjadi irisan-irisan kecil, masing-masing irisan tersebut kemudian akan dihitung kestabilannya dan kemudian dari irisan-irisan tersebut dihasilkan faktor keamanan lereng yang paling kritis. Akibat dari bidang gelincir lereng yang dibagi menjadi beberapa irisan, metode ini dikenal juga dengan metode irisan (Gouw dan Herman, 2012).

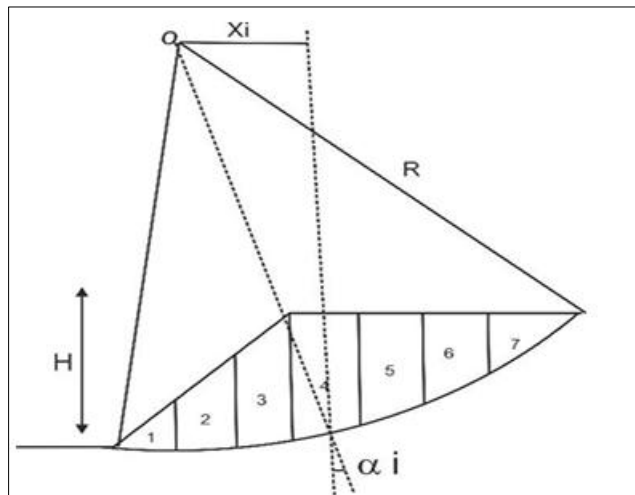
Pada metode keseimbangan batas, perhitungan analisis kestabilan lereng hanya menggunakan kondisi keseimbangan statik dan mengabaikan adanya hubungan tegangan-regangan pada lereng. Asumsi lain yang digunakan adalah geometri dari bentuk bidang runtuh harus diketahui dan ditentukan terlebih dahulu, dikarenakan bentuk bidang runtuh perlu diketahui maka perlu dilakukan penyelidikan lebih lanjut untuk mendapatkan bidang longsor paling kritis yang kemudian akan memberikan nilai faktor keamanan minimum. Seperti analisis kestabilan lereng pada umumnya parameter untuk menyatakan suatu lereng stabil atau tidak dinyatakan dengan Faktor Keamanan (FK). Faktor keamanan dihitung dengan menggunakan keseimbangan momen, keseimbangan gaya, atau menggunakan kedua kondisi keseimbangan tersebut, tergantung pada persamaan yang dipakai (Arif, 2016).

Pada metode keseimbangan batas terdapat banyak metode yang dapat digunakan. Metode-metode tersebut memiliki perbedaan yang terletak pada terpenuhinya keseimbangan gaya dan keseimbangan momen, perbedaan berikutnya adalah dihitung atau tidaknya gaya-gaya antar irisan, baik gaya horizontal maupun gaya vertikal. Pada penelitian kali ini persamaan yang digunakan adalah metode Bishop yang disederhanakan.

1.6.7 Metode Bishop

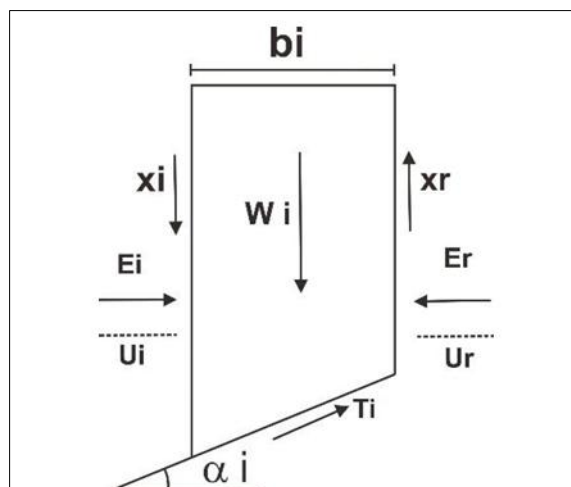
Salah satu dari metode keseimbangan batas untuk longsor busur (*Circular Failure*) yaitu metode Bishop. Metode ini menjelaskan keseimbangan gaya vertikal untuk setiap segmen dan keseimbangan momen keseluruhan yang berkaitan dengan pusat lingkaran. Lapisan yang berada di atas bidang longsor dibagi dalam beberapa segmen tegak agar perlapisan tanah/batuan dapat dipertimbangkan lebar dari tiap segmen tidak harus sama. Gaya normal pada dasar tiap segmen ditentukan dengan menjumlahkan gaya-

gaya dalam arah vertical (Gambar 7). Metode ini mengabaikan gaya gesek pada segmen dan kemudian mengasumsikan suatu gaya normal cukup untuk mendefinisikan gaya – gaya antara segmen (Bishop, 1955).



