

SKRIPSI

**ANALISIS PERBANDINGAN KESTABILAN LERENG JENUH
DAN LERENG TIDAK JENUH YANG DIPENGARUHI
INFILTRASI HUJAN**

Disusun dan diajukan oleh

IRSYAD RIDHO RABANI

D111171015



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS PERBANDINGAN KESTABILAN LERENG JENUH DAN
LERENG TIDAK JENUH YANG DIPENGARUHI INFILTRASI HUJAN**

Disusun dan diajukan oleh

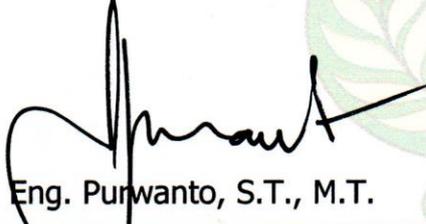
**IRSYAD RIDHO RABANI
D111171015**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 15 Februari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

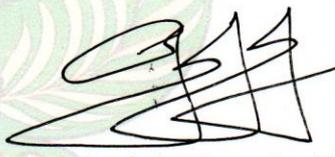
Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


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

NIP. 19711128 2005 1 002


Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T.

NIP. 19951126 202204 3 001

Pt. Ketua Program Studi,



Dr. Amil Ahmad Ilham, S.T., M.IT.

NIP. 19731010 199802 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang Bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Irsyad Ridho Rabani
NIM : D111171015
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis saya berjudul

**Analisis Perbandingan Kestabilan Lereng Jenuh dan Lereng Tidak Jenuh yang
Dipengaruhi Infiltrasi Hujan**

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.

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

Gowa, 15 Februari 2023

Yang Menyatakan



Irsyad Ridho Rabani

ABSTRAK

Analisis stabilitas lereng konvensional yang biasanya dilakukan untuk kondisi jenuh mengabaikan dampak infiltrasi hujan sebagai salah satu faktor utama penyebab ketidakstabilan lereng. Analisis dengan tidak memasukkan pengaruh infiltrasi hujan dikaitkan dengan tuntutan waktu, biaya, dan kerumitan yang tidak praktis untuk dilakukan. Penelitian ini dilakukan untuk melihat efektivitas pendekatan lereng jenuh dengan menganalisis pengaruh perubahan tekanan pori akibat infiltrasi hujan terhadap kestabilan lereng dan dibandingkan dengan hasil analisis kestabilan lereng pada pendekatan lereng jenuh. Analisis dilakukan secara 3D menggunakan metode elemen hingga untuk analisis aliran dan metode kesetimbangan batas Morgenstern-Price (MP) untuk analisis kestabilan lereng. Analisis aliran menunjukkan porositas dan konduktivitas hidrolik batuan sangat mempengaruhi rembesan air dalam lereng dengan terbentuknya zona jenuh sementara di lereng dangkal. Analisis yang dilakukan pada kondisi laju infiltrasi dengan curah hujan konstan menghasilkan kondisi paling kritis terjadi pada durasi hujan 48 dan 72 jam dengan nilai faktor keamanan sebesar 1,02 dengan penurunan sebesar 23% dari kondisi awal. Pendekatan lereng jenuh menghasilkan nilai faktor keamanan paling kritis 0,79. Faktor keamanan yang dihasilkan berbeda 23,31% sedangkan volume longsorannya berbeda hingga 579,35% dengan kondisi paling kritis pada pendekatan tidak jenuh.

Kata Kunci: Tekanan Pori; Faktor Keamanan; Analisis Tiga Dimensi; Analisis Aliran; Morgenstern-Price

ABSTRACT

Conventional slope stability analysis which is usually carried out for saturated conditions ignores the impact of rain infiltration as one of the main factors causing slope instability. Analysis that does not include the effect of rainfall infiltration is associated with time demands, costs, and complexity that is impractical to carry out. This research was conducted to see the effectiveness of the saturated slope approach by analyzing the effect of changes in pore pressure due to rain infiltration on slope stability and comparing it with the results of slope stability analysis on the saturated slope approach. The analysis was carried out in 3D using the finite element method for flow analysis and the Morgenstern-Price Limit equilibrium method for slope stability analysis. Flow analysis shows that the porosity and hydraulic conductivity of the rock greatly affect the water seepage in the slope with the formation of a temporary saturated zone on the shallow slope. The analysis carried out under conditions of infiltration rate with constant rainfall resulted in the most critical conditions occurring at 48 and 72 hours of rain duration with a safety factor value of 1.02 with a decrease of 23% from the initial condition. The saturated slope approach produces the most critical factor of safety of 0.79. The resulting factor of safety differs by 23.31% while the volume of failure differs up to 579.35% with the most critical condition in the unsaturated approach.

