

SKRIPSI

**ANALISIS PEMANTAUAN KESTABILAN LERENG
MENGUNAKAN *SLOPE STABILITY RADAR*
PADA LERENG BERLUMPUR**

Disusun dan diajukan oleh:

**FAIZ HAIKAL
D111 20 1049**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ANALISIS PEMANTAUAN KESTABILAN LERENG MENGUNAKAN *SLOPE STABILITY RADAR* PADA LERENG BERLUMPUR

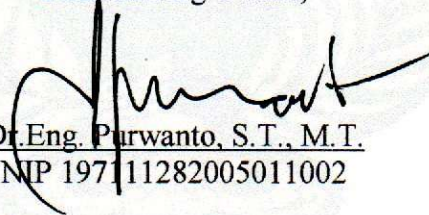
Disusun dan diajukan oleh

Faiz Haikal
D111201049

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 21 November 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

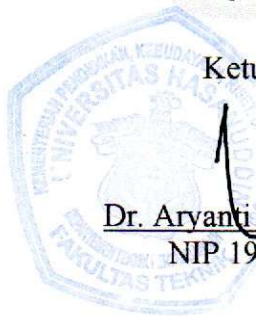
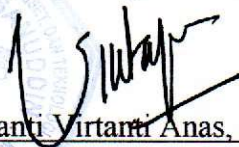
Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T.
NIP 197111282005011002

Ketua Program Studi,



Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T.
NIP 197010052008012026

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Faiz Haikal

NIM : D111201049

Program Studi : Teknik Pertambangan

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Analisis Pemantauan Kestabilan Lereng Menggunakan *Slope Stability Radar*
pada Lereng Berlumpur}

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 21 November 2024

Yang Menyatakan



Faiz Haikal

ABSTRAK

FAIZ HAIKAL. *Analisis Pemantauan Kestabilan Lereng Menggunakan Slope Stability Radar pada Lereng Berlumpur* (dibimbing oleh Purwanto)

Slope Stability Radar (SSR) merupakan salah satu alat yang digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng dengan menggunakan teknologi radar. Pemantauan SSR dapat dijadikan sebagai acuan perilaku atau pergerakan material termasuk lumpur yang dapat beresiko menjadi penyebab kegagalan lereng. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik lumpur, nilai faktor keamanan lereng dan menganalisis pengaruh lumpur terhadap kestabilan lereng menggunakan pemodelan numerik dan deformasi lereng berdasarkan pemantauan SSR. Penelitian ini menggunakan gabungan dari beberapa metode yaitu pengujian sifat fisik dan mekanik, metode *limit equilibrium* dan metode interferometri. Analisis data dilakukan dengan mengkorelasi karakteristik lumpur dengan nilai faktor keamanan dan deformasi material lumpur dari *Slope Stability Radar*. Berdasarkan area, lumpur Barat dan selatan dapat dikategorikan sebagai lempung lunak sedangkan lumpur Timur merupakan lempung sangat lunak. FK pada area lumpur Timur dengan nilai 1,053 dan PF dengan nilai 4,5% , FK pada area lumpur Selatan dengan nilai 1,212 dan PF dengan nilai 0% , FK pada area lumpur Barat dengan nilai 1,074 dan PF dengan nilai 0%. Karakteristik lumpur yang sangat berpengaruh terhadap deformasi dan kestabilan lereng yaitu kadar air. Lumpur dengan kadar air lebih sedikit akan mengalami deformasi lebih rendah dengan faktor keamanan yang tinggi. Lereng pada area lumpur Barat memiliki karakteristik lumpur sangat lunak dan konsistensi cair cenderung mengalami deformasi lebih besar. Sedangkan lereng pada lumpur Timur memiliki karakteristik lumpur lunak dengan konsistensi plastis, deformasi yang terjadi pada area lereng lumpur Timur lebih kecil disbanding lumpur Barat.

Kata Kunci: Lereng, *Slope Stability Radar*, *Limit equilibrium*, Lumpur

ABSTRACT

FAIZ HAIKAL. *Slope Stability Monitoring Analysis Using Slope Stability Radar on Mudy Slope* (supervised by Purwanto)

Slope Stability Radar (SSR) is one of the tools used in analyzing slope stability using radar technology. SSR monitoring can be used as a reference for the behavior or movement of materials, including mud or clay, that can be at risk of causing slope failure. This study aims to determine the characteristics of mud, the value of the slope safety factor and analyze the effect of mud on slope stability using numerical modeling and slope deformation based on SSR monitoring. This research uses a combination of several methods, namely physical and mechanical property testing, the *limit equilibrium* method and the interferometric method. Data analysis was conducted by correlating the mud characteristics with the safety factor value and deformation of mud material from the slope stability radar. Based on the area, the western and southern muds can be categorized as soft clays, while the eastern muds are very soft clays. FK in the east mud area has a value of 1.053 and PF has a value of 4.5%, FK in the south mud area has a value of 1.212 and PF has a value of 0%, FK in the west mud area has a value of 1.074 and PF has a value of 0%. Mud characteristics that greatly affect the deformation and stability of the slope are the water content. Mud with less water content will experience lower deformation, which is a high safety factor. Slopes in the western mud area characterized by very soft mud and liquid consistency tend to experience greater deformation. While the slope in the eastern mud has soft mud characteristics with plastic consistency, the deformation that occurs in the eastern mud slope area is smaller than the western mud.

Keywords: *Slope, Slope Stability Radar, Limit equilibrium, Mud*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
KATA PENGANTAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Lereng.....	5
2.2 Mekanika Tanah	7
2.3 Metode <i>Limit equilibrium</i>	12
2.4 Interferometri.....	15
2.5 <i>Slope Stability Radar</i>	17
BAB III METODE PENELITIAN.....	21
3.1 Lokasi Penelitian	21
3.2 Benda Uji dan Alat.....	21
3.3 Pengolahan Data	30
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Karakteristik Lumpur.....	41
4.2 Analisis Kestabilan Lereng	49
4.3 Pengaruh Lumpur Terhadap Kestabilan Lereng	56
BAB V PENUTUP.....	58
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Skema gaya yang bekerja pada sebuah lereng	6
Gambar 2	Tipe utama kelongsoran	7
Gambar 3	Ilustrasi Material Tanah	8
Gambar 4	Diagram batas-batas Atterberg.....	12
Gambar 5	Ilustrasi konsep interferometri	15
Gambar 6	Ilustrasi cara kerja alat <i>Slope Stability Radar</i>	18
Gambar 7	Perilaku deformasi pada lereng.....	18
Gambar 8	Metode prediksi waktu terjadinya longsor menggunakan plot <i>inverse velocity</i>	19
Gambar 9	Alat pengambilan sampel berupa (a) sekop kecil untuk pengambilan sampel dan (b) palu geologi	22
Gambar 10	Alat pelindung diri berupa (a) helm, (b) rompi <i>high visibility</i> , (c) masker (d) <i>sepatu safety</i> , (e) kacamata <i>safety</i> dan (f) sarung tangan	22
Gambar 11	Plastik untuk penyimpanan sampel	23
Gambar 12	(a) Corong kaca berukuran kecil, (b) piknometer yang telah diberi nomor dan (c) Botol aquades untuk penyimpanan air.	23
Gambar 13	(a) <i>mortar and pestle</i> untuk menggerus sampel, (b) mangkuk pengaduk dan (c) plat kaca sebagai permukaan datar pengujian batas plastis	24
Gambar 14	<i>Sieving</i> untuk memisahkan sampel berdasarkan ukuran <i>mesh</i>	24
Gambar 15	Timbangan dengan ketelitian 0,01 gram	25
Gambar 16	(a) cetakan sampel <i>direct shear test soil</i> , (b) cetakan sampel <i>unified compressive strength test soil</i> dan (c) bilah pemotong sampel	25
Gambar 17	Cawan sampel dan penutup.....	26
Gambar 18	Jangka sorong untuk mengukur sampel	26
Gambar 19	(a) <i>grooving tool</i> (b) <i>casagrande</i>	26
Gambar 20	Alat <i>digital compression machine (soil)</i>	27
Gambar 21	(a) pompa vakum dan (b) desikator	27
Gambar 22	Oven laboratorium	28
Gambar 23	<i>Slope stability radar</i> yang digunakan untuk <i>monitoring lereng</i>	28
Gambar 24	Proses pengambilan sampel lumpur bagian barat	29
Gambar 25	Pengambilan sampel lumpur bagian selatan	29
Gambar 26	Proses pengambilan sampel lumpur bagian timur	30
Gambar 27	Memasukkan dan menimbang sampel didalam cawan	31
Gambar 28	Memasukkan sampel kedalam piknometer dan menimbang sampel	32
Gambar 29	Mengukur diameter sampel menggunakan jangka sorong.....	33
Gambar 30	Alur yang telah dibuat pada bagian tengah mangkuk <i>casagrande</i>	34