Gambar 7 Gaya Yang Bekerja pada Bidang Irisan (Hardiyatmo, 2018)

Dalam setiap segmen atau irisan terdapat gaya yang bekerja pada bidang longsoran yang terbagi kedalam beberapa segmen atau irisan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Gaya Yang Bekerja Pada Tiap Irisan (Hardiyatmo, 2018)

Gaya-gaya ini terdiri dari gaya geser (X_r dan X_l) dan gaya normal efektif (E_r dan E_l) di sepanjang sisi irisannya, dan juga resultan gaya geser efektif (T_i) dan resultan gaya normal efektif (N_i) yang bekerja di sepanjang dasar irisan. Tekanan air pori U_l dan U_r bekerja di kedua sisi irisan, dan tekanan air pori U_i bekerja pada dasar irisannya (Hardiyatmo, 2018).

$$F = \frac{\sum [c \cdot b + (W - u \cdot b) \cdot \tan \varphi] \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha \cdot (1 + \tan \alpha \varphi / F)} \right)}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

Keterangan :

F = Nilai Faktor keamanan

c = Kohesi (kN/m²)

φ = Sudut geser dalam (°)

b = Lebar irisan ke-i (m)

W = Berat irisan tanah ke-i (kN)

α = Sudut kemiringan segmen (°)

u = Tekanan air pori pada irisan ke-i (kN/m²)

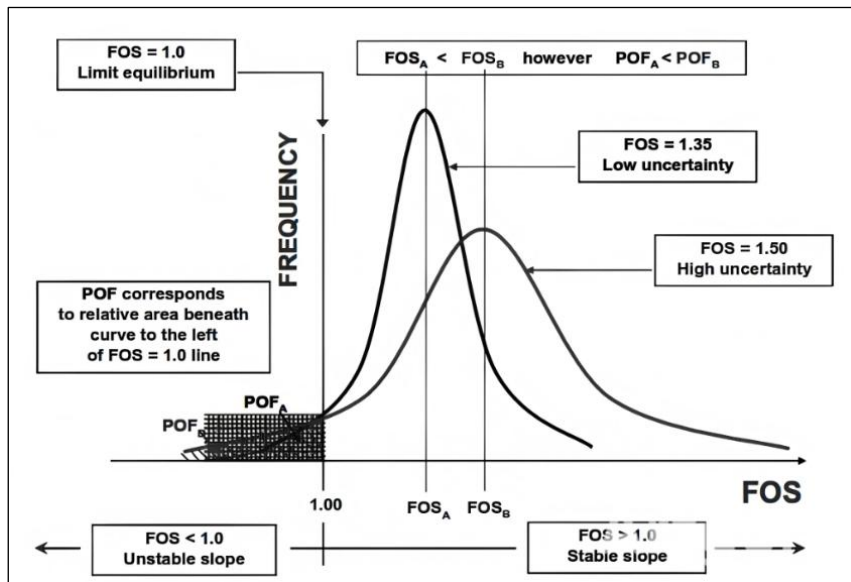
Dengan cara perhitungan berulang-ulang (*iterative*) di berbagai busur yang diperkirakan sebagai bidang gelincirnya, akan diperoleh faktor keamanan terkecil yang menyatakan bidang gelincir paling berbahaya.

1.6. 8 Analisis Probabilistik pada Metode Keseimbangan Batas

Berdasarkan ketersediaan data dalam perhitungan faktor keamanan, terdapat dua analisis yang biasa dipakai, yaitu analisis deterministik dan analisis probabilistik. Analisis deterministik dipakai saat semua data yang digunakan dalam perhitungan faktor keamanan tersedia dan cukup diyakini kebenarannya. Analisis probabilistik digunakan saat ada variabel yang tidak diketahui atau kurang diyakini kebenarannya. Analisis probabilistik menghasilkan nilai dari perkiraan keterjadian sesuatu dengan memperhatikan variabel acak yang ditentukan secara statistik. Variabel ini pada analisis probabilistik diterapkan dengan banyak kemungkinan untuk menghasilkan hasil yang cukup mendekati keadaan asli