Keywords: Pore Pressure; Factor of Safety; Three Dimensional Analysis; Flow Analysis; Morgenstern-Price

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Maha besar Allah *Subhanahu wa ta'ala* atas segala rahmat dan karunia-Nya yang karena keridhoan-Nya, Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Salawat dan salam kepada Nabi Muhammad *Shallallahu 'Alaihi Wasallam* sebagai manusia pilihan yang diutus untuk menyebarkan syiar kebenaran-Nya.

Tugas akhir ini berjudul "Analisis Perbandingan Kestabilan Lereng Jenuh dan Lereng Tidak Jenuh yang Dipengaruhi Infiltrasi Hujan". Keberagaman pendekatan untuk menganalisis kestabilan lereng yang dipengaruhi hujan memberikan ketertarikan kepada penyusun untuk melihat bagaimana pendekatan-pendekatan ini bekerja. Pengetahuan terhadap berbagai keberagaman pendekatan ini akan mengantarkan kita untuk mampu menilai secara komprehensif kelebihan dan kekurangan pendekatan yang akan dipilih, yang dengan demikian meningkatkan kepercayaan terhadap keputusan yang akan diambil.

Tugas Akhir ini mampu terselesaikan atas kebaikan bantuan pihak-pihak yang telah terlibat. Melalui Skripsi ini, dengan penuh kebanggaan penulis ucapkan terima kasih atas semua pihak yang telah terlibat. Secara khusus, terima kasih kepada PT Kutai Energi yang diwakilkan Bapak Rangga Widiyanto sebagai *Geotechnical Engineer* PT Kutai Energi dan Bapak Andi Sahar, S.T., sebagai *Pit Control Engineer* PT Kutai Energi, yang telah memberikan kesempatan juga bimbingan bagi penulis untuk melaksanakan penelitian di lokasi operasionalnya. Terima kasih kepada Bapak Dr.Eng. Purwanto, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang dengan sabar dan secara profesional telah memberikan bimbingan, memfasilitasi, dan memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih kepada Bapak Asta Arjunoarwan Hatta, S.T., M.T. sebagai dosen pembimbing kedua yang atas bimbingannya telah menyempurnakan tugas akhir ini. Terima kasih kepada Ibu Dr.Eng Rini Nofrianti Surtardjo Tui, S.T., M.T., dan Bapak

Dr.Eng Ir. Muhammad Ramli, M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan perbaikan tugas akhir ini. Terima kasih kepada seluruh Dosen dan staff administrasi Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah melaksanakan tugasnya dengan tulus dan baik.

Terima kasih kepada Anggota PERMATA FT-UH yang telah memberikan bantuan kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini. Terima kasih kepada Irlansyah Mulia Putra yang dengan setia membersamai penulis selama penelitian ini. Terima kasih kepada Ibnu Syauqi Ramadhan sebagai ketua angkatan "CONTINUITY", Ryan Pratama, Moh. Sigit, Wihdah, Andi Yuzril Ihza Mahendra, Rahmat Sira, Andi Fachrul, Muhram Sula Idris, Pawelli Taufan, Deni Alfianto, serta semua teman-teman "CONTINUITY" (Teknik Pertambangan Angkatan 2017) yang telah memberikan bantuan dan saran kepada penulis selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih kepada Isyraq Nazihah Rabani sebagai kakak penulis yang senantiasa memberikan bantuan finansial kepada penulis. Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada orang tua penulis, Ibu Nurcayang Lamala, S.pd., dan Bapak Sahrin Rabani, S.Ag., yang dengan sabar dan tulus senantiasa mendoakan, memotivasi, serta mendukung penulis dalam setiap kondisi.

Tugas Akhir ini telah disusun sebaik mungkin dengan harapan mampu memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya. Namun, dengan segala keterbatasan ikhtiar dalam penyusunan tugas akhir ini, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk dapat memperbaiki dan meningkatkan mutu dari tugas akhir ini, penyusun, dan pembacanya. Semoga tugas akhir ini dapat berguna bagi pengembangan penelitian mahasiswa kedepannya.