Gambar 31	Sampel tanah dengan diameter 3mm namun belum mengalami keretakan	35
Gambar 32	Penulis yang sedang melakukan <i>compressive strength test</i>	37
Gambar 33	Tampilan layar <i>monitoring SSR</i>	38
Gambar 34	Custom analysis yang menampilkan perbandingan antara grafik 60- <i>velocity</i> (hijau), <i>deformation</i> (merah), <i>coherence</i> (biru) dan 60- <i>inverse velocity</i> (ungu).....	38
Gambar 35	Diagram alir penelitian.....	40
Gambar 36	Grafik hubungan kadar air dan berat volume tanah jenuh air	42
Gambar 37	Grafik hubungan kadar air dan berat volume tanah kering.....	43
Gambar 38	Grafik hubungan kadar air vs batas cair.....	45
Gambar 39	Grafik hubungan kadar air vs batas plastis	45
Gambar 40	Grafik hubungan batas cair dan batas plastis	46
Gambar 41	Grafik hubungan tegangan-regangan sampel lumpur Barat hasil pengujian <i>compressive strength test</i>	47
Gambar 42	Grafik hubungan tegangan-regangan sampel lumpur Selatan hasil pengujian <i>compressive strength test</i>	48
Gambar 43	Grafik hubungan tegangan-regangan sampel lumpur Timur hasil pengujian <i>compressive strength test</i>	48
Gambar 44	Grafik hubungan tegangan-regangan sampel keseluruhan	49
Gambar 45	Pemodelan lereng dan analisis faktor keamanan dengan <i>material properties</i> area lumpur Timur.....	50
Gambar 46	Probabilitas kelongsoran dengan <i>material properties</i> area lumpur Timur	51
Gambar 47	Pemodelan lereng dan analisis faktor keamanan dengan <i>material properties</i> area lumpur Selatan.....	51
Gambar 48	Probabilitas kelongsoran dengan <i>material properties</i> area lumpur Selatan	52
Gambar 49	Pemodelan lereng dan analisis faktor keamanan dengan <i>material properties</i> area lumpur Barat.....	53
Gambar 50	Probabilitas kelongsoran dengan <i>material properties</i> area lumpur Barat.....	53
Gambar 51	Deformasi yang bekerja pada lumpur <i>sidewall</i> sisi timur	54
Gambar 52	Deformasi yang bekerja pada lumpur <i>low wall</i> sisi selatan	55
Gambar 53	Deformasi yang bekerja pada lumpur <i>low wall</i> sisi barat	56

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Hubungan kuat tekan bebas tanah lempung (q_u) dengan konsistensinya	11
Tabel 2	Hasil pengujian kadar air	41
Tabel 3	Hasil pengujian berat volume tanah	42
Tabel 4	Hasil pengujian berat jenis	43
Tabel 5	Hasil pengujian batas-batas Atterberg	44
Tabel 6	Hasil <i>compressive strength test</i>	46
Tabel 7	<i>Material properties</i> yang digunakan untuk area lumpur Timur.....	50
Tabel 8	<i>Material properties</i> yang digunakan untuk area lumpur Selatan.....	51
Tabel 9	<i>Material properties</i> yang digunakan untuk area lumpur Barat.....	52
Tabel 10	Konsistensi tanah lempung berdasarkan kuat tekan.....	56
Tabel 11	Konsistensi batas-batas Atterberg berdasarkan kadar air dan batas cairnya	57
Tabel 12	Pergerakan lumpur hasil scan SSR	58
Tabel 13	Faktor keamanan lereng pada masing-masing area	58

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

SSR	=	<i>Slope stability radar</i>
FK	=	Faktor keamanan
UCS	=	<i>Uniaxial compressive strength</i>
PMP	=	<i>Primary monitoring point</i>
°C	=	Derajat Celcius
ASTM	=	<i>American Society for Testing and Material</i>
No.	=	Nomor
ml	=	Mililiter
cm	=	<i>Centimeter</i>
g	=	Gram
ω	=	Kadar air
W _w	=	Berat air (gram)
W _s	=	Berat tanah kering (gram)
W _c	=	Berat cawan yang akan digunakan (gram)
W _{cs}	=	Berat benda uji + cawan (gram)
W _{ds}	=	Berat cawan yang berisi tanah yang sudah dioven (gram)
G _s	=	Berat Jenis
W ₁	=	Berat piknometer (gram)
W ₂	=	Berat piknometer dan tanah kering (gram)
W ₃	=	Berat piknometer, tanah dan air (gram)
W ₄	=	Berat piknometer dan air bersih (gram)
PI	=	<i>Plasticity Index</i>
LL	=	<i>Liquid Limit</i>
PL	=	<i>Plasticity Limit</i>
σ_n	=	Tegangan normal
ISRM	=	<i>International Society for Rock Mechanics</i>
q _u	=	Kuat tekan uniaksial
F	=	Besar gaya yang bekerja pada sampel batuan
A	=	Luas penampang sampel
γ_{sat}	=	Berat volume tanah basah

w	=	Berat tanah basah (gram)
v	=	Volume tanah basah (cm ³)
γ_{dry}	=	Berat volume tanah kering
Maks	=	Maksimal
PF	=	Probabilitas kelongsoran

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Peta lokasi penelitian pada <i>Pit M PT Cipta Kridatama site</i> MHU ...	65
Lampiran 2: Letak <i>section</i> penampang 2 dimensi pada <i>Pit M</i>	66
Lampiran 3: Penampang 2 dimensi <i>section A-A'</i> area lumpur Timur.....	67
Lampiran 4: Penampang 2 dimensi <i>section B-B'</i> area lumpur Selatan	68
Lampiran 5: Penampang 2 dimensi <i>section C-C'</i> area lumpur Barat.....	69
Lampiran 6: Dokumentasi lereng area lumpur Timur.....	70
Lampiran 7: Dokumentasi lereng area lumpur Barat.....	71
Lampiran 8: Grafik progresif pada area lumpur Timur pada tanggal 23-24 februari 2024	72
Lampiran 9: Kartu konsultasi tugas akhir	73

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, yang telah melimpahkan segala hikmah-Nya kepada penulis, baik itu hikmah kesehatan, hikmah iman dan kesempatan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Analisis Pemantauan Kestabilan Lereng Menggunakan *Slope Stability Radar* pada Lereng Berlumpur**”. Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik (S1) pada Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini banyak pihak yang membantu, terutama dalam kesempatan ini, penyusun mengucapkan terima kasih kepada Pemerintah Provinsi Kalimantan Timur yang secara administratif penulis melakukan peneitian yang terletak di Sungai Payang, Kecamatan Loa Kulu, Kabupaten Kutai Kartanegara. Terima kasih kepada Perusahaan PT Cipta Kridatama yang telah mengizinkan penulis untuk melakukan penelitian pada wilayah izin usaha pertambangan PT Cipta Kridatama. Terima kasih kepada Bapak Grinus Halilintar, Bapak Adnan Alexander, Mas Sanjai Fathur Rizal, Mas Aqib Dzulfiqar Ronanda, Mas Rahmat, Mas Gabriel Arirupa, Mas Muhammad Rizki Maesse, Mas Jatmiko Wibowo, Mba Jualifa Pradisti Gayatri dan rekan-rekan pada departemen *Production, Planning and Control* PT Cipta Kridatama sebagai sosok mentor, kakak dan orang tua selama dilokasi penelitian yang selalu membantu saya dalam penelitian, pengenalan alat *Slope Stability Radar*, Pembacaan data *Slope Stability Radar* dan salah satu tempat konsultasi saya dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Terimakasih kepada Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing utama, Kepala Laboratorium Geomekanika Universitas Hasanuddin dan Penasehat Akademik yang selalu menyempatkan waktunya membimbing, mendukung, memberikan banyak arahan dan nasehat dalam proses penyelesaian tugas akhir serta sudah memberikan penulis ilmu dasar sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada teman-teman DRILLING 2020 dan PARIS yang telah menemani penulis selama masa perkuliahan, terima kasih atas kerendahan hati, canda tawa, suka dan duka yang

dibagikan Bersama serta tidak henti-hentinya memberikan bantuan, doa dan motivasi kepada penulis, teman-teman Laboratorium Geomekanika yang turut membantu penulis dalam melakukan penelitian dan pengujian untuk penyelesaian tugas akhir penulis. Penulis mengucapkan terimakasih kepada Delsy Anggraini selaku kakak yang selalu menasehati, tempat diskusi dan tempat berbagi cerita.

