

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Lereng dan Longsoran

Lereng adalah bidang miring yang menghubungkan bidang-bidang lain yang mempunyai elevasi yang berbeda. Lereng terbentuk secara alamiah maupun dengan bantuan manusia. Ditinjau dari jenisnya, secara umum lereng terbagi atas 3 bagian yaitu :

- a. Lereng alam yaitu lereng yang terjadi akibat proses-proses alamiah, misalnya lereng pada perbukitan.
- b. Lereng yang dibuat dalam pada tanah asli misalnya bilamana tanah dipotong untuk pembuatan jalan atau saluran air irigasi.
- c. Lereng yang dibuat dari tanah yang dipadatkan misalnya tanggul atau bendungan urugan tanah dan kanal serta tambang terbuka.

Disetiap macam lereng, kemungkinan terjadi longsor selalu ada. Longsor terjadi akibat gaya dorong (*driving force*) melampaui gaya berlawanan yang berasal dari kekuatan geser tanah sepanjang bidang longsor (Das,1985). Secara teknik dapat dikatakan bahwa longsor terjadi apabila faktor keamanan tidak memenuhi ($F_k < 1,5$). (Octovian Cherianto, Jurnal Sipil Statik Vol.2 No.3, 2014)

Selama studi kelayakan awal yang bertujuan untuk pembukaan tambang terbuka, perkiraan keamanan sudut kemiringan diperlukan untuk perhitungan cadangan bahan galian dan untuk pendahuluan rancangan lubang bukaan (W.Hustrulid, dkk; 2013).

Pembuatan geometri lereng dengan dimensi tertentu dalam aktivitas penggalian tambang terbuka dapat mengganggu kesetimbangan dan dapat mengakibatkan longsor. Longsor adalah perpindahan kearah bawah dari suatu massa tanah yang terjadi pada permukaan bidang lemah (Braja, 2006). Proses longsor ini tidak akan berhenti sebelum mencapai suatu kesetimbangan baru dalam bentuk dan dimensi yang berbeda.

Kestabilan dari suatu lereng dipengaruhi, oleh parameter - parameter seperti kondisi air tanah, bentuk keseluruhan lereng serta fisik dan mekanik dari material pembentuk lereng seperti kohesi, bobot isi, sudut gesek dalam. Oleh karena itu dalam perancangan geometri lereng sangat penting untuk memberikan batas - batas keamanan untuk merancangya hingga lereng dinyatakan aman untuk dilakukan suatu aktivitas penambangan.

2.2 Definisi Tanah dan Batuan

Dalam menganalisis kestabilan lereng, titik awal yang harus diperhatikan terlebih dahulu adalah material pembentuk lereng yaitu tanah atau batuan. Tanah adalah akumulasi partikel mineral yang tidak mempunyai atau lemah ikatan antar partikelnya, yang terbentuk karena pelapukan dari batuan. Diantara partikel-partikel tanah terdapat ruang kosong yang disebut pori-pori (*void space*) yang berisi air dan/atau udara (Craig, 1989). Menurut Bieniawski (1973) tanah merupakan suatu material bentukan alam yang mempunyai kuat tekan uniaksial kurang dari 1 MPa sedangkan batuan lebih dari 1 MPa. Pada Gambar 2-1 terdapat berbagai klasifikasi berdasar nilai kuat tekan uniaksial untuk menentukan suatu material disebut sebagai tanah atau batuan.

A. PARAMETER KLASIFIKASI DAN PEMBOBOTANNYA									
Parameter			Selang Nilai						
1.	Kekuatan Batuan Utuh	Indeks Kekuatan Point Load (MPa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Untuk nilai yang kecil dipakai hasil UCS		
		Kuat Tekan Tekan Uniaksial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
	Pembobotan	15	12	7	4	2	1	0	
2.	Rock Quality Designation (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
	Pembobotan		20	17	13	5	3		
3.	Spasi Rekahan		>2m	0.6 - 2m	0.2 - 0.6m	60 - 200mm	<60mm		
	Pembobotan		20	15	10	8	5		
4.	Kondisi Rekahan		Permukaan sangat kasar, tidak menerus tidak reng-gang dan tidak lapuk	Agak kasar, rengangan <1mm, agak lapuk	Agak kasar, rengangan <1mm, sangat lapuk	Slickensides/gouge <5mm, rengangan 1 - 5mm, menerus	Gouge lemah, tebal >5mm atau rengangan 5mm, menerus		
	Pembobotan		30	25	20	10	0		
5.	Air Tanah	Aliran /10m panjang terowongan (L/min.)	Tidak ada	<10	10 - 25	25 - 125	>125		
		Tek. Pori/Teg. Utama Max.	0	<0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	>0.5		
		Keadaan Umum	kering	lembab	basah	menetes	mengalir		
	Pembobotan		15	10	7	4	0		

Gambar 2-1. Variasi Klasifikasi Kekuatan Untuk *Intact Rock* (Z.T.Bienawski, 1989)

2.2.1 Genesa Tanah Liat

Tanah liat terbentuk dari proses sedimentasi. Proses tersebut merupakan proses perubahan dari batuan vulkanik sebagai batuan asal menjadi mineral tanah liat. Tanah liat merupakan hasil desintegrasi, pelapukan kimia, terutama pengaruh H₂O dan CO₂ dibantu oleh mikroorganisme. Hasilnya merupakan bagian yang halus dan tidak larut dalam air selanjutnya mineral ini diangkut oleh air sebagai suspensi dan akhirnya mengendap berlapis-lapis. Selama proses pengangkutan dan pengendapan sangat dimungkinkan dikotori oleh mineral yang berukuran halus antara lain kuarsa, besi, oksida, dan bahan organik.

Tanah liat terdiri dari butir-butir yang sangat kecil dan menunjukkan sifat-sifat plastisitas dan kohesi. Plastisitas adalah sifat yang memungkinkan bentuk dan bahan itu dirubah-rubah tanpa perubahan isi dan tanpa retakan-retakan atau terpecah-pecah, sedangkan kohesi menunjukkan kenyataan bahwa bagian-bagian itu melekat satu sama lain.

2.2.2 Sifat Fisik dan Sifat Kimia Tanah Liat

Sifat fisik dan kimia tanah liat kuari Mliwang Timur menurut data Biro Perencanaan dan Pengawasan Tambang PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk, sebagai berikut :

1. Sifat fisik :

Warna	: Kuning kecoklatan dan abu-abu kehitaman
Kadar air	: 26,18% - 33,50%
Bobot isi	: 1,8 – 2,1 gr/cm ³ (17,66 kN/m ³ – 20,601 kN/m ³)

2. Sifat kimia :

Low Grade (<i>Low Alumina</i>)		High Grade (<i>High Alumina</i>)	
SiO ₂	: 71,83 %	SiO ₂	: 55,19 %
Al ₂ O ₃	: 13,94 %	Al ₂ O ₃	: 22,82 %
Fe ₂ O ₃	: 5,17 %	Fe ₂ O ₃	: 6,07 %
CaO	: 1,08 %	CaO	: 0,60 %
MgO	: 0,55 %	MgO	: 2,23 %

Dari data di atas menunjukkan bahwa tanah liat di daerah Mliwang Timur layak dan memenuhi syarat sebagai bahan baku semen, untuk SiO₂ > 40 % dan Al₂O₃ > 10 %. Sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan PT. Semen Indonesia (Persero) bahwa Al₂O₃ > 15 % termasuk kualitas *high grade (high alumina)* dan Al₂O₃ < 15 % termasuk kualitas *low grade (low alumina)*, maka kuari tanah Mliwang Timur merupakan tanah liat yang memiliki kualitas tinggi *high grade (high alumina)*.

2.3 Dasar Mekanisme Longsor pada Lereng

Menurut Hoek and Bray (1981) dasar mekanisme longsor pada lereng meliputi :

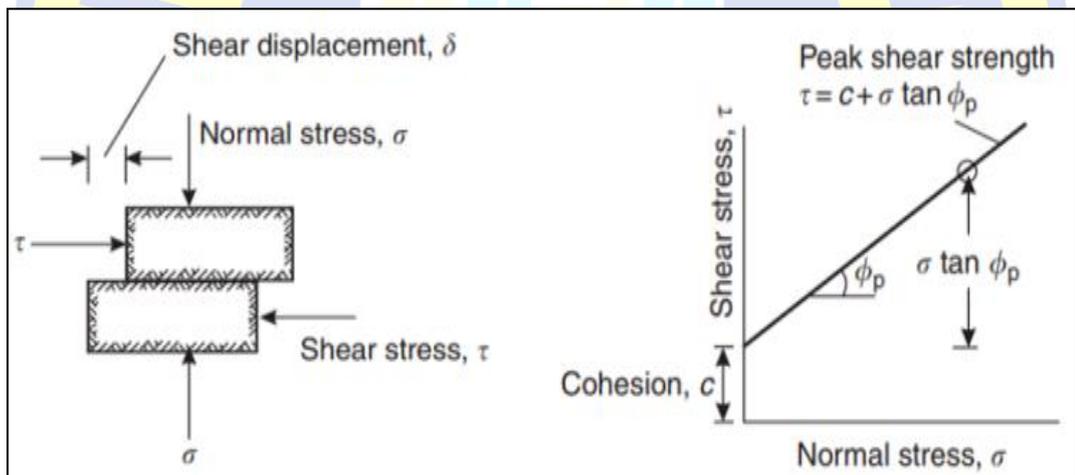
2.3.1 Sudut Gesek Dalam, Kohesi dan Bobot Isi

Sifat-sifat material yang relevan dengan masalah kestabilan lereng adalah sudut gesek dalam, kohesi, dan bobot isi dari massa tanah atau batuan. Pengertian sudut gesek dalam dan kohesi akan dijelaskan pada Gambar 2.2. Gambar tersebut menjelaskan secara sederhana mengenai percontohan batuan yang terdapat bidang

ketidakmenerusan dan kemudian bekerja tegangan geser dan tegangan normal. sehingga akan menyebabkan batuan tersebut retak pada bidang ketidakmenerusan dan mengalami pergeseran.

Tegangan geser (τ) yang dibutuhkan sehingga batuan tersebut retak dan bergeser akan bertambah sesuai dengan pertambahan tegangan normal (σ). Pada Gambar 2.2 hubungan secara linier antara tegangan normal dengan tegangan geser membentuk sudut sebesar ϕ terhadap horizontal, sudut inilah yang dinamakan sudut gesek dalam. Apabila tegangan normal dibuat nol dan kemudian batuan diberikan tegangan geser sampai batuan mulai retak, maka harga tegangan geser yang dibutuhkan pada saat akan mulai retak adalah merupakan besar nilai kohesi (c) dari batuan tersebut. Hubungan tegangan normal dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \dots\dots\dots (2.1)$$

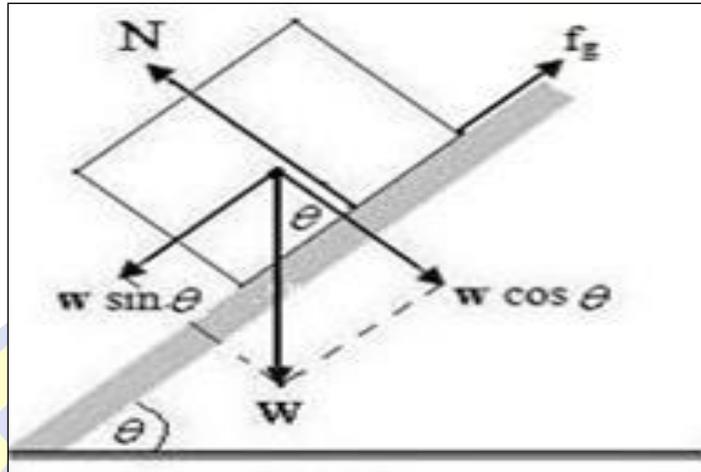


Gambar 2-2. Grafik Hubungan Tegangan Normal – Tegangan Geser (Wylie & Mah, 2004)

2.3.2 Longsor Akibat Beban Gravitasi

Pada Gambar 2.3 dapat dilihat suatu massa dari blok seberat W yang berada dalam keadaan setimbang di atas suatu bidang yang membentuk sudut ψ terhadap horizontal. Pada blok hanya gravitasi saja yang bekerja dan berat W bekerja vertical kearah bawah. Komponen gaya berat yang sejajar bidang miring dan yang cenderung menyebabkan benda menggelincir adalah $W \sin \psi$.

komponen gaya yang tegk lurus bidang dan merupakan gaya yang manah benda untuk menggelincir adalah $W \cos \psi$.