Pada lereng tambang, material penyusun umumnya tersusun atas batuan dan material pelapukan yang memiliki variasi nilai sifat fisik dan mekanik. Faktor ketidakpastian (*uncertainty*) dari variasi nilai ini dapat diatasi dengan Analisis kestabilan lereng menggunakan metode probabilistik yang mana, hal ini tidak dapat dimodelkan oleh metode deterministik (Reale dkk, 2015). Dengan menggunakan metode probabilistik, ketidakpastian nilai dari parameter masukan yang digunakan dalam analisis diatasi dengan memodelkan nilai-nilai tersebut ke dalam distribusi statistik yang kemudian dilakukan perhitungan yang menghasilkan kondisi tingkat kestabilan lereng dalam nilai probabilitas kelongsoran (Ayuningtyas, 2017).

Berbeda dengan analisis deterministik, dimana properti material ditentukan dengan nilai tetap, pada analisis probabilistik mempertimbangkan ketidakpastian dari Berbeda dengan analisis deterministik, dimana properti material ditentukan dengan nilai tetap, pada analisis probabilistik mempertimbangkan ketidakpastian dari properti tanah dan batuan. Pada analisis ini, kestabilan lereng dihitung dengan memperhatikan variasi sifat tanah dan batuan memungkinkan pengguna untuk memprediksi probabilitas kelongsoran dan indeks reliabilitas



Gambar 9 Hubungan Probabilitas Kelongsoran dengan Nilai Faktor Keamanan Berdasarkan Besaran Ketidakpastian (*Uncertainty*) (Ayuningtyas, 2017)

Dalam analisis probabilistik terdapat beberapa metode pengambilan sampel yaitu metode *Monte Carlo* dan metode *Latin Hypercube*. Metode *Monte Carlo* menggunakan jumlah sampel yang acak untuk dimasukkan dalam distribusi probabilitas. Metode *Latin Hypercube* menggunakan pengambilan sampel “bertingkat” dengan pemilihan acak di setiap tingkat. Pada penelitian ini metode yang akan digunakan adalah metode *Monte Carlo*.

Metode *Monte Carlo* sangat cocok untuk menyelesaikan permasalahan ketidakpastian pada nilai faktor keamanan, karena nilai dari faktor keamanan itu sendiri merupakan rasio antara gaya penggerak dan gaya penahan, kedua gaya tersebut merupakan fungsi dari variabel acak yang bersifat tak tentu dan memiliki distribusi probabilitas tertentu. *Monte Carlo* biasanya menggunakan sekitar 5000 sampel dalam melakukan perhitungan probabilistik. (Arif, 2016)

Analisis probabilistik, akan menghasilkan banyak nilai faktor keamanan yang diperoleh dari perhitungan berbagai kemungkinan yang ada. Dalam perhitungan tersebut terdapat beberapa faktor keamanan yang bernilai <1 , nilai ini dapat diartikan bahwa lereng yang dianalisa akan mengalami keruntuhan (Gambar 9). Probabilitas Keruntuhan (PK) akan menghitung besar persen sampel yang akan mengalami keruntuhan dibandingkan dengan jumlah sampel secara keseluruhan seperti yang terlihat pada persamaan 2.29. contohnya dalam 1000 sampel yang ada nilai probabilitas keruntuhan adalah 10,2% berarti terdapat 102 sampel yang mengalami keruntuhan (Rocscience, 2018).

$$PK = \frac{\text{Sampel yang runtuh}}{\text{Jumlah sampel}} \times 100\% \quad (5)$$

Dalam analisis probabilitas juga akan diperoleh nilai indeks reliabilitas, indeks reliabilitas adalah nilai yang menunjukkan nilai standar deviasi yang memisahkan nilai faktor keamanan rata-rata dengan faktor keamanan kritis yang bernilai 1. Indeks

reliabilitas biasanya direkomendasikan memiliki nilai yang besar atau setidaknya bernilai 3, hal ini berarti agar indeks reliabilitas dapat bernilai besar, maka faktor keamanan yang diperoleh harus memiliki standar deviasi yang kecil dan nilai diatas 1. Pada persamaan berikut diasumsikan hasil faktor keamanan memiliki distribusi normal (Rocscience, 2018).