Penulis juga mengucapkan Terima kasih yang paling tulus kepada Ibu Yuliana A.Md.Keb. selaku orang tua penulis karena dalam setiap halaman tugas akhir ini, cinta dan doanya selalu menyertai setiap langkah penulis. Ibu yang selalu mendukung, membimbing dan membersamai penulis dalam penulisan tugas akhir ini. Terima kasih telah mengisi hari-hari penulis dengan beragam kebahagiaan, hingga waktu seumur hidup tidak akan cukup bagi penulis untuk menikmati segala keindahan yang dihidirkannya.

Penulis sangat berharap diberikan kritik dan saran agar tercapainya kesempurnaan dalam penulisan tugas akhir ini. Penulis berharap penelitian tugas akhir ini dapat berguna dimasa mendatang dan dapat dijadikan sebagai referensi dalam pengembangan teknologi maupun dalam bidang ilmu pengetahuan terkhusus dalam bidang teknik pertambangan.

Makassar, 21 November 2024

Faiz Haikal

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia. Lereng yang terbentuk secara alami, misalnya lereng bukit dan tebing sungai. Sedangkan lereng buatan manusia, antara lain, galian dan timbunan, tanggul dan dinding tambang terbuka (Pangemanan dkk., 2014). Secara garis besar, lereng dibedakan menjadi dua yaitu lereng alam dan lereng buatan. Kemantapan lereng sangat erat berkaitan dengan geoteknik. Faktor kemantapan suatu lereng menyangkut keselamatan dalam bekerja di area pertambangan. Kondisi lereng dengan tingkat longsor yang tinggi sangat memerlukan rekayasa geoteknik agar dapat dilakukan penanggulangan dan terhindar dari kelongsoran lereng yang dapat mengakibatkan kerugian serta menghambat kegiatan produksi pertambangan (Supandi dkk., 2015).

Kemantapan suatu lereng dapat dilihat dari besaran nilai faktor keamanan (FK), apabila faktor keamanan lebih tinggi dari satu, umumnya lereng tersebut dapat dianggap stabil (Yufita dkk., 2024). Pendekatan menggunakan faktor keamanan memiliki kelemahan untuk desain lereng yaitu tidak dapat diberlakukan untuk kondisi lereng lainnya. Salah satu aspek yang perlu diperhatikan dalam pertambangan terbuka adalah karakteristik geoteknik yang terdapat dalam lapisan batuan atau model stratigrafi lereng (Selsabeel dkk., 2021).

Lumpur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kestabilan lereng. Pengaruh ini berkaitan dengan sifat-sifat geoteknikal lumpur dan bagaimana mereka dapat memengaruhi kecenderungan lereng untuk runtuh atau longsor (Darwis, 2018). Tanah lempung memiliki sifat geoteknikal yang khas, seperti kandungan air yang tinggi dan sudut geser internal yang rendah, yang dapat secara signifikan mempengaruhi kecenderungan lereng untuk mengalami pergeseran dan bahkan longsor. Perubahan cuaca ekstrem seperti hujan deras memiliki dampak yang signifikan pada kestabilan lereng berlumpur. Lumpur yang lembek atau lunak lebih cenderung runtuh dan kehilangan kestabilan (Putra, 2019).

PT Cipta Kridatama merupakan salah satu perusahaan kontraktor penyedia jasa pertambangan di Provinsi Kalimantan Timur yang melakukan kegiatan penambangan milik PT Multi Harapan Utama (MHU) yang terdapat di Desa Sungai Payang, Kecamatan Loa Kulu, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. Lokasi tersebut melakukan penambangan batubara dengan sistem tambang terbuka. Selama beberapa bulan terakhir telah terjadi beberapa longsor lereng terutama pada lereng di *pit* M, yang diakibatkan oleh adanya material berupa lumpur pada lapisan penyusun lereng, dimana data *material properties* lumpur masih menggunakan data *trial and error*. Lereng-lereng ini kemudian dimonitor menggunakan alat *Slope Stability Radar* (SSR) .

Slope Stability Radar (SSR) merupakan salah satu alat yang digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng dengan menggunakan teknologi radar. *Slope Stability Radar* digunakan dalam pemantauan sebagai peringatan apabila terjadi pergerakan pada lereng dengan tingkat akurasi hingga milimeter. Alat *Slope Stability Radar* menggunakan konsep interferometri untuk menghitung pergerakan dan deformasi lereng berdasarkan sudut fase dari satu scan ke scan lainnya (Monserrat dkk., 2014). Oleh karena itu, dilakukan penelitian agar diketahui pengaruh lumpur yang terdapat pada suatu lereng dengan menggunakan alat *Slope Stability Radar* agar dapat dijadikan sebagai acuan perilaku atau pergerakan lereng yang dapat beresiko menjadi penyebab kegagalan lereng serta dapat digunakan dalam membuat strategi mitigasi resiko bencana pada pertambangan yang menyebabkan kerugian.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang telah dijabarkan, adapun rumusan masalah pada penelitian sebagai berikut:

1. *Material properties* lumpur masih menggunakan data *trial and error* maka dari itu diperlukan adanya pengujian laboratorium dengan material lumpur.
2. Geometri lereng sebelumnya telah memiliki nilai kemantapan lereng sesuai peraturan dan kajian perusahaan yang mengacu pada Keputusan Menteri ESDM No.1827.K/30/MEM/2018 yang telah dinyatakan aman dengan nilai lebih dari 1,3 namun masih terjadi longsor dengan material

lumpur pada kondisi aktual. Analisis diperlukan karena dalam kondisi aktual masih terdapat longsoran dengan nilai kemantapan lereng yang telah dinyatakan aman dengan metode *limit equilibrium*.

3. Kurangnya penelitian geoteknik terbaru tentang pengaruh karakteristik lumpur dan besaran deformasi lumpur dengan menggunakan alat *Slope Stability Radar* sebagai bantuan dalam mengetahui besaran deformasi yang terjadi pada area lumpur. Analisis diperlukan untuk memvalidasi pengaruh lumpur berdasarkan karakteristik dan besaran deformasi lumpur.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan menggunakan alat *Slope Stability Radar* dengan metode atau teknik interferometri dan bertujuan sebagai berikut:

1. Menentukan sifat fisik dan sifat mekanik lumpur dengan pengujian laboratorium.
2. Menganalisis nilai kemantapan lereng menggunakan metode *limit equilibrium* dengan parameter *material properties* yang telah dilakukan pengujian dengan bantuan perangkat lunak *Rocscience Slide*.
3. Menganalisis pengaruh lumpur terhadap faktor keamanan dan deformasi lereng dengan menggunakan alat *Slope Stability Radar*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini akan menghasilkan informasi mengenai pengaruh lumpur dengan perbedaan karakteristik dan *material properties* dari lumpur terhadap kestabilan lereng. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan untuk memprediksi pergerakan lumpur dan mengurangi resiko bencana akibat kegagalan lereng. Selain itu, hasil yang diperoleh dapat dijadikan sebagai acuan untuk geometri lereng aman yang memiliki material lumpur. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan penanganan material lumpur dan pergerakan lereng dinamis dari lokasi penelitian.

1.5 Ruang Lingkup

Pengambilan data dilakukan pada *pit* M wilayah pertambangan PT Cipta Kridatama. Penelitian ini mencakup analisis pengaruh dari lumpur terhadap

kestabilan lereng. Penelitian akan melibatkan pemetaan geologi untuk memahami kondisi dasar lereng dan karakteristik batuan penyusun lereng. Faktor lain yang dapat mempengaruhi respons lereng terhadap pengaruh lumpur seperti geometri lereng, berat jenis, properti massa batuan, analisis sifat fisik serta aspek mekanika lumpur akan diidentifikasi dan dilakukan pengukuran. Kesimpulan dari penelitian ini diharapkan dapat memberi wawasan tentang pengaruh lumpur terhadap kestabilan lereng serta memberikan dasar untuk pengembangan strategi mitigasi resiko bencana yang lebih efektif.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lereng

Lereng adalah permukaan bumi yang membentuk sudut kemiringan tertentu dengan bidang horizontal. Lereng dapat terbentuk secara alami maupun buatan manusia. Kemiringan lereng atau topografi adalah sudut yang dibentuk oleh perbedaan tinggi permukaan, yaitu antara bidang datar tanah dengan bidang horizontal. Lereng yang terbentuk secara alami, misalnya lereng bukit dan tebing sungai. Sedangkan lereng buatan manusia, antara lain, galian dan timbunan, tanggul dan dinding tambang terbuka. (Pangemanan dkk., 2014).