Gowa, 15 Februari 2023
Penyusun,

Irsyad Ridho Rabani

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK.....	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Lokasi Penelitian	5
1.6 Tahapan Penelitian	6
BAB II KESTABILAN LERENG DAN TEKANAN AIR PORI	9
2.1 Prinsip Dasar Analisis Kestabilan Lereng	9
2.2 Analisis Kestabilan Lereng.....	10
2.3 Sifat Fisik Batuan	20
2.4 Sifat Mekanis Batuan.....	22

2.5	Air Tanah.....	26
2.6	Tekanan Air Pori	31
2.7	Infiltrasi	36
2.8	Metode Elemen Hingga dalam Rembesan	37
BAB III	METODE PENELITIAN.....	39
3.1	Studi Literatur	39
3.2	Pengumpulan Data.....	39
3.3	Pengolahan dan Analisis Data.....	42
BAB IV	INFILTRASI HUJAN DALAM ANALISIS KESTABILAN LERENG.....	46
4.1	Kondisi Lereng.....	46
4.2	Analisis Kondisi Air Tanah	48
4.3	Analisis Kestabilan Lereng.....	55
4.4	Perbandingan Hasil Analisis.....	61
BAB V	PENUTUP	69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	69
	DAFTAR PUSTAKA	71
	LAMPIRAN	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Peta lokasi PT Kutai Energi.....	6
2.1 Faktor keamanan sederhana (Arif, 2016).....	10
2.2 Gaya yang bekerja pada potongan bidang gelincir dalam metode irisan (Read <i>and</i> Stacey, 2009).....	11
2.3 (a) Fungsi gaya antar irisan setengah sinus (b) hubungan faktor keamanan dan λ (Krahn, 2003).....	14
2.4 Gaya yang bekerja pada kolom 3D individual sesuai metode kesetimbangan batas kolom irisan (Cheng <i>and</i> Yip, 2007).....	17
2.5 Ilustrasi kondisi batuan; (a) Kondisi batuan alami; (b) Kondisi batuan jenuh; (c) Kondisi batuan kering.....	21
2.6 Kurva tegangan-perpindahan geser (Rai dkk., 2014).....	24
2.7 Ilustrasi hukum Darcy untuk definisi konduktivitas hidraulik (Wyllie <i>and</i> Mah, 2004).....	28
2.8 Konduktivitas hidraulik dari beberapa material geologi (Atkinson, 2000).....	30
2.9 Perhitungan tekanan air pori dari permukaan freatik (Abramson <i>et al.</i> , 1996)...	33
2.10 Permukaan freatik dan kurva garis ekuipotensial (Abramson <i>et al.</i> , 1996).....	33
2.11 Perhitungan <i>pore water pressure head</i> untuk permukaan piezometer yang dispesifikkan (Abramson <i>et al.</i> , 1996).....	35
3.1 Posisi muka air tanah pada kondisi awal lereng.....	41
3.2 Bagan alir penelitian.....	45
4.1 Ketampakan Pit HCV PT Kutai Energi.....	46
4.2 Model 3D lereng <i>low wall pit</i> HCV PT Kutai Energi dalam perangkat lunak Rocscience Slide3.....	47

4.3	Penampang dua dimensi litologi penyusun lereng <i>low wall pit</i> HCV PT Kutai Energi.....	48
4.4	Distribusi tekanan air pori untuk kondisi awal lereng.....	49
4.5	Hasil analisis kondisi air tanah akibat infiltrasi hujan selama 72 jam	50
4.6	Kondisi tekanan air pori pada lereng setelah infiltrasi hujan selama 2 jam.....	51
4.7	Kondisi tekanan pori pada lereng akibat infiltrasi hujan selama 10 jam	52
4.8	Kondisi tekanan pori pada lereng akibat infiltrasi air hujan selama 72 jam.....	54
4.9	Kondisi tekanan pori pada lereng dengan kondisi jenuh	54
4.10	Hasil analisis faktor keamanan menggunakan metode MP dengan kondisi lereng kering	55
4.11	Peta zonasi kondisi faktor keamanan lereng dengan kondisi lereng kering.....	56
4.12	Nilai faktor keamanan menggunakan metode MP dengan kondisi awal lereng ..	57
4.13	Peta zonasi kondisi faktor keamanan lereng dengan kondisi awal.....	58
4.14	Hasil analisis kestabilan lereng pada kondisi lereng jenuh.....	58
4.15	Peta zonasi kondisi faktor keamanan lereng dengan kondisi lereng jenuh	59
4.16	Hasil analisis faktor keamanan menggunakan metode MP pada kondisi akibat infiltrasi hujan selama 48 jam.....	61
4.17	Grafik faktor keamanan dan volume longsoran semua kondisi	62
4.18	Grafik Hubungan antara luas area permukaan dan elevasi terendah bidang gelincir potensial dengan perubahan kondisi lereng	63
4.19	Grafik perbandingan faktor keamanan hasil analisis kestabilan lereng pada kondisi kering, kondisi awal, kondisi dengan pengaruh infiltrasi, dan kondisi jenuh.....	66
4.20	Diagram akumulasi hasil faktor keamanan lereng keseluruhan <i>low wall pit</i> HCV PT Kutai Energi.....	68