Gambar 2-3. Komponen Gaya pada Suatu Benda diatas Bidang Miring (Hoek & Bray, 1981)

Tegangan normal (σ) yang bekerja berpotongan dengan permukaan longsor dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\sigma = W \cos \psi / A \dots\dots\dots [2.2]$$

A adalah Luas dasar benda

Diamsusikan bahwa tegangan geser didefinisikan oleh persamaan [2.1] dan disubstitusikan tegangan normal dari persamaan [2.2], dihasilkan sebagai berikut :

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \phi$$

$$R = cA + W \cos \psi \tan \phi \dots\dots\dots [2.3]$$

$R = \tau \cdot A$ adalah gaya geser yang menahan bidang terlincir ke bawah.

Benda dalam kondisi kesetimbangan batas apabila gaya yang menyebabkan benda tergelincir sama dengan gaya yang menahan benda atau dapat dinyatakan dengan:

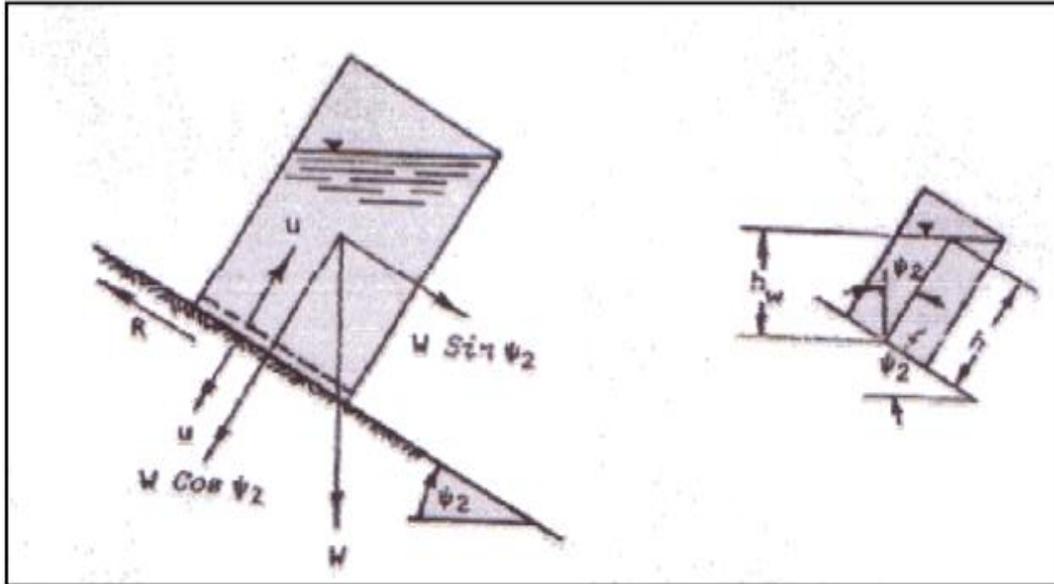
$$W \sin \psi = c A + W \cos \psi \cdot \tan \phi \dots\dots\dots [2.4]$$

Bila kohesi (c) = 0, kondisi kesetimbangan batas pada persamaan [2.4] disederhanakan menjadi :

$$\Psi = \phi \dots\dots\dots [2.5]$$

2.3.3 Pengaruh Tekanan Air pada Tegangan Geser

Pengaruh tekanan air pada kuat geser dapat dianalogikan seperti yang diterangkan oleh Gambar 2-4 dibawah ini :



Gambar 2-4. Gaya-gaya pada Bejana di Atas Bidang Miring (Hoek & Bray, 1981)

Sebuah bejana yang diisi air dan diletakkan diatas bidang miring seperti yang terlihat pada gambar 2-4. Susunan gaya yang bekerja disini sama dengan yang bekerja pada sebuah benda di atas bidang miring seperti diterangkan sebelumnya.

Untuk penyederhanaan kohesi antara dasar bejana dan bidang miring diasumsikan nol.

Menurut persamaan [2.5], bejana dan isinya akan mulai tergelincir pada saat $\psi_1 = \phi$. Dasar bejana saat ini dilubangi sehingga air dapat masuk ke celah antara dasar bejana dan bidang miring memberikan tekanan air sebesar u atau gaya angkat sebesar $U = u.A$, dengan $A =$ luas dasar bejana.

Gaya normal $W \cos \psi_2$ sekarang dikurangi oleh gaya angkat U , dan besarnya gaya yang menahan gelinciran adalah :

$$R = (W \cos \psi_2 - U) \tan \phi \dots\dots\dots [2.6]$$

Apabila diandaikan berat per unit volume dari kaleng ditambah air dinotasikan sebagai γ_t sementara berat per unit volume air adalah γ_w maka $W = \gamma_t$

h dan $U = \gamma_w h_w A$, dengan h dan h_w adalah seperti pada Gambar 2.4. Pada Gambar 2.4 akan terlihat bahwa $h_w = h \cos \psi_2$ dan menjadi :

$$U = (\gamma_w / \gamma_t) W \cos \psi_2 \dots\dots\dots [2.7]$$

Kemudian substitusikan persamaan [2.7] ke persamaan [2.6] maka akan diperoleh persamaan gaya geser (R) adalah sebagai berikut :

$$R = (W \cos \psi_2 - (\gamma_w / \gamma_t) \cdot W \cos \psi_2) \tan \phi$$

$$R = W \cos \psi_2 (1 - \gamma_w / \gamma_t) \tan \phi \dots\dots\dots [2.8]$$

Pada kondisi kesetimbangan batas pada persamaan [2.4] menjadi :

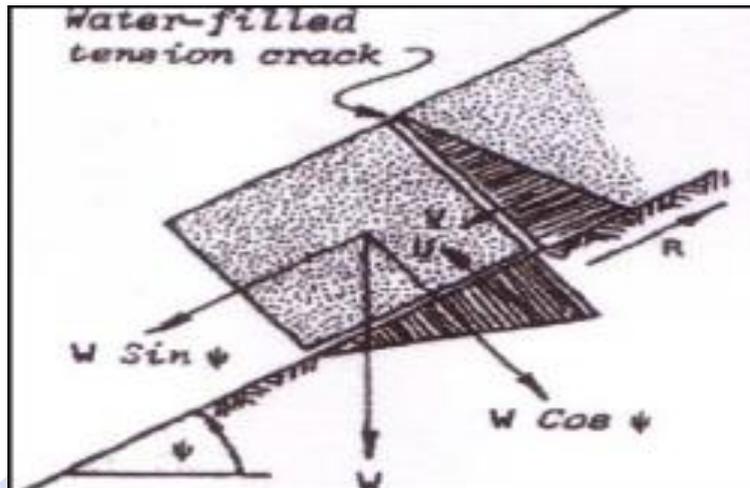
$$W \sin \psi_2 = W \cos \psi_2 (1 - \gamma_w / \gamma_t) \tan \phi$$

$$\tan \psi_2 = (1 - \gamma_w / \gamma_t) \tan \phi \dots\dots\dots [2.9]$$

2.3.4 Pengaruh Tekanan Air Pada Retakan Tarik

Kehadiran air tanah pada tubuh lereng biasanya menjadi masalah bagi kestabilan lereng. Perhatikan suatu kasus dari blok pada keadaan setimbang yang terletak pada bidang miring, hal ini dianggap bahwa blok terpisah oleh suatu retakan yang terisi oleh air (Lihat Gambar 2-5).

Tekanan air pada retakan Tarik bertambah secara linier dengan kedalaman dan gaya total V , karena bekerjanya tekanan air ini pada muka samping dari blok yang bekerja turun terhadap bidang miring. Hasil distribusi tekanan air dalam bentuk gaya angkat U mengurangi gaya normal yang bekerja tegak lurus permukaan tersebut.



Gambar 2-5. Pengaruh Tekanan Air pada Rekahan Suatu Blok (Hoek & Bray, 1981)

Kondisi kesetimbangan batas terhadap blok yang terkena gaya air V dan U , sebagai tambahan dari beratnya sendiri, ditentukan oleh :

$$W \sin \psi + V = c A + (W \cos \psi - U) \tan \phi \dots\dots\dots [2.10]$$

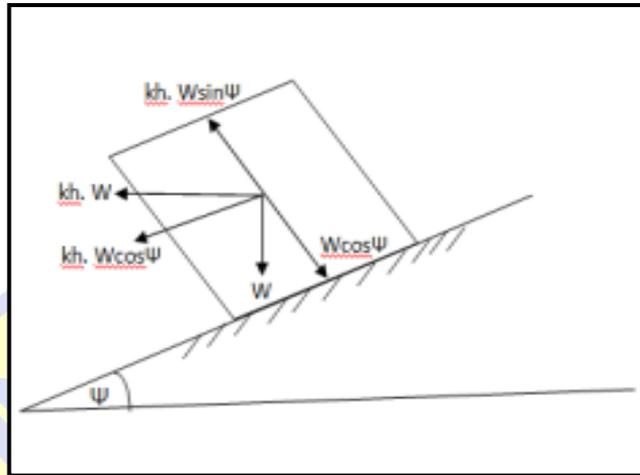
Dari persamaan tersebut terlihat bahwa gaya penggerak cenderung menyebabkan longsor ke bawah bidang bertambah dan gaya geser penahan longsor berkurang, oleh karena itu U dan V keduanya menyebabkan berkurangnya kestabilan lereng.

2.3.5 Pengaruh Getaran Pada Lereng

Pengaruh gaya dari getaran – getaran yang berasal dari sumber – sumber yang berada di dekat lereng juga dapat mempengaruhi kestabilan lereng. Getaran ini misalnya ditimbulkan oleh aktivitas alat berat, gempa bumi, lalu lintas kendaraan di sekitar lereng, serta aktivitas peledakan. Gaya yang ditimbulkan dari getaran ini disebut gaya seismik dan dinyatakan dalam nilai koefisien seismik. Terdapat dua nilai koefisien seismik, yaitu nilai k_h sebagai nilai koefisien seismik arah horizontal dan k_v sebagai arah vertical (lihat Gambar 2-6).

Besar pengaruh gaya seismik horizontal yaitu sebesar $k_h.W$ dengan W sebagai berat dari massa yang berpotensi untuk menggelincir. Gaya seismik yang mempengaruhi keruntuhan massa batuan biasa diasumsikan hanya pada arah horizontal saja, sehingga $k_v = 0$. Jika $k_v = 0$, maka arah vertical tidak terdapat pengaruh gaya seismik sedangkan arah horizontal terkena pengaruh gaya seismik.

Pengaruh gaya seismik terhadap lereng pada arah horizontal dapat dilihat pada Gambar 2-6.



Gambar 2-6. Model Lereng dengan Pengaruh Gempa (Hoek & Bray, 1981)

Gaya seismik horizontal yang bekerja berlawanan arah terhadap gaya normal akan memperkecil tegangan normal yang bekerja pada bidang luncur, sehingga gaya penahan pada persamaan [2.3] menjadi :

$$R = cA + (W \cos \psi - k_h W \sin \psi) \tan \phi \dots\dots\dots [2.11]$$

Gaya seismik horizontal yang bekerja searah dengan gaya yang menggerakkan batuan menyebabkan gaya penggerak menjadi semakin besar. Pada kondisi setimbang, maka dengan adanya pengaruh gaya seismik persamaan [2.4] tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$W \sin \psi + k_h W \cos \psi = cA + (W \cos \psi - k_h W \sin \psi) \tan \phi \dots\dots\dots [2.12]$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa pengaruh gaya seismik pada lereng cenderung menyebabkan gaya penggerak bertambah dan gaya penahan berkurang. Oleh karena itu, gaya seismik menjadi salah satu parameter yang menyebabkan berkurangnya kestabilan lereng.

2.3.6 Faktor Keamanan Lereng

Semua persamaan kestabilan blok pada bidang miring telah dituliskan untuk kondisi kesetimbangan batas, artinya gaya penggerak dan gaya penahan longsor.

Memperhatikan blok yang mengalami gaya dari air maka persamaan dari factor keamanan dapat ditulis dengan :

$$FK =$$

$$FK = \dots\dots\dots [2.13]$$

Menurut Lee W. Abramson dkk (2002) Untuk desain lereng, FK (*nonseismic*) yang dibutuhkan biasanya berkisar 1,25 sampai 1,5. Faktor yang lebih tinggi dibutuhkan jika ada resiko lebih besar atas kehilangan nyawa atau adanya ketidakpastian terhadap parameter desain. Demikian juga, FK yang lebih rendah mungkin digunakan jika insinyur percaya pada akurasi data masukan dan konstruksi yang dilakukan mendapat pengawasan secara ketat. Pada Tabel 2-1 diperlihatkan berbagai faktor keamanan yang digunakan pada operasi pertambangan.