Lereng alam adalah lereng yang terbentuk sebagai hasil dari proses alamiah yang dipengaruhi oleh fenomena geologi. Sering ditemui lereng alam di daerah-daerah dengan topografi berbukit atau pegunungan. Lereng dapat dikategorikan sebagai lereng alam ketika tidak ada tindakan atau upaya yang dilakukan untuk mengubah kemiringannya atau menambahkan struktur konstruksi tertentu. Dengan kata lain, stabilitas dan kekokohan lereng alam sepenuhnya bergantung pada karakteristik, sifat, dan struktur alami tanah serta bentuk geologi yang ada. Lereng buatan adalah jenis lereng yang muncul sebagai hasil dari tindakan manusia dalam proses perencanaan. Lereng buatan dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu lereng buatan yang mengharuskan tindakan konstruksi, seperti penguatan lereng, dan lereng buatan tanpa tindakan konstruksi yang hanya bergantung pada karakteristik alami tanah dan kemiringan untuk menjaga stabilitasnya. Dalam kedua kasus tersebut, pengembangan lereng buatan merupakan hasil dari proses perencanaan dan konstruksi yang dilakukan manusia (Pangemanan dkk., 2014).

Masalah kestabilan lereng di dalam suatu pekerjaan yang melibatkan kegiatan penggalian maupun penimbunan merupakan masalah penting karena melibatkan keselamatan manusia, peralatan, dan bangunan yang ada di sekitar lereng tersebut. Apabila tanah ataupun batuan tersebut dikenakan suatu kegiatan, seperti penggalian, penurunan, penimbunan, pengangkutan, erosi atau aktivitas lain yang membuat terganggunya kesetimbangan, tanah ataupun batuan tersebut

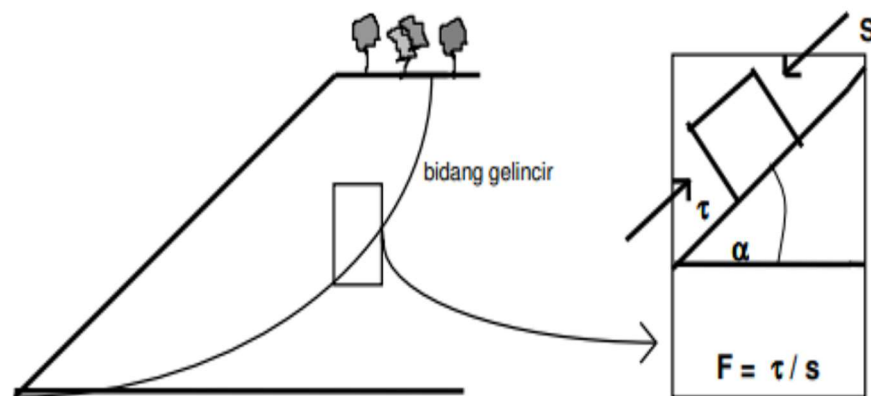
akan berusaha mencapai kesetimbangan baru dengan cara melepaskan beban terutama dalam bentuk longsoran (Dong-ping dkk., 2016). Suatu lereng terdapat dua macam gaya, yaitu gaya yang membuat massa batuan bergerak dan gaya yang menahan massa batuan tersebut. Suatu lereng akan longsor jika gaya penggeraknya lebih besar dari penahannya. Kestabilan suatu lereng terancam jika kekuatan yang menahan lereng lebih lemah daripada gaya penggerak yang bekerja padanya. Dalam konteks matematika, kita dapat mengukur kestabilan lereng dengan menggunakan faktor keamanan (FK) yang dapat dirumuskan sebagai berikut (Zhou dkk., 2019):

$$FK = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}} = \quad (1)$$

$FK > 1$, lereng dianggap stabil

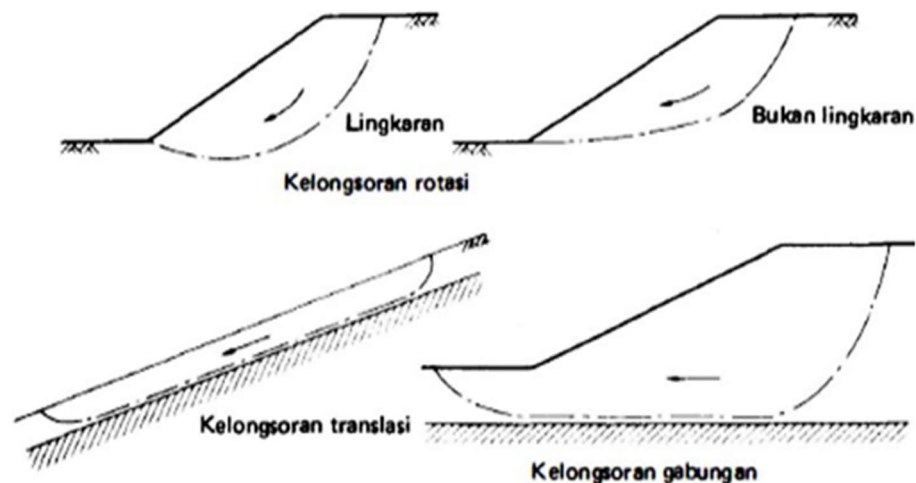
$FK < 1$, lereng dianggap tidak stabil

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



Gambar 1 Skema gaya yang bekerja pada sebuah lereng (Khodijah dkk., 2022)

Ketidakstabilan lereng dapat terjadi di berbagai jenis lereng karena beberapa faktor seperti deformasi batuan, pengaruh signifikan dari rembesan air tanah, serta gaya eksternal lainnya. Gaya gravitasi dan rembesan cenderung menyebabkan ketidakstabilan pada lereng alami, lereng yang dibentuk oleh penggalian, serta bendungan. Terdapat tiga tipe utama kelongsoran, yang dapat dilihat pada Gambar 1, yaitu (Zakaria dkk., 2016):



Gambar 2 Tipe utama kelongsoran (Zakaria dkk., 2016)

- Kelongsoran rotasi (*rotational slips*), di mana permukaan yang runtuh memiliki bentuk seperti busur lingkaran atau kurva yang bukan lingkaran.
- Kelongsoran translasi, cenderung terjadi ketika lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang relatif dangkal di bawah permukaan lereng.
- Kelongsoran gabungan, terjadi ketika lapisan tanah yang berbatasan berada pada kedalaman yang lebih dalam.

2.2 Mekanika Tanah

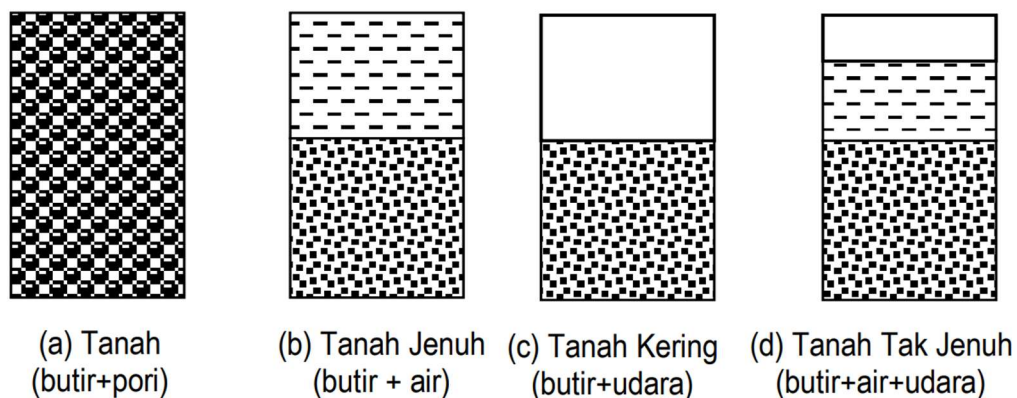
Secara umum tanah didefinisikan sebagai material yang terdiri dari butiran mineral-mineral padat yang tidak tersementasi satu sama lain dan dari bahan-bahan organik yang telah melapuk di sertai dengan zat cair dan gas yang mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel-partikel padat tersebut. Tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas, yang terletak di atas batuan dasar. Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida yang mengendap di antara partikel-partikel. Ruang di antara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya (Supandi dkk., 2015).