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Persamaan dan Ketidaktahuan yang terkait dengan metode irisan (Read <i>and</i> Stacey, 2009).	12
2.2 Kondisi kesetimbangan statik yang sering digunakan dalam metode irisan (Krahn, 2002).....	12
3.1 Parameter hidraulik yang digunakan dalam analisis	41
4.1 Hasil analisis kestabilan lereng dengan pengaruh infiltrasi hujan	60

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A. Kontur Daerah Penelitian	76
B. Litologi Material Penyusun Lereng	77
C. Data Sifat Fisik dan Mekanik Material	78
D. Hasil Analisis Aliran Air Tanah.....	81
E. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Semua Kondisi.....	86
F. Peta Zonasi Faktor Keamanan Lereng	103
G. Kartu Konsultasi Tugas Akhir	112

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses perumusan desain lereng dalam keperluan penambangan terus dikembangkan seiring berjalannya waktu. Beberapa metodologi analisis bervariasi antar praktisi, namun proses dasar untuk desain lereng tambang terbuka secara umum adalah sama, terlepas dari ukuran atau bahannya. Model geoteknik merupakan dasar fundamental untuk semua desain lereng dan disusun dari beberapa komponen yang salah satunya merupakan model hidrogeologi. Kehadiran model hidrogeologi untuk mempertimbangkan kehadiran air dalam tanah dan batuan di kerak bumi yang salah satu penyebabnya adalah infiltrasi hujan (Read *and* Stacey, 2009).

Infiltrasi hujan merupakan salah satu faktor utama penyebab ketidakstabilan lereng. Banyak studi teknik telah menunjukkan bahwa ketidakstabilan lereng biasanya terjadi selama musim hujan (Raj *and* Sengupta, 2014; Terajima *et al.*, 2014). Infiltrasi pada kondisi curah hujan intensitas tinggi akan menyebabkan pembentukan zona jenuh transien di atas permukaan air tanah dan tekanan air pori transien akan naik pada wilayah yang relevan. Peningkatan kadar air menyebabkan penurunan kekuatan hisap (*matrix suction*), pembentukan zona jenuh transien, peningkatan tekanan air pori transien, dan penurunan kekuatan geser batuan yang akan menurunkan stabilitas lereng (Liu *et al.*, 2012).

Rembesan dan variasi muka air tanah sangat berpengaruh terhadap kestabilan lereng (Liu *et al.*, 2012). Efek pelemahan yang diakibatkan oleh interaksi air dan batuan akan sangat mempengaruhi kestabilan suatu lereng batuan (Pan *et al.*, 2020). Air menjadi faktor penting yang mempengaruhi perilaku mekanis massa batuan dan menjadi

penyebab atas banyaknya bahaya rekayasa batuan (Wang *et al.*, 2014). Tekanan air pori mengurangi tegangan efektif, sehingga menyebabkan penurunan kekuatan batuan (Li *et al.*, 2012).

Desain lereng harus menilai sensitivitas faktor keamanan terhadap kuantitas tekanan air tanah yang muncul, khususnya efek tekanan transien karena pengisian ulang yang cepat (Li *et al.*, 2012). Dua metode umum untuk menentukan distribusi tekanan air pori di dalam lereng. Metode yang paling teliti adalah dengan melakukan analisis aliran lengkap dan menggunakan tekanan pori yang dihasilkan dalam analisis stabilitas. Metode yang kurang teliti tetapi lebih sering digunakan adalah dengan menentukan permukaan freatik atau *piezometric* (Wyllie and Mah, 2004).

Analisis kestabilan lereng secara umum dilakukan hanya mengasumsikan lereng dalam keadaan jenuh untuk mendapatkan nilai kestabilan paling kritis. Keadaan ini mengasumsikan kenaikan muka air tanah ke kondisi yang dianggap paling kritis untuk mempertimbangkan pengaruh tekanan air pori akibat curah hujan atau air tanah. Dalam asumsi ini, kondisi rembesan air tidak diperhitungkan (Gofar and Rahardjo, 2017).