Tabel 2-1. Faktor Keamanan Lereng (Huang, 1983 dan SNI, 2017)

UNITED STATES (FEDERAL, REGISTER 1977)		FAKTOR KEAMANAN MINIMAL		
I	Akhir dari konstruksi	1,3		
II	Sebagian kolam dengan rembesan tetap keadaan jenuh	1,5		
III	Rembesan tetap dari saluran air atau retakan	1,5		
IV	Gempa Bumi	1,0		
UNITED STATES D' APOLONIA CONSULTING ENGINEERS, INC., 1975		FAKTOR KEAMANAN DENGAN POTENSI BAHAYA		
	Desain berdasarkan parameter kuat geser yang dihitung pada laboratorium	1,5	1,4	1,3
	Desain memperhitungkan akselerasi seismik maksimal yang diperkirakan di lokasi	1,2	1,1	1,0
BRITAIN (NATIONAL COAL BOARD, 1970)		FAKTOR KEAMANAN		
		1*	1**	
(1) Untuk sepanjang permukaan luncur yang memakai kuat geser puncak		1,5	1,25	

(2) Untuk permukaan luncur melewati strata pondasi yang memakai kuat geser sisa (lingkungan luncur seluruhnya dalam tanggul harus memenuhi)	1,35	1,15
(3) Untuk permukaan luncur melewati sepanjang retakan amblesan vertikal yang dalam dimana tidak ada kuat geser yang bergerak dan diisi air (permukaan luncur seluruhnya dalam zona utuh dari tanggul dan pondasi harus terpenuhi)	1,35	1,15
(4) Untuk permukaan luncur yang merupakan gabungan (2) dan (3)	1,2	1,1
CANADA (MINES BRANCH, CANADA, 1972)	FAKTOR KEAMANAN	
	I*	II***
Desain berdasarkan parameter kuat geser puncak	1,5	1,3
Desain berdasarkan parameter kuat geser sisa	1,3	1,2
Analisis memasukan prediksi 100 tahun periode akselerasi terhadap potensi massa longsor	1,2	1,1
INDONESIA (Badan Standardisasi Nasional, SNI, 2017)	REKOMENDASI NILAI FAKTOR KEAMANAN	
	Rendah	Tinggi
Kondisi Lereng batuan permanen	1,25	1,5
Kondisi Lereng batuan Sementara	1,1	1,3

* Untuk resiko yang berbahaya untuk manusia atau bangunan

** Untuk tidak ada resiko berbahaya untuk manusia atau bangunan (terantisipasi)

2.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan Lereng

Faktor-faktor yang perlu diperhatikan dalam menganalisis kestabilan suatu lereng adalah sebagai berikut :

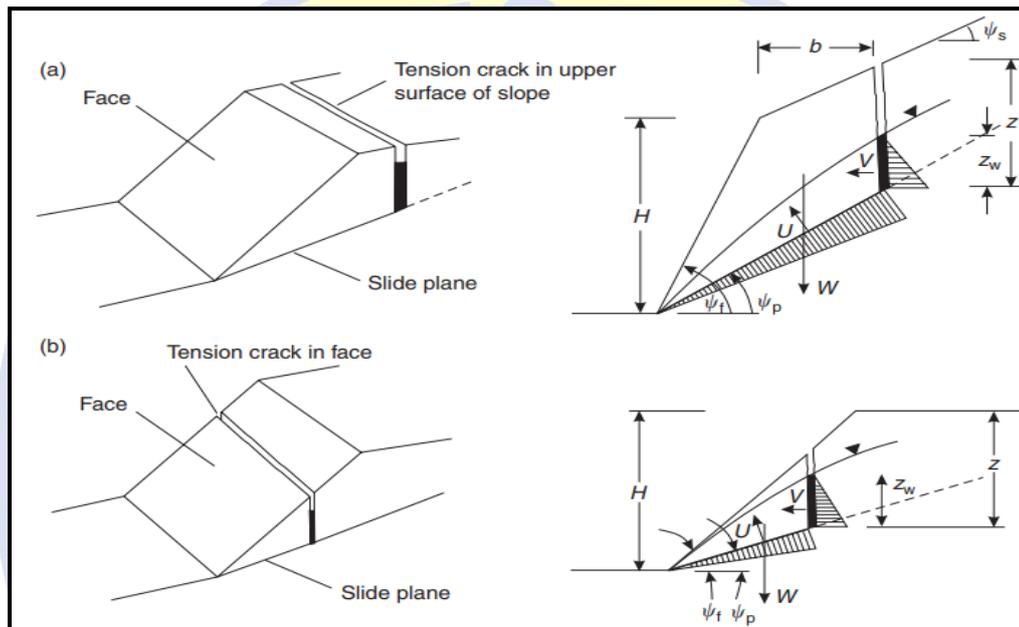
2.4.1 Geometri Lereng

Geometri lereng (Gambar 2-7) yang mempengaruhi dalam rancangan kestabilan lereng adalah :

1. Orientasi jurus (*strike*) dan kemiringan (*dip*) lereng
2. Tinggi (*bench height*) dan kemiringan (*bench angel*) (tiap-tiap jenjang).

3. Lebar jenjang (*bench width*).

Perubahan tinggi akan mengakibatkan perubahan kestabilan lereng karena berat material yang ditahan oleh kuat geser tanah semakin besar. Sudut kemiringan lereng yang besar akan memberikan volume material yang besar, sehingga beban material pada lereng juga semakin besar. Oleh sebab itu, semakin besar tinggi dan sudut kemiringan lereng akan mengakibatkan berkurangnya kestabilan lereng tersebut sehingga mudah mengalami longsor (Supandi & Agung, 2014).



Gambar 2-7. Geometri Lereng (Kliche, 1999)

2.4.2 Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

Kekuatan massa tanah yang sangat berperan dalam analisis kestabilan lereng terdiri atas sifat fisik dan mekanik tanah tersebut. Adapun sifat fisik dan mekanik tanah yang diperlukan dalam melakukan analisa kestabilan lereng adalah sebagai berikut:

a. Bobot isi (γ)

Bobot isi adalah berat dari tanah per unit volume (Braja, 2006). Bobot isi digunakan untuk mengitung beban yang berada pada permukaan bidang longsor. Bobot isi menunjukkan kerapatan suatu benda, sehingga semakin besar nilai nilai bobot isinya maka semakin padat benda tersebut.

b. Kuat geser tanah

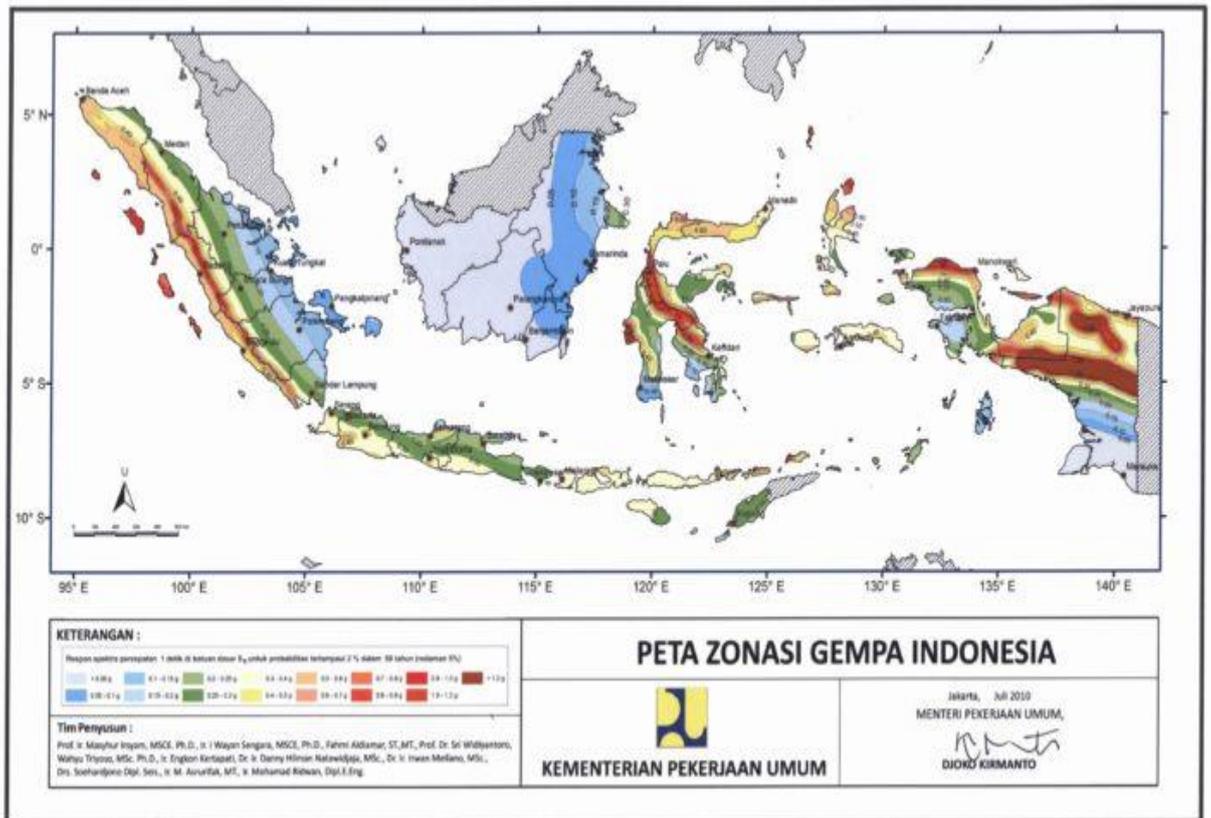
Kuat geser tanah merupakan perlawanan internal per unit area ketika tanah dapat menahan keruntuhan dan pergeseran di sepanjang bidang di dalamnya (Braja,2006). Parameter kuat geser tanah dapat diperoleh dari pengujian laboratorium, salah satunya' yaitu pengujian kuat geser langsung. Hasil pengujian kuat geser langsung dapat menentukan parameter - parameter kekuatan tanah seperti kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ).

2.4.3 Iklim

Iklim berpengaruh terhadap kestabilan lereng karena iklim mempengaruhi perubahan temperatur dan curah hujan. Temperatur yang cepat berubah akan mempercepat proses pelapukan batuan. Untuk daerah tropis pelapukan berlangsung lebih cepat dan longsor pada lereng lebih cepat berlangsung sedangkan curah hujan akan mempengaruhi banyaknya air yang akan masuk ke dalam tanah.

2.4.4 Pengaruh Gaya Luar

Gaya luar dapat mempengaruhi kestabilan lereng. Gaya ini berupa getaran yang berasal dari sumber yang berada terdekat dari lereng tersebut, getaran ini misalnya ditimbulkan oleh lalu lintas kendaraan, peledakan, dan gempa bumi. Pemilihan nilai faktor seismik yang tepat merupakan aspek dalam analisis kegempaan yang paling penting dan sulit untuk dilakukan. Besarnya nilai faktor seismik dapat disimulasikan secara efektif dari gempa bumi yang terjadi. Besarnya nilai ini tergantung dari intensitas gempa bumi (*Peak Ground Acceleration/PGA*), waktu guncangan, dan frekuensinya. Nilai faktor seismik berdasarkan pada peta zonasi gempa Indonesia dengan periode ulang gempa 500 tahun pada (SNI 1726-2012) yang membedakan nilainya berdasarkan wilayah (lihat Gambar 2-9).



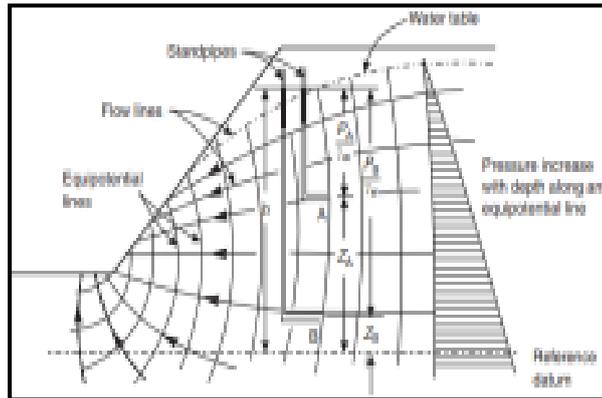
Gambar 2-8. Peta Zonasi Gempa Indonesia (SNI 1726-2012)

2.4.5 Penambahan Beban Akibat Penimbunan

Timbunan material (tanah/batu (*waste*)) maupun bangunan di atas suatu lereng akan memperbesar gaya penggerak dan dapat mengakibatkan longsor pada lereng tersebut.