Tanah merupakan agregat mineral, bahan organik, dan endapan yang relatif lepas yang terletak di atas batuan dasar, memainkan peran penting dalam berbagai aspek rekayasa dan pemahaman risiko kebencanaan. Klasifikasi umum

tanah menjadi dua jenis, yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus. Pengetahuan mendalam tentang sifat-sifat tanah sangat diperlukan dalam proses perencanaan dan pelaksanaan pekerjaan konstruksi seperti pembangunan pondasi, timbunan, dan bendungan. Selain itu, pemahaman yang komprehensif terhadap sifat-sifat tanah juga diperlukan untuk mengantisipasi serta merespons isu-isu kebencanaan seperti longsor, likuifaksi, dan gempa bumi (Putra, 2019).

Tanah terdiri dari berbagai fase padat, cair, dan gas, dimana karakteristiknya bergantung pada perilaku fase interaksi ini, dan pada tegangan yang diterimanya. Fasa padat meliputi tanah liat, mineral non-tanah liat, dan bahan organik. Unsur-unsur ini dikategorikan menurut ukurannya seperti tanah liat, pasir, dan kerikil. Fasa cair terdiri dari air yang mengandung senyawa organik yang tersedia dari tumpahan kimiawi, limbah, dan air tanah, sedangkan fasa gas biasanya udara. Struktur tanah tergantung pada susunan partikel, kelompok partikel, ruang pori, dan komposisinya. Karakteristik dasar ini menentukan jenis struktur yang akan dibangun dan tindakan dukungan eksternal yang harus diambil untuk membuat struktur tersebut bertahan lama dan menanggung dampak gempa, rembesan air, dan faktor eksternal lain (Darwis, 2018).

Material tanah dapat terdiri atas dua atau tiga unsur, yakni butiran, air dan udara. Pada dalam kondisi tanah jenuh terdapat dua unsur, yakni butiran dan air, dan pada tanah yang kering juga hanya terdapat dua unsur yakni butiran dan udara. Sedangkan pada tanah dengan kondisi tak jenuh terdapat tiga unsur, yakni butiran, air dan udara. Masing-masing elemen tanah tersebut, memiliki volume dan berat. Ketiga kondisi tersebut dapat diilustrasikan sebagai berikut (Darwis, 2018).



Gambar 3 Ilustrasi Material Tanah (Darwis, 2018)

Tanah lunak yaitu berkaitan dengan tanah-tanah yang jika tidak dikenali dan diteliti secara seksama dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang tidak dapat ditoleransi, tanah tersebut mempunyai kuat geser dalam yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Lumpur memiliki kemampuan tinggi untuk menahan air yang terkandung didalamnya. Kandungan air yang tinggi dapat membuat lereng menjadi lebih lemah dan rentan terhadap longsor karena berkurangnya kekuatan geser tanah. Lumpur yang terlalu jenuh air dapat menyebabkan beratnya tanah meningkat, yang memperburuk stabilitas lereng (Supandi dkk., 2015).

Lumpur yang lembek atau lunak lebih cenderung runtuh dan kehilangan kestabilan lebih cepat dibandingkan dengan lumpur yang keras atau kaku. Lumpur memiliki sudut geser internal yang lebih kecil dibandingkan dengan jenis tanah lainnya, seperti pasir atau kerikil, lereng yang terbuat dari lumpur lebih rentan terhadap pergeseran dan longsor. Perubahan beban atas lereng, seperti penambahan struktur bangunan atau penggalian, dapat memengaruhi kestabilan lereng. Lumpur yang berada di bawah tekanan tambahan mungkin menjadi tidak stabil (Darwis, 2018).

Sifat fisik dan komposisi tanah memegang peranan penting dalam konstruksi. Sifat-sifat tanah digambarkan dengan berbagai parameter yang disebut indeks properti atau sifat fisik tanah. seperti berat volume, kadar air, porositas, angka pori, derajat kejenuhan, derajat kepadatan, derajat kerapatan, berat jenis, analisis butiran, batas cair, batas plastis, batas susut, dan sebagainya. Selain itu, parameter seperti koefisien konsolidasi, kohesi, sudut geser dalam dan lainnya merupakan parameter teknis tanah yang terpengaruh oleh sifat fisik tanah. Berikut penjelasan mengenai sifat fisik tanah (Darwis, 2018):

1.1.1. Berat Volume

Berat volume merupakan petunjuk kepadatan tanah diomana semakin padat suatu tanah, maka semakin tinggi berat volumenya. Berat volume tanah yang baik berkisar anatara $1,1 \text{ gr/cm}^3 - 1,6 \text{ gr/cm}^3$. Jika tanah memiliki berat volume tinggi maka artinya tanah sangat keras sehingga air akan sulit untuk masuk kedalam tanah dan bahkan sulit ditembus akar tanaman.

1.1.2. Kadar Air

Kadar air adalah perbandingan antara berat air (W_w) dengan berat butiran padat (W_s) di dalam massa tanah, dinyatakan dengan formula sebagai berikut:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100\% \quad (1)$$

1.1.3. Porositas

Porositas merupakan perbandingan antara volume rongga (V_v) dengan volume total (V). Nilai porositas dapat dinyatakan dalam satuan persen (%) atau dalam satuan decimal. Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2)$$

1.1.4. Derajat Kejenuhan

Derajat Kejenuhan adalah perbandingan antara volume air (V_w) dengan volume total rongga pori (V_v). Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \times 100\% \quad (3)$$

1.1.5. Angka Pori

Angka pori adalah perbandingan antara rongga (V_v) dengan volume butiran (V_s). Parameter ini dituliskan dengan formula sebagai berikut:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (4)$$

1.1.6. Batas Cair

Batas Cair adalah nilai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dengan keadaan plastis tanah, atau nilai batas atas pada daerah plastis.

1.1.7. Batas Plastis

Batas plastis didefinisikan sebagai nilai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dengan daerah semi padat. Nilai batas plastis ini ditentukan dengan percobaan menggulung tanah hingga diameter 3,2 mm dan mulai mengalami retak-retak.

1.1.8. Batas Susut

Batas susut adalah nilai kadar air pada kedudukan antara zona semi padat dengan zona padat.

1.1.9. Indeks Plastisitas

Indeks Plastisitas (PI) adalah selisih antara batas cair dengan batas plastis pada tanah. Indeks plastisitas menunjukkan sifat keplastisan tanah, jika nilai PI tinggi maka tanah mengandung banyak lempung, dan jika nilai PI rendah maka tanah mengandung banyak lanau. Dinyatakan dalam formula sebagai berikut:

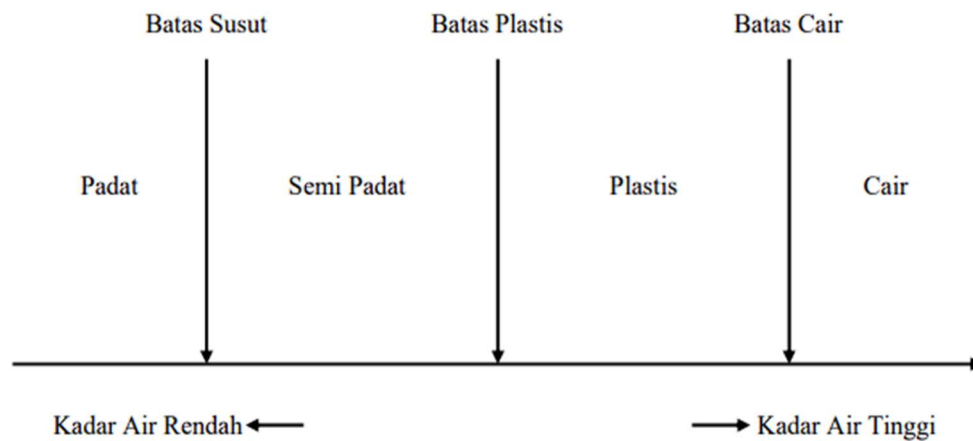
$$PI = LL - PL \quad (5)$$

Konsistensi tanah merujuk pada kemampuan tanah untuk mengubah bentuk fisiknya pada tingkat air tertentu, yang ditentukan oleh gaya tarik antar partikel lempung di dalamnya. Konsistensi ini dapat bervariasi dari keadaan cair hingga padat, tergantung pada kadar airnya. Plastisitas tanah adalah kemampuan tanah untuk mengalami deformasi tanpa mengalami retakan atau kerusakan yang signifikan ketika volume tanah tersebut berubah. Sifat plastisitas ini didasarkan pada keberadaan partikel mineral lempung dalam tanah. Ini merupakan faktor penting yang harus dipahami sebelum melakukan perencanaan dan pembangunan di atas lapisan tanah tersebut (Darwis, 2018).