$$\beta = \frac{\mu_{fs} - 1}{\sigma_{fs}} \quad (6)$$

Keterangan :

β = Indeks reabilitas

μ_{fs} = Nilai rata-rata faktor keamanan

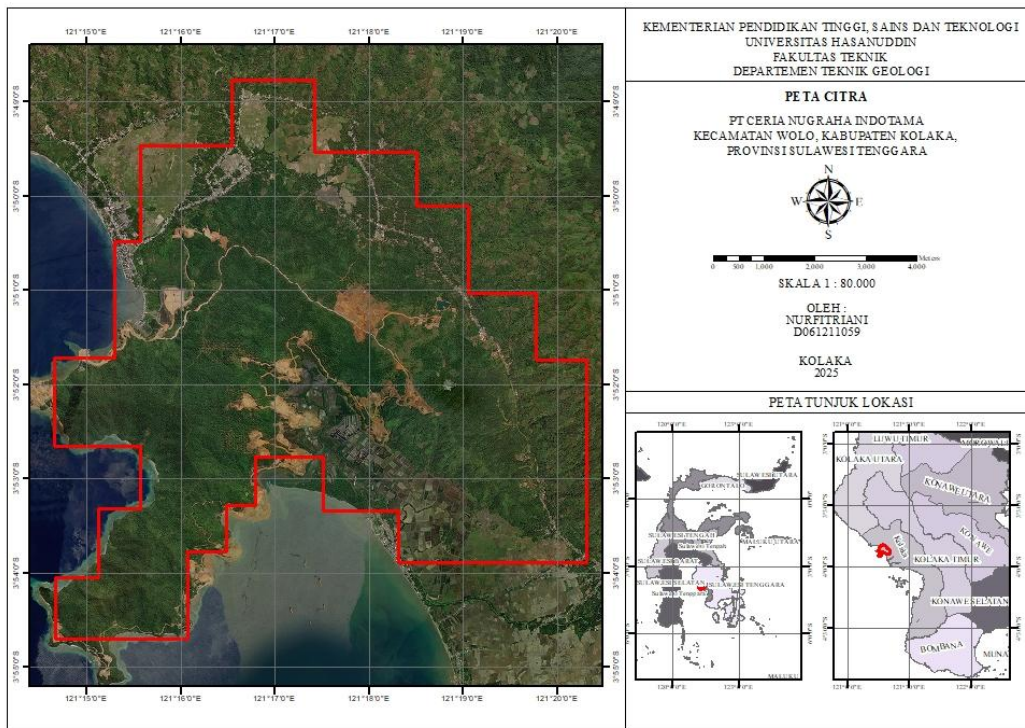
σ_{fs} = Standar Deviasi Faktor Keamanan

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Secara administratif daerah penelitian termasuk dalam Daerah kawasan tambang PT. Ceria Nugraha Indotama yang terletak di Kecamatan Wolo, kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara (Gambar 10). Daerah penelitian termasuk dalam Lembar Wolo Nomor 2112- 32 Peta Rupa Bumi Indonesia dengan skala 1 : 50.000 yang diterbitkan oleh Badan Koordinasi Survei dan Pemetaan Nasional (BAKOSURTANAL) Edisi I Tahun 1988 Cibinong, Bogor.



Gambar 10 Peta Citra Daerah Penelitian

Daerah penelitian dapat di tempuh melalui jalur transportasi udara dan darat. Jalur udara ditempuh menggunakan pesawat dengan rute dari Bandar Udara Internasional Sultan Hasanuddin di Kabupaten Maros ke Bandar Udara Sangia Nibandera di Kabupaten Kolaka. Penerbangan dari Maros ke Kolaka ditempuh sekitar 50 menit. Kemudian dilanjutkan dengan jalur darat menggunakan mobil dari Pomala ke site PT. Ceria Nugraha Indotama. Pelaksanaan penelitian dilaksanakan ± 3 bulan meliputi pengambilan dan pengolahan data serta penyusunan laporan.

2.2 Variabel Penelitian

Penelitian perencanaan geometri lereng dan limit lereng keseluruhan disposal ini menggunakan variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas (*independent*)

merupakan variabel yang memengaruhi atau menjadi sebab berubahnya atau timbulnya variabel terikat (*dependent*). Sedangkan variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat, karena adanya variabel bebas. Variabel ini disebut sebagai variabel terikat karena variabel ini dipengaruhi dan terikat oleh variabel bebas (Sugiyono, 2013).