2.4.6 Pengaruh Air Tanah

Adanya air tanah akan berpengaruh terhadap kestabilan lereng. Air akan mengisi pori-pori dalam tanah sehingga bobot isi tanah akan bertambah besar. Hal ini menyebabkan penambahan beban lereng. Air tanah juga menyebabkan penambahan gaya dorong untuk terjadi longsor. Semakin panjang jarak muka air tanah terhadap acuan datum yang ditentukan maka tekanan yang diberikan kepada lereng semakin besar (Gambar 2-10).



Gambar 2-9. Dimensi Aliran Air Dalam Jenjang (Wyllie & Mah, 2014)

Tinggi rendahnya muka air tanah sangat menentukan dalam analisis kestabilan lereng, sehingga perlu dilakukan pengukuran muka air tanah. Asumsi tinggi muka air tanah pada lereng aktual dapat menggunakan kondisi model pada *chart* yang dikemukakan oleh Hoek dan Bray seperti pada Gambar 2-11 berikut ini:

Ground water flow conditions	Chart number
Fully drained slope	1
Surface water 8x slope height behind toe of slope	2
Surface water 4x slope height behind toe of slope	3
Surface water 2x slope height behind toe of slope	4
Saturated slope subjected to heavy surface recharge	5

Gambar 2-10. Chart Hoek & Bray untuk kondisi Air Tanah pada Lereng (Wyllie & Mah, 2004)

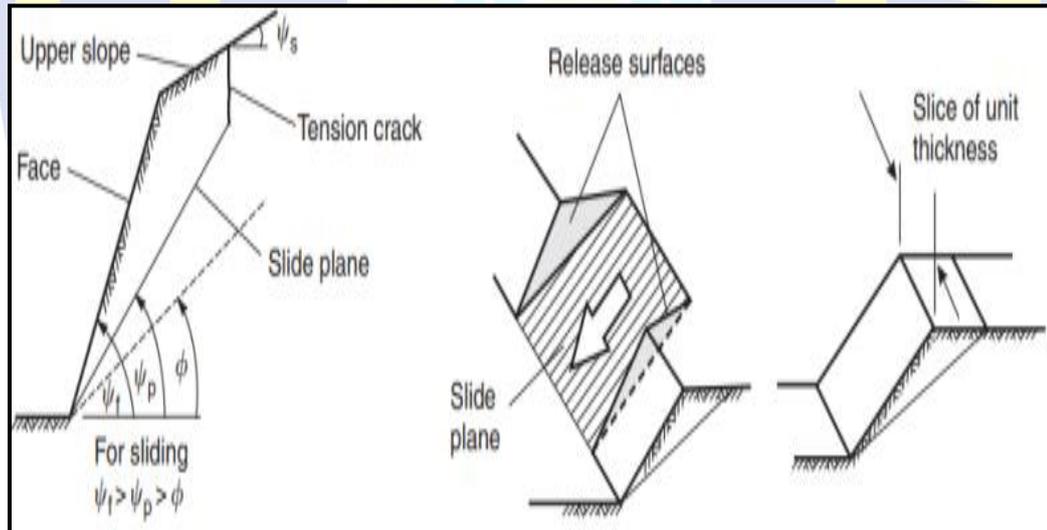
2.5 Klasifikasi Longsor

Secara umum di tambang terbuka longsor diklasifikasikan kedalam 4 jenis longsor (Kliche. 1999), yaitu :

1. Longsor Bidang (*Plane Failure*)
2. Longsor Baji (*Vedge Failure*)
3. Longsor Busur (*Circular Failure*)
4. Longsor Guling (*Toppling Failure*)

2.5.1 Longsor Bidang

Menurut Kliche (1999) dalam longsor bidang (Gambar 2-12) adalah pergerakan massa keluar atau ke bawah dan keluar sepanjang permukaan yang kurang lebih rata atau bergelombang. Perpindahan biasanya dikontrol secara struktural oleh: (1) permukaan bidang lemah, seperti sesar, kekar, bidang perlapisan, dan variasi kuat geser diantara lapisan pada dasar deposit, atau (2) kontak di antara batuan dasar yang kuat dan batuan lapuk di atasnya.



Gambar 2-11. Longsor Bidang (Wyllie & Mah, 2004)

Menurut Wyllie & Mah (2004) syarat untuk longsor bidang adalah:

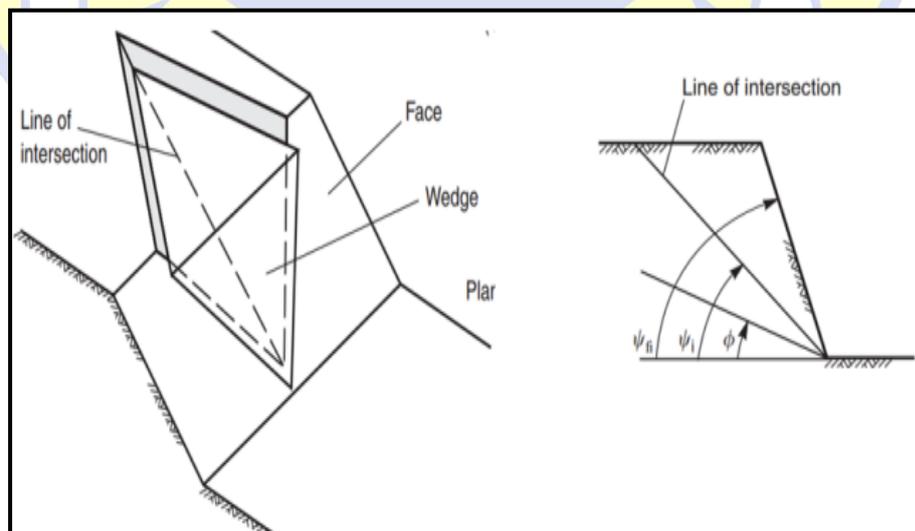
- a. Bidang gelincir mempunyai *strike* sejajar atau hampir sejajar (maksimal 20°) dengan *strike* lereng.

- b. Jejak bagian bawah bidang lemah yang menjadi bidang gelincir harus muncul di muka lereng. Kemiringan bidang gelincir lebih kecil daripada kemiringan lereng ($\psi_p < \psi_f$) seperti pada Gambar 2-12.
- c. Kemiringan bidang gelincir lebih besar daripada sudut gesek dalamnya ($\psi_p < \phi$) seperti pada Gambar 2-12.
- d. Batas atas akhir bidang gelincir berpotongan dengan jenjang bagian atas, atau berakhir di kekar tarik.
- e. Harus ada bidang pelepas (*side relief planes*) yang menjadi pembatas di kanan dan kiri blok menggelincir seperti pada Gambar 2-12.

2.5.2 Longsor Baji

Menurut Hoek dan Bray (1981) longsor baji terjadi ketika *strike* dua bidang ketidakmerusan miring memotong, muka lereng dan jejak bagian bawah dari garis perpotongan muncul di muka lereng. Baji dari batuan yang tertahan di atas bidang ketidakmerusan akan longsor ke bawah mengikuti garis perpotongan, hal ini terjadi ketika kemiringan dari garis lebih besar dari sudut gesek dalam. Ilustrasi dari lereng baji lihat Gambar 2-13.

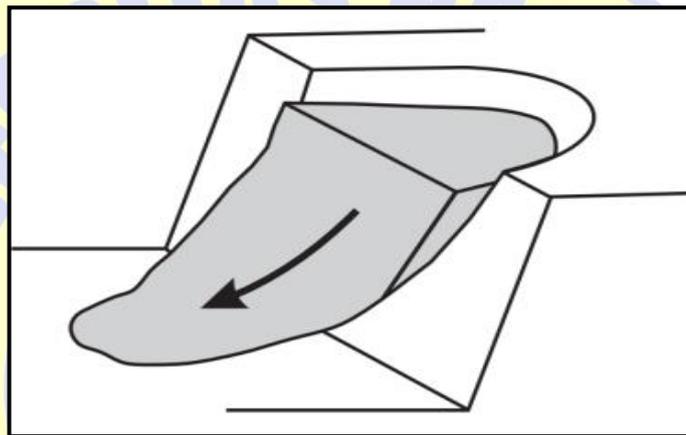
Kondisi dari longsor akan terjadi ketika $\psi_{fi} > \psi_i > \phi$ (Gambar 2-13), dimana ψ_{fi} adalah kemiringan dari muka lereng, ψ_i adalah kemiringan dari garis perpotongan dari bidang ketidakmerusan, ϕ adalah sudut gesek dalam batuan.



Gambar 2-12. Longsor Baji (Wyllie & Mah, 2004)

2.5.3 Longsor Busur

Menurut Hoek dan Bray (1981) longsor busur terjadi ketika material sangat lemah seperti pada lereng tanah atau pada massa batuan yang memiliki sangat banyak kekar seperti pada *waste dump* batuan. Longsor akan digambarkan dengan bidang ketidakmenerusan tunggal dan berbentuk longsor busur. Ilustrasi longsor busur lihat Gambar 2-14. Kondisi longsor busur akan terjadi ketika partikel individu dari tanah atau massa batuan memiliki ukuran sangat kecil dibandingkan dengan ukuran dari lereng dan ketika partikel tidak saling mengikat.



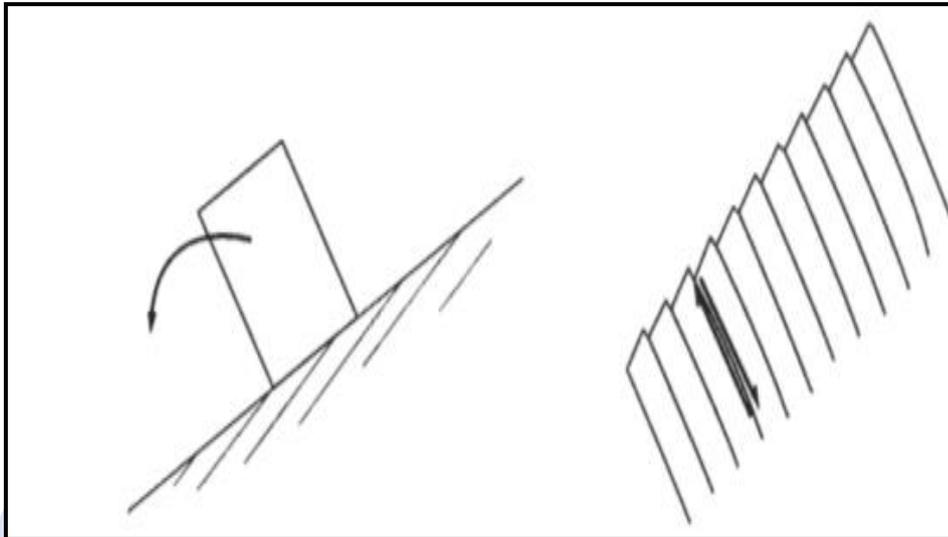
Gambar 2-13. Longsor Busur (Hoek dan Bray, 1981)

2.5.4 Longsor Guling

Menurut Piteau dan Martin (1982) dalam Kliche (1999) bahwa longsor guling terjadi ketika satu set dari bidang ketidakmenerusan yang terbentuk secara baik atau lurus, miring secara curam dalam jenjang. Dalam tipe longsor ini, batuan yang tipis dan panjang seperti kolom terbentuk dari bidang ketidakmenerusan yang miring secara curam akan berputar pada titik poros yang terletak pada pojok terendah dari blok.

Menurut Hudson dan Harrison (1997) bahwa longsor guling secara tradisional ada 2 model yaitu guling langsung dan guling lentur. Guling langsung terjadi ketika pusat gravitasi dari blok dari terletak di luar dari dasar blok, hasilnya adalah momen jungkir balik kritis yang berkembang. Guling lentur terjadi dalam kondisi batuan yang berlapis tersingkap di jenjang, dan tegangan utama paralel terhadap muka lereng mempengaruhi pergeseran antar lapisan yang menyebabkan

batuan *intact* retak dan hasilnya blok akan jungkir balik. Ilustrasi model tersebut lihat Gambar 2-15.