Tabel 1 Hubungan kuat tekan bebas tanah lempung (q_u) dengan konsistensinya
(Hardiyatmo, 2002)

Konsistensi	Tegangan Max (q_u)(kg/cm ²)
Lempung keras	>4,00
Lempung sangat kaku	2,00 – 4,00
Lempung kaku	1,00 – 2,00
Lempung sedang	0,50 – 1,00
Lempung lunak	0,25 – 0,50
Lempung sangat lunak	<0,25

Kedudukan fisik tanah berbutir halus pada kadar air tertentu disebut konsistensi. Pada tahun 1911, Atterberg mengembangkan metode untuk menggambarkan batas-batas konsistensi tanah berbutir halus dengan mempertimbangkan kadar airnya. Metode ini memperkenalkan tiga batas konsistensi yang dikenal sebagai batas-batas Atterberg. Penentuan batas-batas ini penting dalam karakterisasi konsistensi dan perilaku mekanik tanah berbutir halus dalam rekayasa geoteknik (Darwis, 2018).



Gambar 4 Diagram batas-batas Atterberg (Darwis, 2018)

Sistem klasifikasi tanah pada dasarnya dirancang untuk menyajikan informasi mengenai ciri-ciri dan karakteristik fisik tanah. Dikarenakan variasi dalam sifat dan perilaku tanah yang sangat beragam, sistem klasifikasi secara umum mengelompokkan tanah ke dalam kategori yang memiliki kesamaan dalam sifat fisiknya. Klasifikasi ini juga bermanfaat untuk penelitian yang lebih mendalam tentang kondisi tanah serta untuk menentukan kebutuhan pengujian teknis seperti pemadatan, kekuatan, dan berat isi tanah. Pengklasifikasian tanah dapat dilakukan dengan metode yang sistematis, baik berdasarkan hasil-hasil eksperimen di laboratorium maupun secara visual. Metode deskripsi dan klasifikasi tanah berdasarkan parameter laboratorium hanya dapat dilakukan setelah dilakukan pengujian (Darwis, 2018).

2.3 Metode *Limit equilibrium*

Metode *limit equilibrium* merupakan suatu pendekatan analisis yang berprinsip pada kesetimbangan gaya. Metode ini awalnya mengasumsikan adanya kemungkinan terjadinya bidang kelongsoran. Terdapat dua asumsi yang umumnya digunakan untuk bidang kelongsoran, yaitu bidang berbentuk *circular* dan bidang berbentuk *non-circular* (Sastra dkk., 2011). Metode *limit equilibrium* adalah suatu pendekatan analisis stabilitas tanah yang didasarkan pada prinsip bahwa tanah akan stabil jika tidak ada gaya yang dapat mengganggu keseimbangan tanah tersebut. Proses perhitungan dilakukan dengan membagi-bagi area tanah yang terdapat dalam bidang longsor menjadi irisan (Lestari, 2022).

Metode *limit equilibrium* seringkali diterapkan dalam evaluasi stabilitas dinding lereng dan juga dalam kegiatan pemantauan geoteknik, terutama melalui pengamatan visual. Hasil analisis menggunakan pendekatan ini dapat menjadi pedoman awal dalam mengambil langkah-langkah pencegahan sebelum terjadinya kelongsoran lereng secara nyata (Sastra dkk., 2011). Terdapat beberapa jenis metode irisan analisis kestabilan lereng menggunakan *limit equilibrium* diantaranya:

2.3.1 Metode Fellenius

Metode Fellenius berdasarkan bahwa gaya memiliki sudut kemiringan paralel dengan dasar irisan FK dihitung dengan keseimbangan momen. Fellenius mengemukakan metodenya dengan menyatakan asumsi bahwa keruntuhan terjadi melalui rotasi dari suatu blok tanah pada permukaan longsor berbentuk lingkaran dengan titik tengah sebagai titik pusat rotasi. Diasumsikan juga bahwa resultan gaya-gaya antar irisan pada tiap irisan adalah sama dengan nol, atau dengan kata lain bahwa resultan gaya-gaya antar irisan diabaikan (Pangemanan dkk., 2014).

2.3.2 Metode Bishop yang disederhanakan

Metode Bishop yang disederhanakan merupakan salah satu metode pada longsor busur yang menggunakan prinsip irisan dalam menentukan faktor keamanan dari suatu massa material yang berpotensi longsor. Metode ini memenuhi kesetimbangan gaya pada arah vertikal dan kesetimbangan momen pada titik pusat lingkaran runtuh (Korah dkk., 2014).

2.3.3 Metode Spencer

Metode spencer adalah metode yang digunakan untuk bidang longsor yang sembarang dengan memenuhi kesetimbangan gaya dan momen pada setiap irisan. Metode ini berdasarkan pada asumsi bahwa gaya yang bekerja di bidang irisan adalah parallel sehingga memiliki sudut kemiringan yang sama (Saragih dkk., 2021).

2.3.4 Metode Janbu

Metode janbu mengasumsikan bahwa gaya normal antar irisan diperhitungkan tetapi gaya geser antar irisan diabaikan. Metode Janbu

memenuhi keseimbangan gaya horizontal untuk seluruh massa keruntuhan, serta keseimbangan vertikal dan horizontal untuk setiap irisan (Kristiansyah & Anaperta, 2019).

2.3.5 Metode Morgenstern-Price

Proses analisa metode Morgenstern-Price merupakan hasil dari kesetimbangan setiap gaya-gaya normal dan momen yang bekerja pada tiap irisan dari bidang kelongsoran lereng tersebut baik gaya (Takwin dkk., 2017).

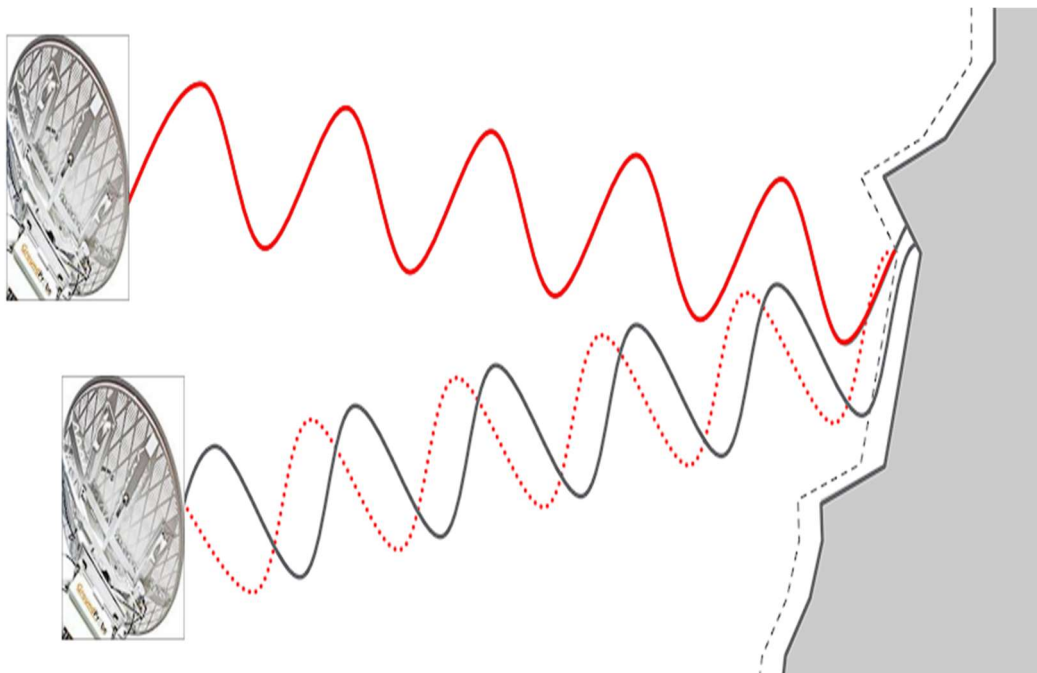
Salah satu aspek penting dari penerapan *limit equilibrium* adalah pemilihan metode analisis yang sesuai. Setiap metode memiliki pendekatan yang berbeda dalam menangani variabel-variabel seperti bentuk lereng, distribusi beban, dan sifat-sifat tanah. Proses analisis *limit equilibrium* dimulai dengan pemodelan geometri lereng dan penentuan beban-beban yang bekerja pada sistem (Yufita dkk., 2024). Metode Morgenstern-Price merupakan salah satu pendekatan lain yang didasarkan pada prinsip keseimbangan batas yang dikembangkan oleh Morgenstern dan Price pada tahun 1965. Pendekatan ini juga menggunakan prinsip keseimbangan gaya untuk menganalisis stabilitas lereng (Iqbal dkk., 2022). Analisis dilakukan dengan mengasumsikan kemungkinan terjadinya bidang kelongsoran dan mengevaluasi gaya-gaya yang beroperasi pada setiap irisan dari bidang kelongsoran (Liong & Herman, 2012).