Berdasarkan uraian tersebut maka variabel bebas dalam penelitian ini adalah geometri lereng tunggal, yaitu tinggi *bench*, lebar *berm*, dan sudut lereng tunggal (*face angle*), serta karakteristik material seperti bobot isi (*unit weight*), kohesi (*c*), dan sudut geser dalam (ϕ). Perubahan pada variabel-variabel tersebut akan memengaruhi kondisi stabilitas lereng secara keseluruhan. Sementara itu, variabel, variabel terikat dalam penelitian ini adalah hasil perencanaan geometri lereng disposal yang meliputi limit *overall slope* pada tinggi lereng keseluruhan (*overall height*) tertentu, serta tingkat kestabilan lereng yang dinilai berdasarkan faktor keamanan (*safety factor*) dan probabilitas kelongsoran (*Probability of Failure*).

2.3 Tahapan Penelitian

Adapun kegiatan penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan penelitian. Secara sistematis terdiri atas tahap pendahuluan, tahap pengumpulan data, tahap pengolahan dan analisis data, serta tahap penyusunan laporan yang disusun dalam diagram alir pada Gambar 11.

2.3.1 Tahap Pendahuluan

Tahap pendahuluan ini adalah tahap paling awal dilakukan oleh penulis dalam melakukan penelitian. Adapun beberapa hal yang dilakukan pada tahap pendahuluan ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mencari sumber-sumber bacaan dan kajian pustaka maupun penelitian terdahulu yang berhubungan dengan daerah penelitian dan metode penelitian. Hal ini dilakukan dengan tujuan mendapatkan gambaran awal penelitian yang akan dilakukan.

2. Administrasi

Dilakukan persiapan administrasi dan juga perizinan penelitian, serta penyusunan proposal penelitian. Tahapan ini dilakukan di Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar.

3. Persiapan Perlengkapan

Perlengkapan yang sekiranya akan menunjang penelitian disiapkan, seperti sarana pengolahan data menggunakan *software* (*ArcGIS 10.8*, *Rocscience Slide V.6*, *Microsoft Excel*, dan sebagainya), serta perlengkapan lapangan.

2.3.2 Tahap Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data-data teknis yang dibutuhkan untuk perencanaan geometri lereng disposal. Data yang digunakan dalam penelitian meliputi bobot isi (γ), kohesi (*c*), sudut geser dalam (ϕ). Data tersebut dianalisis menggunakan pendekatan probabilistik untuk memperoleh variasi nilai parameter yang lebih representatif terhadap kondisi material disposal yang sebenarnya.