Gambar 2-14. Longsor Guling dan Lentur (Hudson dan Harrison, 1997)

Kondisi untuk menggelincir atau meluncur ditentukan oleh sudut gesek dalam (ϕ) dan kemiringan bidang luncurnya (ψ), tinggi balok (h) dan lebar balok (b) terletak pada bidang miring bertingkat. Kondisi geometri yang dapat menyebabkan terjadinya longsor guling antara lain:

1. Balok akan tetap stabil bila $\psi < \phi$ dan $b/h > \tan \phi$
2. Balok akan meluncur bila $\psi > \phi$ dan $b/h > \tan \phi$
3. Balok akan tergelincir, kemudian mengguling bila $\psi > \phi$ dan $b/h < \tan \phi$
4. Balok akan langsung mengguling bila $\psi < \phi$ dan $b/h < \tan \phi$

2.6 Metode Keseimbangan Batas

Menurut Kliche (1999) metode keseimbangan memiliki arti semua titik berada di ambang longsor. Pada titik tersebut, gaya penggerak sama dengan gaya penahan, dan faktor keamanan adalah satu. Ketika gaya penahan longsor lebih besar dari gaya pendorong, faktor keamanan adalah lebih besar dari satu dan lereng akan stabil, ketika gaya penahan lebih kecil dari gaya pendorong maka lereng akan menjadi tidak stabil.

2.6.1 Metode Bishop *Simplified*

Metode Bishop adalah metode yang diperkenalkan oleh A.W. Bishop menggunakan cara potongan dimana gaya-gaya yang bekerja pada tiap potongan ditunjukkan seperti pada gambar 2-16. Metode Bishop dipakai untuk menganalisis permukaan gelincir (*slip surface*) yang berbentuk lingkaran. Dalam metode ini diasumsikan bahwa gaya-gaya normal total berada/bekerja dipusat alas potongan dan bisa ditentukan dengan menguraikan gaya-gaya pada potongan secara vertikal atau normal. Persyaratan keseimbangan dipakai pada potongan-potongan yang membentuk lereng tersebut. Metode Bishop menganggap bahwa gaya-gaya yang bekerja pada irisan mempunyai resultan nol pada arah vertikal (Bishop,1955). Untuk lereng yang dibagi menjadi n buah *slice* (iris).
Secara umum ada tiga macam asumsi yang dapat dibuat :

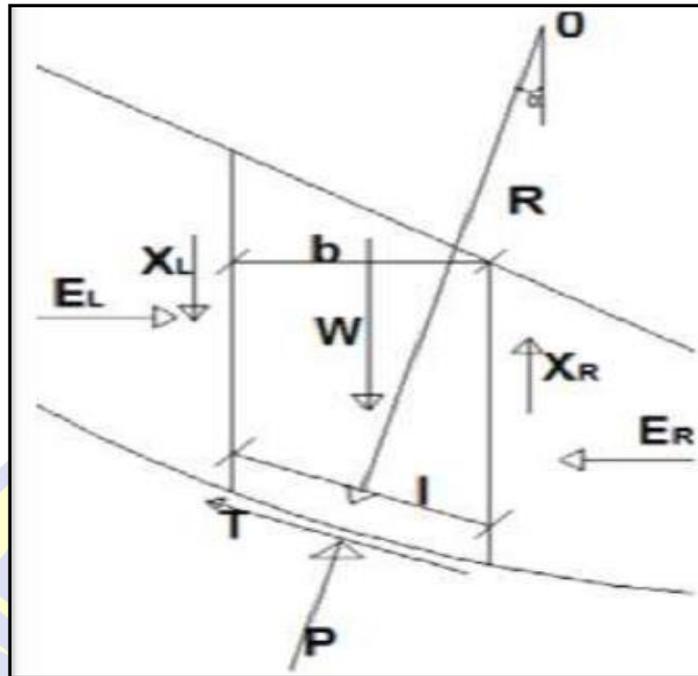
- 1) Asumsi mengenai distribusi tegangan normal sepanjang permukaan gelincir
- 2) Asumsi mengenai inklinasi dari gaya-gaya antar potongan
- 3) Asumsi mengenai posisi garis resultante gaya-gaya antar potongan.

Pada sebagian besar metode analisis, gaya normal diasumsi bekerja dipusat alas dari tiap potongan, sebab potongan tipis. Ini diterapkan pada sejumlah asumsi. Metode Bishop ini menggunakan asumsi sebanyak $(2n - 1)$. Prinsip dasarnya sebagai berikut:

- A. Kekuatan geser didefinisikan dengan menggunakan hubungan linier Mohr-Coulomb
- B. Menggunakan keseimbangan normal
- C. Menggunakan keseimbangan tangensial
- D. Menggunakan keseimbangan momen

Dengan memperhitungkan seluruh keseimbangan gaya maka rumus untuk faktor keamanan FK metode Bishop diperoleh sebagai berikut:

$$FK = \frac{[c' + (P-ul) \tan \phi']}{W \sin \alpha}$$



Gambar 2-15. Gaya-gaya yang bekerja pada suatu potongan

Keterangan :

W = Berat total pada irisan

E_L, E_R = Gaya antar irisan yang bekerja secara horisontal pada penampang kiri dan kanan

X_L, X_R = Gaya antar irisan yang bekerja secara vertikal pada penampang kiri dan kanan

P = Gaya normal total pada irisan

T = Gaya geser pada dasar irisan

b = Lebar dari irisan

l = Panjang dari irisan

2.6.2 Metode Irisan

Menurut Knappet dan Craig (2012) dalam metode irisan ini, permukaan runtuh potensial pada potongan, diasumsikan berbentuk busur lingkaran dengan pusat O dan jari-jari r . Massa tanah (ABCD) di atas permukaan runtuh (AC) dibagi oleh bidang-bidang vertikal menjadi sejumlah irisan dengan lebar b , seperti diperlihatkan pada Gambar 2-17. Dasar dari setiap irisan diasumsikan sebagai

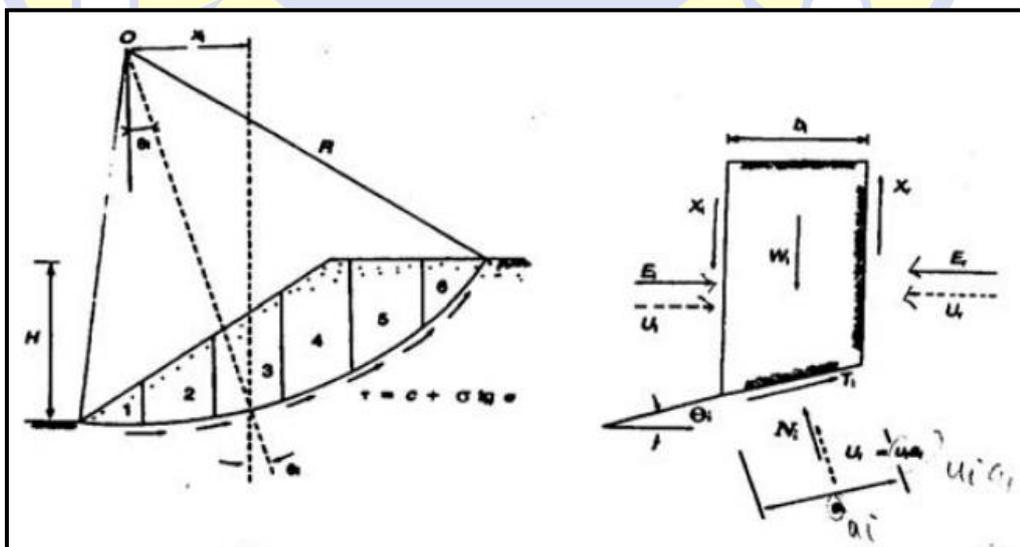
garis lurus. Untuk setiap irisan, sudut yang dibentuk oleh dasar irisan dan sumbu horisontal adalah α dan tingginya, yang diukur pada garis sumbu, adalah h . Faktor keamanan didefinisikan sebagai rasio kekuatan geser yang ada (τ_f) terhadap kekuatan geser (τ_{mob}) yang harus dikerahkan untuk mempertahankan syarat batas keseimbangan, yaitu:

$$F = \dots\dots\dots [2.12]$$

Faktor keamanan diambil sama untuk setiap irisan, agar terdapat keadaan yang saling mendukung di antara irisan-irisan, jadi harus ada gaya yang bekerja di antara irisan-irisan tersebut. Gaya (per satuan ukuran yang tegak lurus terhadap potongan) yang bekerja pada irisan adalah:

1. Berat total irisan, $W = \gamma bh$ (γ_{sat} bila diperlukan).
2. Gaya normal total pada dasar, N (sama dengan $\sigma_i l_i$). Umumnya, gaya ini memiliki dua buah komponen, yaitu gaya normal efektif N' (sama dengan $\sigma_i l_i$) dan gaya air batas U (*boundary water force*), (sama dengan $u_i l_i$), di mana u_i adalah tekanan air pori pada pusat dasar dan l_i adalah panjang dasar irisan.
3. Gaya geser pada dasar, $T_i = T_{mob} l_i$.
4. Gaya normal total pada sisi-sisi E_1 dan E_2 .
5. Gaya geser pada sisi-sisi, X_1 dan X_2 .

Setiap gaya luar juga harus diperhitungkan dalam analisis.



Gambar 2-16. Metode Irisan (Knappet dan Craig, 2012)

Masalah ini adalah statis tak-tentu dan untuk mendapatkan penyelesaian, harus dibuat asumsi tentang gaya-gaya antar irisan (*interslice forces*) E dan X, di mana faktor keamanan yang didapat tidak eksak.

Dengan meninjau momen terhadap O, maka jumlah momen akibat gaya-gaya geser T_i pada busur keruntuhan AC harus sama dengan momen akibat berat massa tanah ABCD. Untuk setiap irisan, lengan momen W_i adalah $r_i \sin \alpha_i$, sehingga

$$\sum M_R = \sum M_A \dots \dots \dots [2.14]$$

$$\sum T_i R_i = \sum W_i r_i \sin \alpha_i \dots \dots \dots [2.15]$$

Sekarang,

$$T_i = T_{\text{mob } i} l_i = l_i \dots \dots \dots [2.16]$$

$$\sum W_i l_i = \sum W \sin \alpha \dots \dots \dots [2.17]$$

$$F = l_i \dots \dots \dots [2.18]$$

Untuk analisis yang menggunakan tegangan efektif,

$$F = l_i \dots \dots \dots [2.19]$$

Persamaan [2.19] dapat digunakan pada keadaan c' dan/atau ϕ' yang bervariasi dengan kedalaman dan posisi dalam jenjang, kecocokan nilai rata-rata digunakan untuk setiap irisan. Pada tanah dengan konsisi homogeny, persamaan [2.19] dapat disederhanakan menjadi :

$$F = \dots \dots \dots [2.20]$$

L_a adalah panjang busur AC. Persamaan [3.20] cukup tepat tetapi tetap ada pendekatan dalam menentukan gaya N'_i tersebut diperkirakan. Dalam kebanyakan kasus, kekuatan kritis normalnya cocok dengan analisa kestabilan lereng, saat $\phi' = \phi_{cv}$ dan $c' = 0$, maka persamaan 3.19 dapat disederhanakan menjadi :

$$F = \dots \dots \dots [2.21]$$

1. Penyelesaian Penyederhanaan Menurut Bishop

Dalam penyelesaian ini diasumsikan bahwa resultan gaya pada sisi irisan adalah horizontal, yaitu :

$$X_1 - X_2 = 0 \dots \dots \dots [2.22]$$

Untuk keseimbangan gaya digeser pada dasar setiap irisan adalah

$$T_i = (c' l_i + N'_i \tan \phi'_i) \dots \dots \dots [2.23]$$

Dengan menyelesaikan kembali gaya-gaya dalam arah vertical :

$$W_i = N'_i \cos \alpha_i + u_i l_i \cos \alpha_i + \sin \alpha_i + \tan \alpha'_i \sin \alpha_i \dots\dots\dots [2.24]$$

$$\therefore N'_i = \dots\dots\dots [2.25]$$

Dengan mensubstitusikan

$$L_i = b \sec \alpha_i \dots\dots\dots [2.26]$$

Substitusi persamaan [3.25] ke persamaan [3.20], sesudah disusun kembali, didapatkan :

$$F = \dots \sum_i \{ [c'_i b + (W_i - u_i b) \tan \phi'_i] \} \dots\dots\dots [2.27]$$

Bishop (1995) selalu menunjukkan bagaimana nilai bukan nol dari resultan gaya ($X_1 - X_2$) bisa dimasukkan kedalam analisis, tetapi penyempurnaan ini hanya efek marginal pada faktor keamanan.