Analisis *limit equilibrium* sering kali melibatkan penggunaan grafik Mohr-Coulomb untuk memvisualisasikan hubungan antara tegangan geser dan tegangan normal di dalam tanah. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi stabilitas lereng, seperti kondisi hidrologis, aktivitas gempa bumi, dan perubahan beban harus dipertimbangkan dalam analisis menggunakan *limit equilibrium* (Pratiwi dkk., 2022). Model ini memperhitungkan variasi dalam sifat-sifat tanah, seperti kekuatan geser tanah yang berbeda-beda pada berbagai kedalaman dan kondisi tanah. Penggunaan model Mohr-Coulomb dalam analisis stabilitas lereng dapat meningkatkan kemampuan untuk prediksi perilaku keruntuhan dengan lebih akurat dan mengoptimalkan desain lereng batuan guna meningkatkan tingkat keamanan dan stabilitas struktur yang terkait (Hakam dkk., 2010).

2.4 Interferometri

Konsep pemantauan lereng menggunakan *Slope Stability Radar* (SSR) didasarkan pada teknik interferometri radar. Dalam proses ini, SSR melakukan satu *scan* dengan memancarkan gelombang elektromagnetik ke sebuah area pada lereng dan menerima kembali pantulan gelombang tersebut. Setiap pantulan gelombang yang diterima oleh radar memiliki nilai fase gelombang sendiri. SSR kemudian menentukan besarnya dan arah deformasi lereng dengan membandingkan data pengukuran beda sudut fase gelombang antara *scan* terakhir dengan scan sebelumnya. Kumpulan data dari setiap scan dalam sebuah periode pemantauan lereng akan membentuk plot deformasi, yang merupakan nilai akumulasi pergerakan lereng pada setiap *scan* (Indriastuty dkk., 2021).

Data deformasi ini selanjutnya dapat dianalisis lebih lanjut berdasarkan pola *trend* deformasi, *velocity*, *inverse velocity*, dan *velocity ratio*. Dalam konteks pengukuran pergerakan lereng, terdapat hubungan sederhana antara arah pergerakan lereng dan arah yang dapat diukur oleh SSR. Semua sistem radar yang menggunakan interferometri diferensial untuk menghitung deformasi hanya dapat mengukur deformasi dalam arah sinar radar. SSR hanya dapat mengukur pergerakan menuju atau menjauh dari radar, sepanjang garis pandang, dan tidak dapat mengukur pergerakan secara horizontal (Yudono dkk., 2021).



Gambar 5 Ilustrasi konsep interferometri (Indriastuty dkk., 2021)

Semua alat pengukuran garis pandang memiliki potensi untuk mengukur pergerakan yang kurang dari yang sebenarnya terjadi akibat geometri target dan instrumen. Hal ini berlaku untuk semua teknologi pemantauan radar dan laser. Semakin besar perbedaan antara sudut dampak vektor alat pengukuran dan pergerakan dinding, semakin sedikit pergerakan yang akan terdeteksi. Penting untuk diingat bahwa pemahaman tentang batasan pengukuran arah pergerakan oleh SSR merupakan faktor kunci dalam interpretasi data dan analisis hasil pemantauan lereng. Hal ini membantu memastikan bahwa informasi yang diperoleh dari SSR dapat diartikan secara akurat dalam konteks pergerakan lereng yang sebenarnya (Yudono dkk., 2021).

Salah satu keunggulan utama dari teknik interferometri adalah kemampuannya untuk melakukan pemantauan kontinu terhadap pergerakan lereng tanpa perlu kehadiran fisik manusia di lapangan. Data yang diperoleh dapat dikumpulkan secara terus menerus dan dipantau secara *real-time* dari jarak jauh, sehingga memungkinkan deteksi dini potensi longsor dan pengambilan tindakan pencegahan yang tepat waktu. Teknik ini juga menawarkan ketepatan dan ketelitian dalam mendeteksi perubahan-perubahan pada lereng dengan indikasi adanya risiko longsor (Indriastuty dkk., 2021).

Penggunaan teknik interferometri pada SSR juga memberikan kontribusi dalam meningkatkan pemahaman terhadap perilaku lereng dan faktor-faktor yang memengaruhinya. Dengan memantau deformasi dan pergerakan lereng secara terus-menerus, dapat diidentifikasi tren-tren yang konsisten serta potensi perubahan tren yang mungkin terjadi akibat faktor eksternal seperti cuaca atau aktivitas manusia. Hal ini memungkinkan untuk mengambil tindakan pencegahan atau mitigasi yang lebih efektif dalam mengelola risiko bencana tanah longsor (Squarzoni dkk., 2020).

Interferometri memungkinkan pengukuran pergerakan permukaan dengan menggunakan fase sinyal radar dalam minimal dua gambar yang diambil dari posisi orbit yang mirip untuk menghitung perbedaan panjang lintasan pandang dari antenna radar ke permukaan dengan tingkat ketepatan yang tinggi. Fase interferometrik menjadi indikator sensitif terhadap perubahan dalam jarak lintasan miring (Rosen dkk., 2000). Dalam interferometri berulang, fase terjadi karena

berbagai kontribusi yang menentukan perbedaan dalam panjang lintasan propagasi antara dua gambar. Tantangan umum dalam aplikasi interferometri adalah dekorrelasi fase di daerah dengan vegetasi yang padat, terutama di hutan dengan vegetasi yang padat (Gens, 2003). Gelombang radar yang lebih panjang, koherensi di daerah bervegetasi cenderung lebih terjaga. Penggunaan gambar radar untuk mengevaluasi gerakan tergantung pada kecepatan gerakannya (Rott & Nagler, 2006).

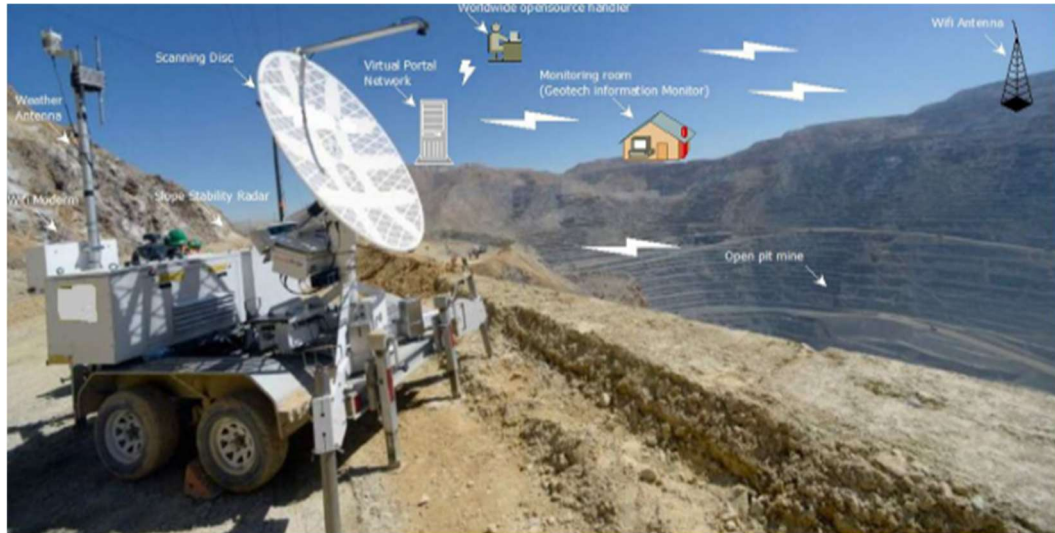
2.5 *Slope Stability Radar*

Slope Stability radar telah menjadi perangkat kritis dalam operasi penambangan terbuka, berfungsi sebagai sistem pemantauan dan survei geoteknik canggih. Khususnya, radar ini telah dirancang untuk beroperasi di lingkungan pertambangan yang keras. Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemampuannya untuk menyediakan survei cuaca dan pengukuran pergerakan lereng secara akurat dan real-time, menggunakan teknologi survei radar stabilitas yang canggih. Pengukuran ini direferensikan secara geografis, memungkinkan integrasi tanpa batas dengan alat pemetaan medan digital standar, serta pelaksanaan stabilitas simultan dan pengukuran survei yang dikombinasikan dengan tautan data eksternal berkecepatan tinggi untuk operasi jarak jauh dengan tingkat keandalan yang tinggi (Indriastuty dkk., 2021).