2.3.3 Tahap Pengolahan dan Analisis Data

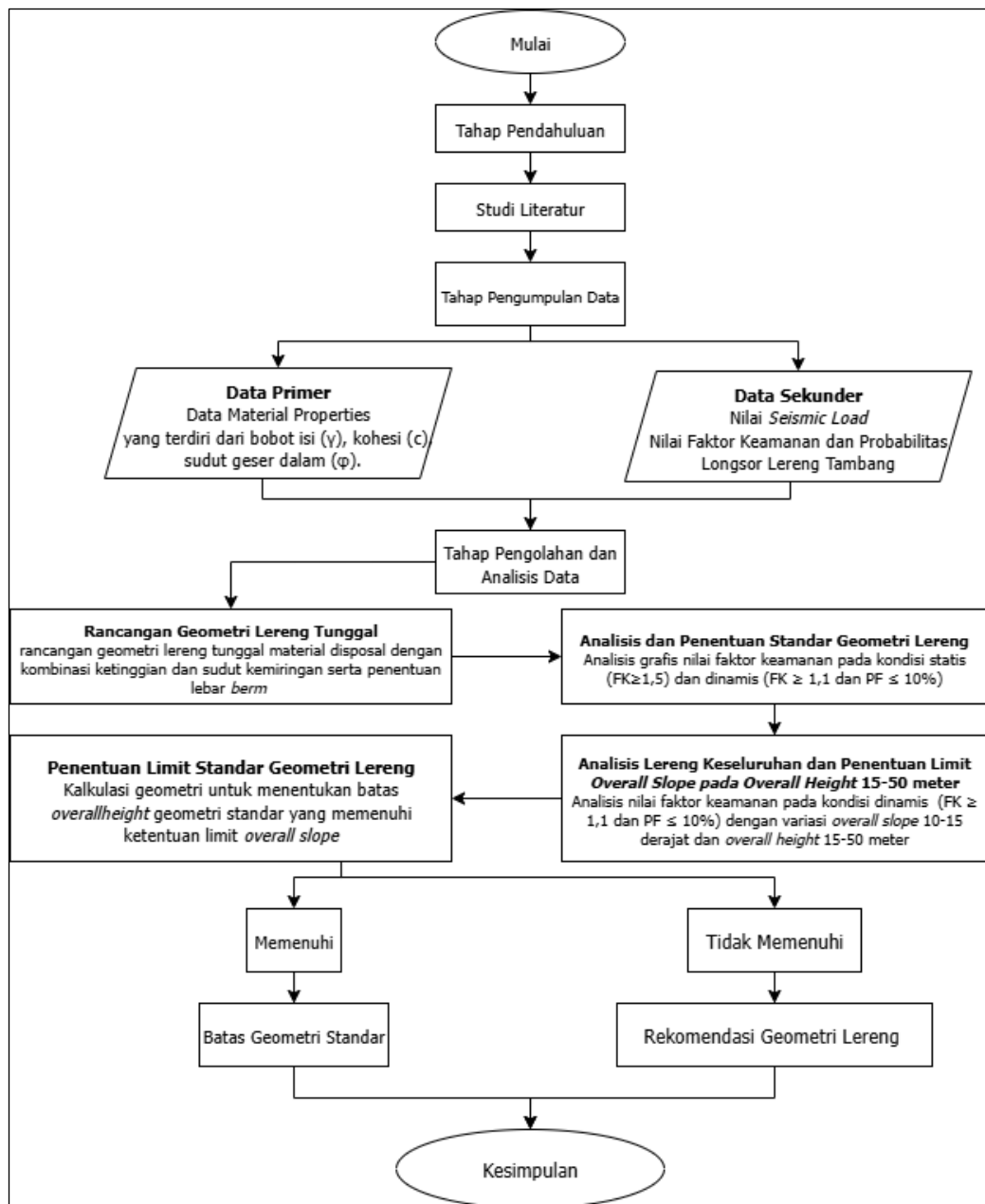
Tahap ini merupakan inti dari penelitian, dimana data yang telah dikumpulkan diolah dan dianalisis untuk mendapatkan rekomendasi standar geometri lereng disposal. Tahap awal pengolahan data yaitu dilakukan dengan mensimulasikan berbagai kombinasi tinggi lereng (*bench height*) dan kemiringan lereng tunggal (*face angle*) menggunakan perangkat lunak *Rocscience Slide V.6* dengan metode *Bishop Simplified*. Hasil simulasi digunakan untuk menentukan kombinasi geometri yang menghasilkan faktor keamanan (FK) yang memenuhi kriteria kestabilan yakni $FK > 1,1$ dan $PF < 10\%$ dalam kondisi dinamis.

Setelah diperoleh rekomendasi tinggi dan kemiringan lereng tunggal, tahap berikutnya adalah menentukan lebar berm dengan menggunakan estimasi *spill berm width* (SBW) untuk memastikan bahwa desain lereng mampu menahan material jatuhan dari *bench* di atasnya.

Kombinasi dari parameter-parameter rekomendasi (tinggi, *face angle*, dan *berm*) kemudian digunakan untuk melakukan analisis kestabilan lereng keseluruhan. Tahap ini bertujuan untuk menentukan limit *overall height* dan *overall slope* yang masih berada dalam kondisi stabil yaitu $FK > 1,1$ dan $PF < 7\%$

2.3.4 Tahap Penyusunan Laporan

Tahap ini merupakan tahap akhir dari kegiatan penelitian yang memuat semua data meliputi hasil pengumpulan data, hasil interpretasi, analisis dan pengolahan data secara sistematis. Selama penyusunan laporan dilakukan pengecekan ulang untuk dikoreksi terhadap semua data dan hasil analisis yang kemudian dituangkan menjadi suatu laporan ilmiah.



Gambar 11 Diagram Alir