Tekanan air pori dapat dihubungkan dengan ‘tekanan pengisian total’ (*total fill pressure*) pada setiap titik dengan menggunakan rasio tekanan pori (r_u) yang tak berdimensi, yang didefinisikan sebagai :

$$r_u = \dots\dots\dots [2.28]$$

Untuk irisan ke-i

$$r_u = \dots\dots\dots [2.29]$$

Sehingga persamaan [3.27] dapat ditulis :

$$F = \dots \sum_i \{ [c'_i b + W_i (1 - r_{u,i}) \tan \phi'_i] \} \dots\dots\dots [2.30]$$

Karena faktor keamanan ada pada kedua ruas Persamaan [2.27] dan [2.30], maka harus digunakan suatu proses pendekatan bertahap untuk memperoleh penyelesaian tetapi dengan konvergensi yang tepat. Berhubung adanya perhitungan faktor keamanan berulang dan diperlukannya pemilihan sejumlah permukaan keruntuhan coba-coba yang tepat, maka metode irisan biasanya diselesaikan dengan menggunakan computer untuk mempercepat proses perhitungan.

2.6.3 Rocscience Slide

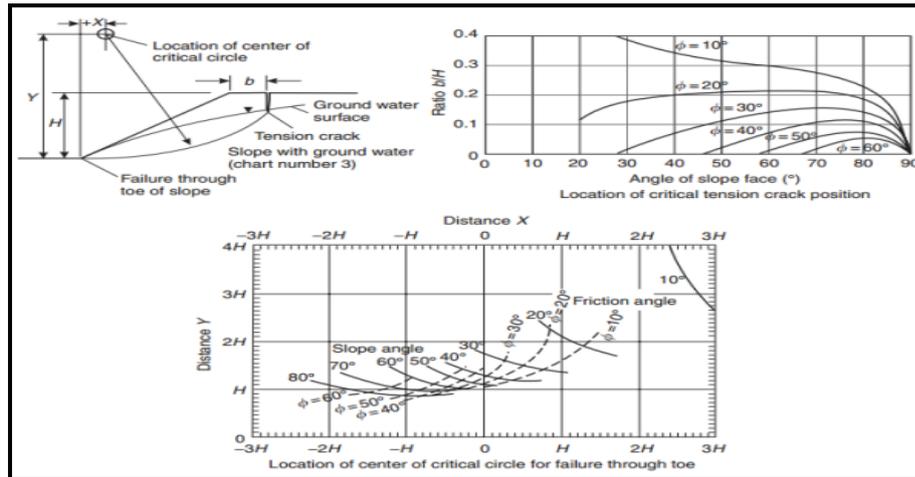
Rocscience Slide adalah salah satu *software* geoteknik yang mempunyai spesialisasi sebagai *software* perhitungan kestabilan lereng. Pada dasarnya *Rocscience Slide* adalah salah satu program di dalam paket perhitungan geoteknik

Rocscience yang terdiri dari *Swedge*, *Roclab*, *Phase2*, *RocPlane*, *Unwedge*, *anRocData*. Secara umum langkah analisis kestabilan lereng dengan *Rocscience Slide* adalah pemodelan, identifikasi metode dan parameter perhitungan, identifikasi material, penentuan bidang gelincir, *running* / kalkulasi, dan interpretasi nilai FoS dengan *software* komplemen *Slide* bernama *Slide Interpret*.

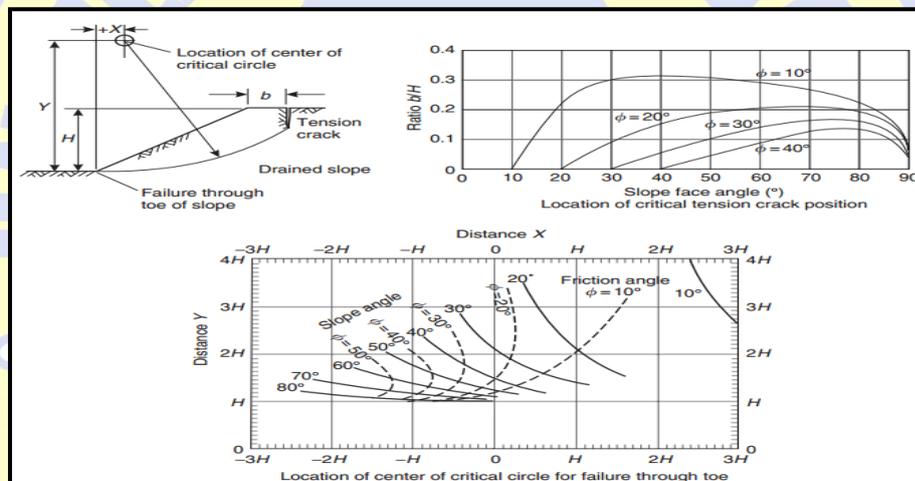
Analisis kestabilan lereng mempunyai tingkat kerumitan yang cukup tinggi dan mempunyai banyak variabel. Selain itu akurasi kestabilan lereng juga sangat dipengaruhi oleh akurasi parameter yang dimasukkan terkait kondisi sebenarnya. Perhitungan detail dan unsur ketidakpastiannya cukup besar (diwakili oleh parameter *probability*) sehingga jika perhitungan dilakukan manual akan memakan waktu yang cukup lama dan akurasinya pun tidak maksimal. Oleh karena itu analisis kestabilan lereng semakin banyak digunakan di dunia industri maupun pendidikan. Tetapi yang menjadi syarat utama seseorang sebelum menggunakan *software* adalah pemahaman terhadap konsep perhitungan tersebut. *Rocscience Slide* banyak digunakan di industri khususnya pertambangan dan konstruksi khususnya tanggul, bendungan, dan lereng pada sisi jalan.

2.6.4 Penentuan Bidang Luncur Kritis

Pada (Gambar 2-18 dan 2-19) dapat digunakan untuk estimasi pusat dari lingkaran dengan faktor keamanan terendah. Pada bidang luncur yang diasumsikan pada analisa pertama mungkin tidak memberikan faktor keamanan terendah, dan pengulangan dari analisis dibutuhkan dengan variasi dari posisi untuk menemukan bidang dari faktor keamanan terendah.



Gambar 2-17. Lokasi dari Bidang Luncur Kritis dan Rekahan Tarik Kritis untuk Lereng Kering (Wylie & Mah 2004)



Gambar 2-18. Lokasi dari Bidang Luncur Kritis dan Rekahan Tarik Kritis untuk Lereng dengan Kehadiran Air Tanah (Wylie & Mah 2004)

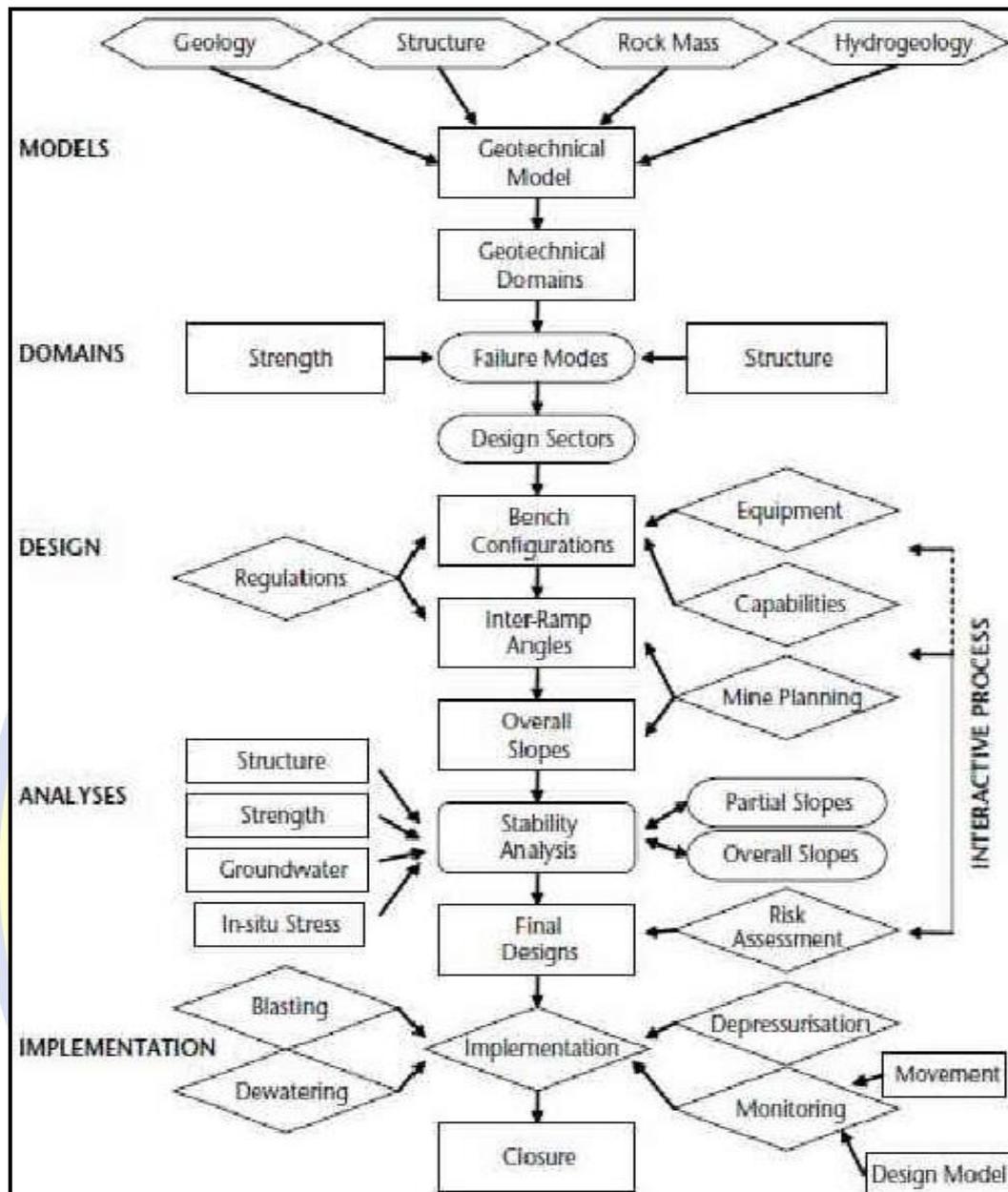
2.7 Pemantauan Lereng

Menurut Stacey (2009) pemantauan lereng merupakan kegiatan yang dilakukan setelah desain akhir lereng telah diketahui terlihat seperti pada Gambar 3.20. Adanya keterbatasan dalam praktik memaksa tambang untuk membuat batas lereng sementara atau akhir dan pengembangan dinding akhir dengan informasi yang tidak lengkap. Pada saat yang sama pada lereng tambang sulit untuk dilakukan prediksi dengan ketersediaan data investigasi dan teknik analisis, khususnya pada tahap desain. Kesimpulannya adalah ketergantungan yang kuat

pada sisten nabaheneb kereng dengan sistem oemantauan kemprehesif yang berkesinambungan. Pemantauan untuk penafsiran performa desain dan risiko longsor, dan juga untuk membantu meminimalkan risiko.

Menurut Kliche (1999) Latar belakang adanya kegiatan pemantauan adalah ketika massa bantuan atau tanah terganggu akibat perbuatan manusia atau alam, maka akan terjadi redistribusi dari tegangan yang berakibat pada perubahan bentuk. Penyesuaian tersebut dalam bentuk perpindahan, tekanan, beban, tegangan, dan regangan yang mana hal tersebut dapat dideteksi dan diukur. Menurut Calls (1982) dalam Kliche (1999) tujuan dari pemantauan lereng adalah sebagai berikut :

1. Menjaga kegiatan operasional yang aman (melindungi manusia dan peralatan).
2. Memberikan peringatan awal mengenai ketidakstabilan sehingga memungkinkan adanya modifikasi rencana penggalian untuk meminimalkan dampak ketidakstabilan.
3. Memberikan informasi geoteknis untuk menganalisis mekanisme longsor atau melakukan perancangan kembali lereng.



Gambar 2-19. Proses Desain Lereng (Stacey, dkk, 2009)

2.7.1 Parameter Pemantauan

Menurut Abramson (2002) parameter pemantau terdiri dari :

1. Observasi Visual

Menurut Abramson (2002) rekahan tarik yang terjadi pada *crest* lereng merupakan peringatan awal dari ketidakstabilan. Jika terjadi rekahan pada *crest* lereng maka lebar dan tinggi rekahan harus diawasi. Pengamatan rekahan memberikan petunjuk untuk lereng. Arah dari pergerakan bisa dilihat dari bentuk

rekahan, didasarkan dengan pencocokan dengan bentuk irregular dari rekahan. Pada semua kasus, observasi visual harus dilakukan sebagian peringatan awal dari ketidakstabilan. Instrumentasi harus dipasang sehingga data dapat diambil alih lebih cepat dan perbaikan pengamatan dapat direncanakan dan diterapkan.