Memprediksi kelongsoran dan menjaga kestabilan lereng di tambang terbuka memiliki dampak signifikan pada operasional tambang, baik dari segi finansial maupun keselamatan. Dalam konteks ini, *GroundProbe Slope Stability Radar* (SSR) menjadi metode yang sangat efektif. SSR dapat memberikan informasi secara *real-time* mengenai perilaku lereng dengan memproses data yang diperoleh dari proses pengambilan data *scan per scan* oleh SSR yang bergerak dalam 2 dimensi yaitu azimuth dan elevasi (Reeves dkk., 2001).

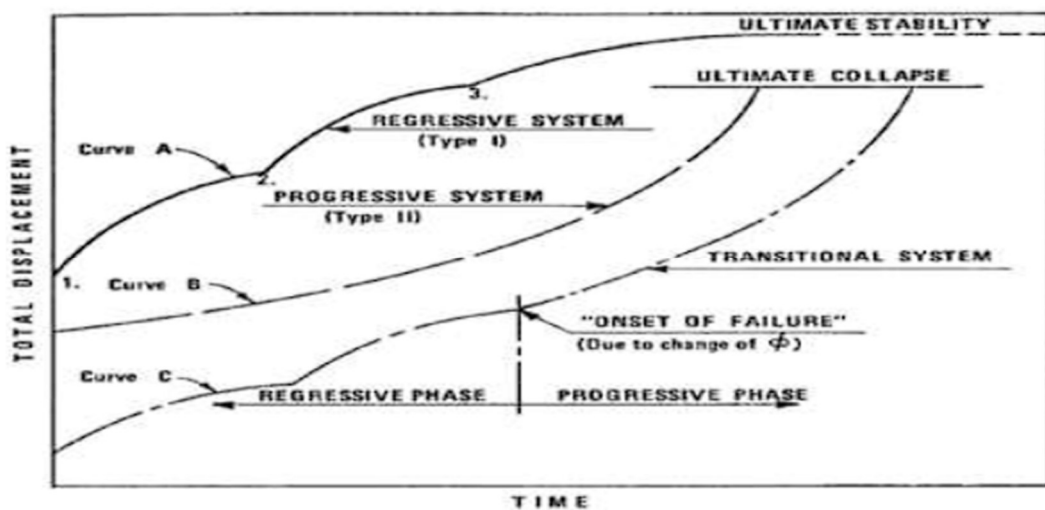
Dalam penerapannya, SSR ditempatkan pada lokasi yang stabil di depan lereng yang akan dipantau, dengan kontrol SSR pada radar yang menerima dan menginterpretasi data. Data tersebut kemudian dikirim ke *Primary Monitoring Point* (PMP) berupa satu komputer khusus untuk kegiatan *monitoring*. Hal ini memungkinkan analisis dan pemantauan deformasi lereng, serta penentuan alarm,

dapat dilakukan di kantor tanpa keharusan berada di lapangan atau *pit* tambang. Untuk pemantauan jarak jauh, *Geotech Engineer* mengontrol PMP menggunakan *remote software* untuk melakukan analisis data (Kumar & Rathee, 2017).



Gambar 6 Ilustrasi cara kerja alat *Slope Stability Radar* (Yudono dkk., 2021)

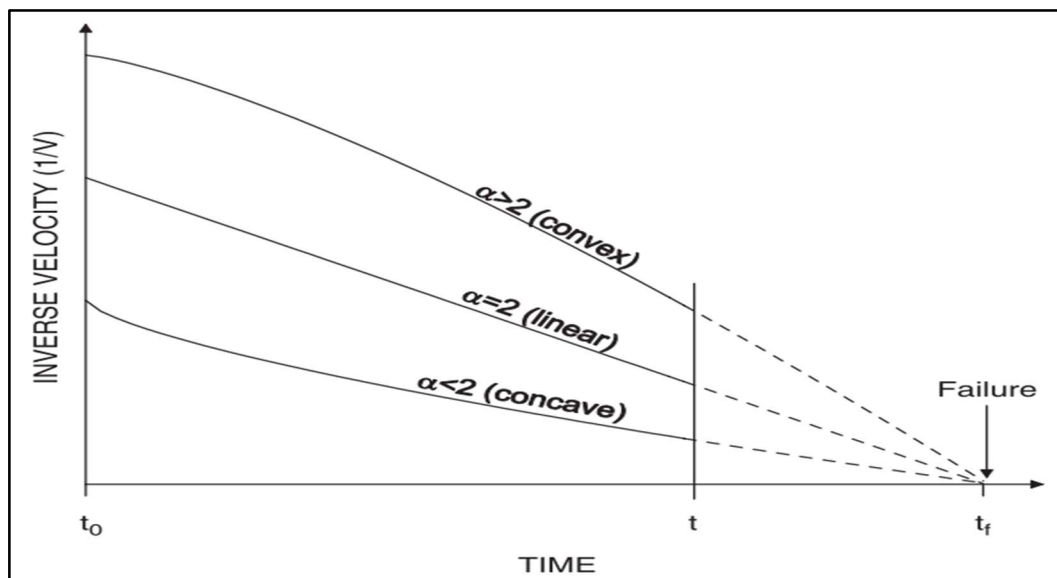
Pola pergerakan lereng yang dapat berubah seiring waktu dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk hujan, struktur geologi, peledakan, dan faktor eksternal lainnya. Oleh karena itu, akuisisi data *Slope Stability Radar* harus cepat dan data harus disampaikan secara *real-time* untuk mencegah pergerakan tak terduga pada lereng atau bangku dinding tanpa disadari. Peralatan ini harus dapat digunakan terus menerus dalam berbagai kondisi, termasuk membaca melalui segala jenis cuaca, siang atau malam, serta mampu memperoleh data yang jelas melalui debu dan asap yang umumnya sering terdapat pada operasi penambangan terbuka. (Harries & Noon, 2006).



Gambar 7 Perilaku deformasi pada lereng (Indriastuty dkk., 2021)

Pola pergerakan lereng dapat diklasifikasikan ke dalam tiga fase, yaitu fase regresif, transisi, dan progresif. Fase transisi, atau dikenal juga sebagai fase linear, ditandai oleh pergerakan lereng dengan kecepatan yang konstan. Di sisi lain, fase progresif dicirikan oleh peningkatan kecepatan pergerakan seiring waktu, dan pada suatu titik tertentu dapat menyebabkan longsor. Kemudian, fase regresif ditandai oleh penurunan kecepatan pergerakan lereng dari waktu ke waktu. Pola perilaku lereng ini dapat dideteksi melalui penggunaan radar, di mana data deformasi lereng kemudian diproses untuk memperkirakan waktu terjadinya longsor dengan menggunakan metode *inverse velocity* (Indriastuty dkk., 2021).

Perilaku lereng dapat terdeteksi menggunakan radar dan data deformasi lereng kemudian diolah untuk prediksi waktu terjadinya longsor dengan memanfaatkan metode *inverse velocity*. Metode ini berdasarkan simulasi tanah longsor yang disebabkan pengaruh hujan dengan karakter perlahan atau pergerakan lereng dengan kecepatan yang lambat. Konsep metode ini melibatkan inversi dari nilai kecepatan terhadap waktu, nilai tersebut cenderung mendekati nol saat lereng mendekati titik longsor dengan peningkatan kecepatan deformasi (Rose & Hungr, 2007).



Gambar 8 Metode prediksi waktu terjadinya longsor menggunakan plot *inverse velocity* (Fukuzono, 1985)

Prediksi waktu longsor sangat bergantung pada identifikasi tren yang konsisten, namun, kemungkinan adanya perubahan tren karena faktor yang dapat diamati atau tidak diketahui harus diperhatikan, dan hasil prediksi mungkin

memerlukan evaluasi ulang seiring dengan penerimaan data terbaru. Prediksi waktu terjadinya longsor dapat dilakukan dengan menggunakan tiga jenis plot, yaitu tren *convex*, *linear*, dan *concave* yang digambarkan dalam konteks persamaan matematis di mana α adalah nilai konstan, t adalah waktu, dan t_f adalah waktu terjadinya longsor. Selanjutnya, garis tren dari nilai *inverse velocity* diproyeksikan ke titik nol, di mana waktu pada titik tersebut menandai prediksi waktu terjadinya longsor (Rose & Hungr, 2007).