2. Pergerakan Vertikal dan Horizontal

Setelah tanda secara visual telah diketahui, hal penting yang harus diketahui untuk mendapatkan informasi pergerakan tanah adalah :

- a. Dimana? – lokasi bidang geser
- b. Bagaimana arah dari pergerakan? – naik, turun, ke kiri atau ke kanan
- c. Seberapa banyak? – besarnya dari perpindahan
- d. Seberapa cepat? – kecepatan dari pergerakan

Dari semua data tersebut maka data kecepatan paling penting untuk diketahui. Jika pergerakan dari lereng berkurang, kesegeraan dari kebutuhan akan solusi tidak genting dan lebih banyak waktu untuk memikirkan variasi alternative. Jika kecepatandi pergerakan bertambah, maka dibutuhkan solusi yang cepat. Masalah mulai diperhatikan ketika kecepatan mulai terlalu tinggi.

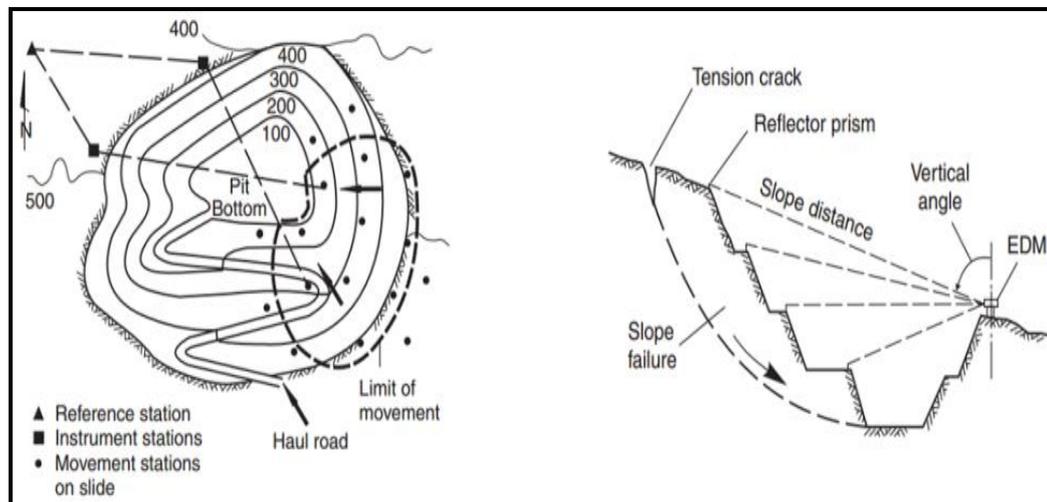
Berbagai data tersebut dapat diambil dengan berbagai tipe instrument yang baik dengan teknik di permukaan atau bawah tanah. Tipe dari instrument dipilih berdasarkan pada masalah yang akan dipantau. Akurasi, biaya, kondisi lingkungan, dan peralatan pelatihan personil juga merupakan faktor yang harus dipertimbangkan.

Berikut teknik pengambilan data untuk kepentingan pemantauan :

- a. Pemetaan optis dan elektronik

Menurut Kliche (1999) secara luas pemakaian metode ini digunakan untuk pergerakan kerja optis standar atau peralatan pemetaan elektronik dalam hubungannya dengan jaringan pemetaan dari target lokasi pada lereng batuan. Jaringan pemetaan bisa berupa batang kayu atau besi yang ditancapkan pada tanah atau bisa dengan pemasangan permanen prisma pengukuran. Lokasi dari target harus dipilih sehingga pergerakan relative dari area tidak stabil bisa dipantau. Sebagai tambahan, pusat control permanen harus berada pada lokasi yang stabil dan di luar area longsor serta dapat melihat target. Jaringan harus pada kondisi

triangular yang baik, dengan titik vertex dapat dilihat dari dua titik yang lain dan panjang dari garis pengamatan masih dalam jangkauan alat. Sistem pemetaan dapat dilihat pada Gambar 2-20 berikut ini :



Gambar 2-20. Sistem Pemetaan untuk Mengukur Pergerakan Lereng (Wylie and Mah, 2004)

b. Crackmeter

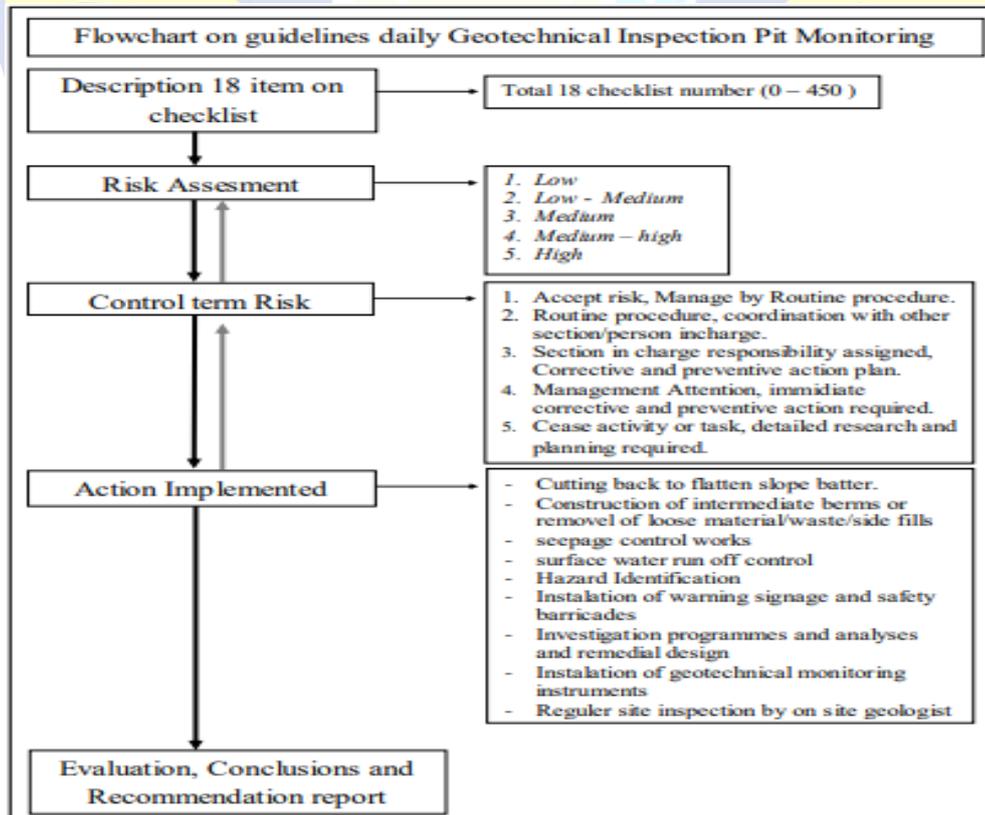
Menurut Wylie dan Mah (2004) rekahan tarik merupakan bagian dari pergerakan lereng. Pengukuran lebar rekahan merupakan cara yang dapat dipercaya dan murah untuk pergerakan lereng. Gambar 2-21 menunjukkan cara pengukuran lebar rekahan dengan cara sederhana. Dua buah patok ditancapkan diantara rekahan. Kedua patok tersebut dihubungkan dengan dua pipa paralon ygn berukuran berbeda, pipa yang mempunyai ukuran diameter kecil dimasukkan ke dalam pipa yang mempunyai ukuran diameter lebih besar yang kemudian dibaca perpindahan pergeseran dari dua pipa tersebut.



Gambar 2-21. Crackmeter (R. Musa, 2012)

Prosedur pemantauan kestabilan dinding lereng tambang dapat dilihat pada Table 2-2. Pada table tersebut memperlihatkan prosedur pemantauan, area yang dipantau, frekuensi dari pemantauan, aktivitas yang dilakukan, personil yang melakukan pemantauan, serta pelaporan dan tindakan yang harus diambil.

Tabel 2-2. Prosedur Pemantauan Kestabilan Dinding Lereng tambang (Peter Stacey, dkk, 2009)



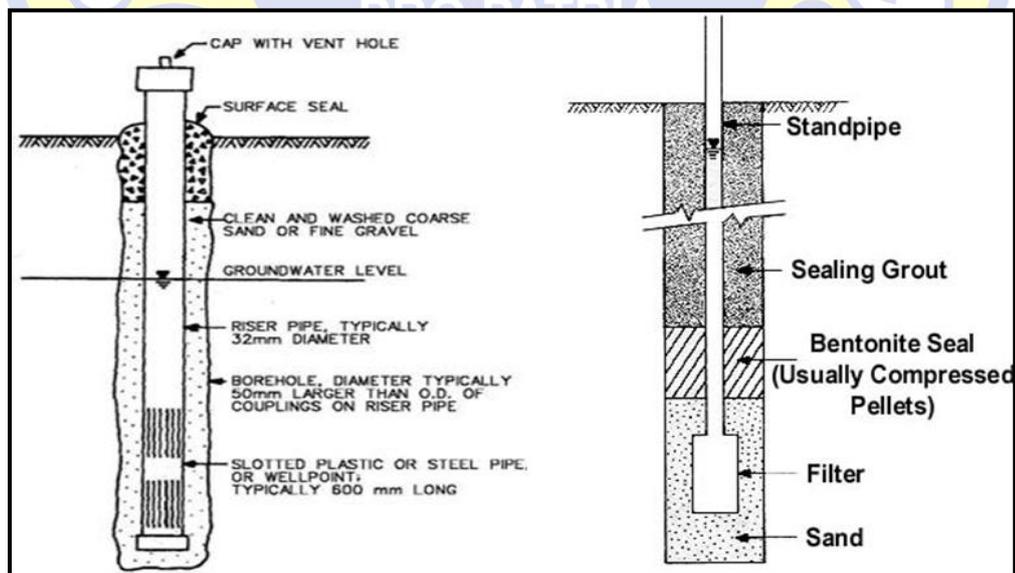
3. Tinggi Muka Air Tanah

Air tanah pada lereng berkontribusi pada penambahan gaya pendorong. Penentuan tinggi air actual merupakan hal penting pada desain dan analisis kestabilan. Tinggi air tanah yang diambil pada lubang bor eksplorasi tidak dapat dipercaya untuk penentuan tinggi muka air tanah. Penyemprotan air pada saat pengeboran berefek pada air tanah. Pada observasi yang lebih dipercaya, muka air tanah harus berada pada keadaan stabil dan ini memerlukan waktu beberapa hari setelah pengeboran itu selesai. Ketinggian muka air tanah dapat dihitung pada pengeboran pembukaan tetapi waktunya sangat lambat dan infiltrasi dari air permukaan dapat mengisi lubang bor. Metode alternative lain adalah membuat sumur observasi atau piezometer.

Berikut penjelasan sumur observasi dan piezometer menurut Dunnyelliff (1993) dalam Wylie and Mah (2004) :

a. Sumur Observasi

Tekanan air tanah dapat dipantau pada lubang bukaan jika nilai permeabilitas tanah dari massa batuan lebih besar dari 10^{-4} . Seperti pada batupasir yang kasar atau batuan dengan rekahan yang banyak. Sumur observasi jarang digunakan pada pemantauan tekanan air tanah pada batuan. Ilustrasi sumur observasi berada pada Gambar 2-22.



Gambar 2-22. (a) Sumur Observasi (b) Open Standpipe (Abramson, 2002)

b. *Standpipe* Piezometer

Standpipe piezometer terdiri dari pipa plastic panjang dengan bagian yang berlubang pada bagian paling bawah dengan diselubungi kerikil atau pasir untuk menyediakan koneksi hidrolis yang baik dengan batuan (Gambar 2--21). Ketinggian air yang berada di dalam *standpipe* piezometer dapat dihitung dengan *well sounder* yang terdiri dari kabel elektrik yang tersambung dengan baterau dan ammeter. Ketika *barrel end* tersambung bertemu dari piezometer ini adalah sederhana dan akurat sedangkan kerugian dari tipe ini adalah harus ada akses pada bagian atas lubang.

4. Tekanan Pori

Kebanyakan longsor lereng terjadi sepanjang batas geologi. Infiltrasi air dari permukaan dapat berakhir dalam perkembangan muka air *perched* pada batas dua material beda permeabilitas. Air *perched* menyebabkan tekanan air dalam tanah dan menyebabkan penambahan gaya pendorong. Piezometer digunakan dalam perhitungan tekanan pori. Idealnya piezometer berlokasi pada kedalaman dimana terjadi perubahan permeabilitas. Piezometer akan menghitung tekanan pori pada muka air *perched*. Piezometer pada kedalaman yang lebih dalam digunakan untuk menentukan tinggi muka air tanah yang permanen.

5. Pemantauan Getaran

Getaran dapat terjadi akibat adanya konstruksi yang berada dekat lereng. Perpindahan alat berat, mesin pemancang, peledakan, dan lalu lintas yang merupakan sumber getaran. Peledakan terdapat pada operasi pengeboran dan peledakan untuk pembongkaran lereng atau terowongan. Pemantauan getaran dianjurkan jika getaran melebihi getaran normal yang dapat diantisipasi pada area tersebut. Getaran dapat lebih diperhatikan jika berada pada area yang dekat dengan penduduk.

2.7.2 Peraturan Tentang Kestabilan Lereng

Kebijakan dan pedoman pengaturan kestabilan lereng penambangan di Indonesia mengacu pada Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi No. 55 K/26/M.PE 1995 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pertambangan

Umum. Salah satu pasal yang mengatur tentang kestabilan lereng terdapat pada Pasal 241 tentang tinggi permukaan kerja dan lebar teras kerja, yang berbunyi sebagai berikut :

1. Kemiringan, tinggi dan lebar teras harus dibuat dengan baik dan aman untuk keselamatan para pekerja agar terhindar dari material dan benda jatuh.
2. Tinggi jenjang (*bench*) untuk pekerjaan yang dilakukan pada lapisan yang mengandung pasir, tanah liat, kerikil, dan material lepas lainnya harus :
 - Tidak boleh lebih dari 2,5 meter apabila dilakukan secara manual
 - Tidak boleh lebih dari 6 meter apabila dilakukan secara mekanik
 - Tidak boleh lebih dari 20 meter apabila dilakukan dengan menggunakan *clamshell, dragline, bucket wheel excavator*, atau alat sejenis kecuali mendapat persetujuan Kepala Pelaksana Inspeksi Tambang.
3. Tinggi jenjang untuk pekerjaan yang dilakukan pada material kompak tidak boleh lebih dari 6 meter, apabila dilakukan secara manual.
4. Dalam hal penggalian dilakukan sepenuhnya dengan alat mekanis yang dilengkapi dengan kabin pengaman yang kuat, maka tinggi jenjang maksimum untuk semua jenis material kompak 15 meter, kecuali mendapat persetujuan Kepala Pelaksana Inspeksi Tambang.
5. Studi kemandapan lereng harus dibuat apabila :
 - Tinggi jenjang keseluruhan pada sistem penambangan berjenjang lebih dari 15 meter
 - Tinggi setiap jenjang lebih dari 15 meter
6. Lebar lantai teras kerja sekurang – kurangnya 1,5 kali tinggi jenjang atau disesuaikan dengan alat – alat yang digunakan sehingga dapat bekerja dengan aman dan harus dilengkapi dengan tanggul pengaman (*safety berm*) pada tebing yang terbuka dan diperiksa pada setiap giliran kerja dari kemungkinan adanya rekahan atau tanda – tanda tekanan atau tanda – tanda kelemahan lainnya.

2.8 Keadaan Geologi

2.8.1 Fisiografi

Daerah Kabupaten Tuban termasuk ke dalam Zona Rembang. Jalur Rembang ini terdiri dari pegunungan lipatan berbentuk antiklonorium yang memanjang ke arah Barat – Timur. Morfologi di daerah ini berupa dataran rendah, perbukitan bergelombang dan satuan morfologi perbukitan terjal yang umumnya memanjang dari Barat – Timur. (Gambar 2-23).



Gambar 2-23. Morfologi Daerah Penelitian (Foto *Drone* Seksi Perencanaan dan Pengawasan Tambang PT. Semen Indonesia Tuban)

Quarry tanah liat Mliwang Timur terletak di sekitar kawasan dataran dan perbukitan. Pada kawasan dataran merupakan daerah persawahan yang ditanami padi dan jagung, sedangkan untuk kawasan perbukitan di daerah sekitar lokasi penambangan ditumbuhi pepohonan seperti jati dan mahoni serta semak-semak pada puncak bukit.

2.8.2 Stratigrafi

Berdasarkan peta geologi daerah Jenu menunjukkan bahwa daerah *Quarry* tanah liat Mliwang Timur termasuk dalam Formasi Tuban anggota Ngrayong

yaitu batupasir kwarsa berselingan dengan batugamping dan tanah liat. (Tabel 2.2.).

1. Anggota Tawun, Formasi Tuban (Tmt)

Formasi ini diperkirakan berumur Miosen Awal yang terdiri dari napal pasiran berselingan dengan batugamping bioklastik. Napal pasiran berwarna coklat kekuningan dan berbukit halus sampai sedang. Batugamping bioklastik berwarna coklat kelabu mengandung fosil foraminifera. Batuan ini tidak tersingkap di daerah penelitian dan sekitarnya.

2. Anggota Ngrayong, Formasi Tuban (Tmtn)

Anggota Ngrayong ini berumur Miosen Tengah yang disusun oleh batu pasir kwarsa dengan perselingan tanah liat, lanau, lignit dan batugamping bioklastik. Tanah liat umumnya berwarna coklat kekuningan sedangkan pada batu pasir kwarsanya putih, dapat dilihat pada Gambar 2-24. Pada batu pasir kwarsa terkadang mengandung cangkang moluska laut.

3. Formasi Bulu (Tmb)

Formasi ini menindih selaras Formasi Tuban (Tmb), berumur Miosen Tengah yang terdiri dari batugamping pasiran dengan sisipan batu napal pasiran.

4. Formasi Woncolo (Tmw)

Di atas Formasi Bulu didapatkan Formasi Woncolo (Tmw) yang berumur Miosen Akhir. Formasi ini terdiri dari napal pasiran yang berselingan dengan batugamping pasiran.

5. Formasi Ledok (Tml)

Formasi ini berada di atas Formasi Woncolo (Tmw) secara selaras. Formasi ini berumur Miosen Akhir-pliosen yang terdiri dari batupasir glaukonitan dengan sisipan batugamping pasiran.

6. Formasi Mundu (Tpm) dan Formasi Paciran (Tpp)

Di atas Formasi Ledok (Tml) terdapat Formasi Mundu (Tpm) dan Formasi Paciran (Tpp) yang saling menjari berumur Pliosen. Formasi Mundu (Tpm) berupa batu napal, batugamping dan tanah liat sedangkan Formasi Paciran terdiri dari terdiri dari batu gamping pejal dan batu gamping dolomit.

7. Aluvium (Qa) dan Kolovium (Qc)

Lapisan termuda adalah Aluvium (Qa) dan Kolovium (Qc) dimana satuan ini diendapkan paling akhir berumur Holosen yang merupakan hasil rombakan dari Formasi Paciran (Tpp) dan Formasi Tuban (Tmb) berupa pasir, lanau, kerikil dan tanah liat.

2.8.3 Sruktur Geologi

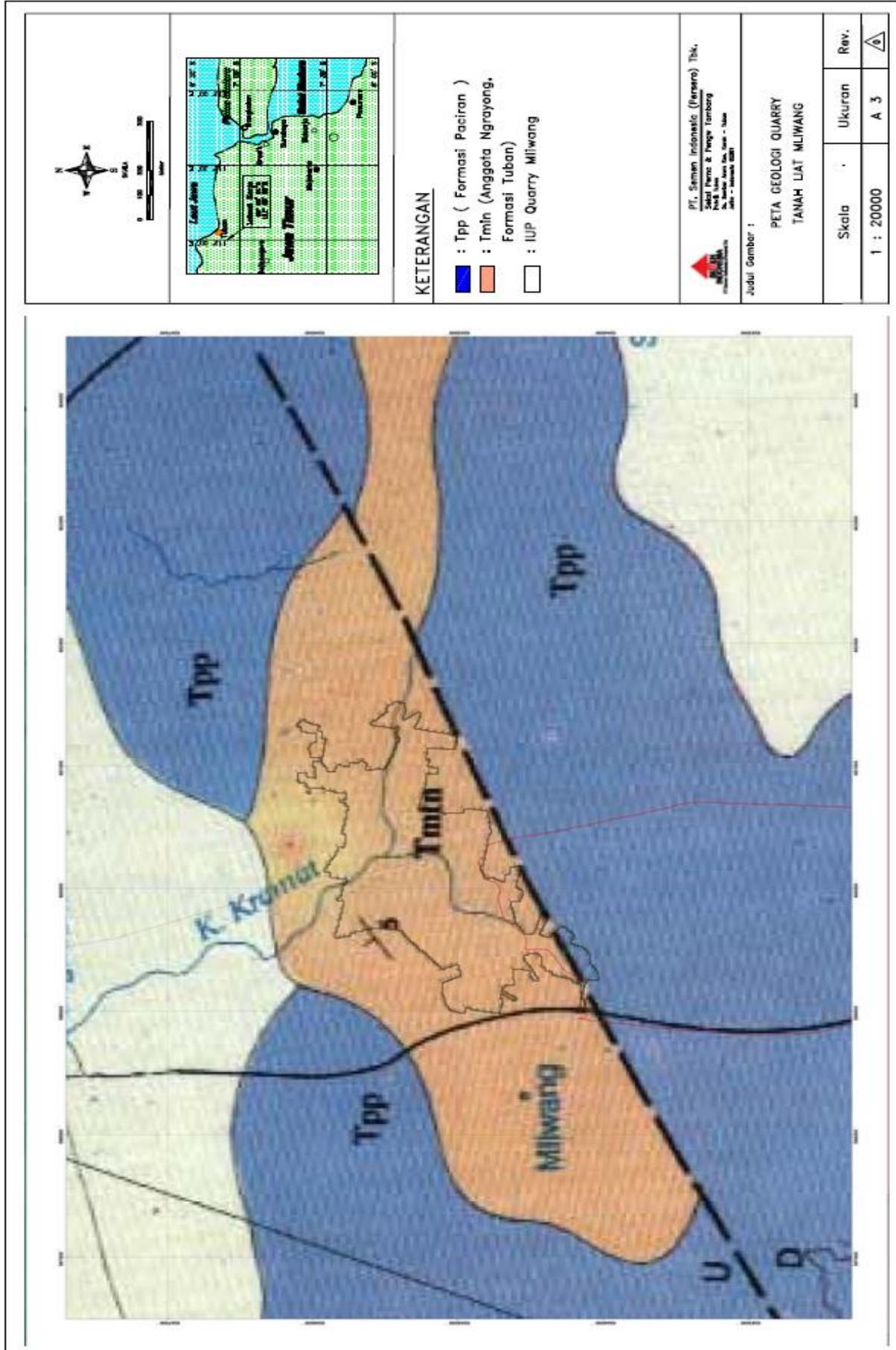
Di daerah penelitian tidak terdapat singkapan sehingga struktur geologi dapat diketahui dengan melihat peta geologi regional daerah penelitian. Di sebelah selatan terdapat sesar mendatar kanan yaitu pertemuan TPP (Formasi Paciran) dengan Tmnt (Formasi Ngrayong), akan tetapi posisinya berada di luar Ijin Usaha Pertambangan sehingga tidak mempengaruhi daerah penelitian. Peta Geologi Regional Daerah Penelitian dapat dilihat pada Gambar 2-24.

Tabel 2-4. Stratigrafi Regional Daerah Penelitian (Seksi Perencanaan dan Pengawasan Tambang)

Umur		Formasi	Deskripsi
Holosen		Aluvium (Qa) dan Kolovium	Pasir, lanau, kerikil dan tanah liat (Qa); hasil rombakan Formasi Paciran (Tpp) dan Formasi Tuban (Tmtm)
Pliososen		Mandu (Tpm) dan Paciran (Tpp)	Batu napal, batu gamping dan tanah liat (Tpm); batu gamping pejal dan batu gamping dolomitan (Tpp)
Milosen	Akhir	Lekok (Tml) dan Wonocolo (Tmw)	Batu Pasir gloukonitan dengan sisipan batu gamping pasiran (Tml); napal pasiran berselingan dengan batu gamping pasiran (Tmw)

Tengah	Bulu (Tmb) dan Anggota Ngrayong, Formasi Tuban (Tmtm)	Batu gamping pasiran dengan sisipan batu napal pasiran (Tmn); Batu pasir kuarsa berselingan dengan batu gamping dan tanah liat (Tmtm)
Awal	Anggota Tawun, Formasi Tuban	Napal pasiran berselingan dengan bat gamping bioklastik





Gambar 2-24. Peta Geologi Regional Daerah Penelitian (Seksi Perencanaan dan Pengawasan Tambang)