Analisis dengan tidak memasukkan pengaruh rembesan air dikaitkan dengan alasan pengukuran parameter yang diperlukan untuk analisis stabilitas lereng tidak jenuh memerlukan waktu yang lama, menuntut secara teknis dan mahal (Zhang and Fredlund, 2015). Alasan lain adalah analisis stabilitas lereng tidak jenuh melibatkan lebih banyak kerumitan dan membutuhkan lebih banyak keahlian daripada analisis stabilitas lereng kering atau jenuh (Vahedifard *et al.*, 2016). Para insinyur menemukan bahwa tidak praktis dan berisiko untuk melakukan analisis yang begitu ketat dan memerlukan waktu yang lama. Atas pertimbangan ini, analisis stabilitas lereng konvensional biasanya dilakukan untuk kondisi jenuh (Gofar and Rahardjo, 2017). PT Kutai Energi merupakan salah satu perusahaan penambangan batubara yang menggunakan pendekatan ini dalam analisis stabilitas lereng.

Rembesan air yang tidak diperhitungkan berarti mengabaikan potensi adanya tekanan air pori transien akibat terbentuknya zona jenuh transien. Hal ini tentu dapat memberikan hasil analisis stabilitas yang tidak komprehensif mengingat rembesan air turut mempengaruhi kestabilan. Selaras dengan hal ini, Terzaghi (1967) mengatakan bahwa di antara banyak faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng, rembesan air tanah adalah salah satu faktor utama penyebab ketidakstabilan lereng. Banyak referensi dalam literatur yang menggambarkan keruntuhan lereng atau longsor akibat rembesan air.

Desain lereng yang dihasilkan terlepas dari kecenderungan yang umum dilakukan dalam analisis tidak hanya harus baik secara teknis, tetapi juga harus memperhatikan konteks yang lebih luas dari operasi penambangan secara keseluruhan (Read *and* Stacey, 2009). Zeng *et al.* (2017) mengatakan bahwa tindakan konservatif yang dilakukan para insiyur geoteknik biasanya menghasilkan pemborosan ekonomi yang besar. Perlu untuk memahami proses keruntuhan lereng akibat curah hujan dan menemukan metode mitigasi yang hemat biaya.

Oleh karena itu, Analisis harus dilakukan untuk kondisi tekanan air pori akibat rembesan air tanah yang terjadi saat hujan terinfiltrasi pada lereng tidak jenuh untuk melihat perubahan nilai stabilitas lereng yang terjadi. Hasil analisis dalam penelitian ini akan menunjukkan pendekatan yang dapat memprediksi kondisi kestabilan lereng yang paling kritis. Perbandingan perbedaan hasil analisis kestabilan lereng dari dua pendekatan ini dapat menunjukkan metode yang relevan untuk merepresentasikan kondisi kestabilan lereng yang ada.

1.2 Rumusan Masalah

Pendekatan lereng jenuh sebagai analisis stabilitas lereng konvensional menjadi pendekatan yang sangat sering digunakan. Pendekatan ini mengabaikan adanya rembesan air tanah akibat infiltrasi hujan yang dapat membentuk zona jenuh transien di

permukaan lereng dan menyebabkan keruntuhan dangkal. Pendekatan lereng jenuh yang diunggulkan secara teknis biasanya menghasilkan pemborosan ekonomi yang besar jika mempertimbangkan konteks yang lebih luas dari operasi penambangan secara keseluruhan. Pendekatan lereng tidak jenuh (pendekatan *hybrid* dalam Read *and* Stacey, 2009) sebagai metode lain dinilai dapat memberikan hasil paling teliti. Pendekatan ini melakukan analisis aliran dan menggunakan tekanan pori yang dihasilkan dalam analisis stabilitas. Untuk melihat efektivitas pendekatan lereng jenuh, dilakukan perbandingan terhadap hasil dari pendekatan lereng tidak jenuh.

Penelitian yang akan dilakukan membahas analisis kestabilan lereng menggunakan pendekatan konsep lereng tidak jenuh dengan memasukkan pengaruh infiltrasi hujan, yang kemudian akan dibandingkan dengan pendekatan lereng jenuh untuk melihat perbedaan hasil analisis kestabilan lereng yang dihasilkan. Pendekatan lereng tidak jenuh akan difokuskan mengenai pengaruh rembesan air dan perubahan tekanan air pori akibat infiltrasi hujan terhadap kestabilan lereng. Rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. bagaimana pengaruh perubahan tekanan air pori akibat infiltrasi hujan terhadap kestabilan lereng dengan pendekatan lereng tidak jenuh; dan
2. bagaimana analisis kestabilan lereng yang dihasilkan pada pendekatan lereng tidak jenuh terhadap pendekatan lereng jenuh.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. menganalisis pengaruh perubahan tekanan air pori akibat infiltrasi hujan terhadap kestabilan lereng dengan pendekatan lereng tidak jenuh; dan
2. menganalisis dan membandingkan hasil analisis kestabilan lereng dari

pendekatan lereng tidak jenuh dengan pendekatan lereng jenuh.

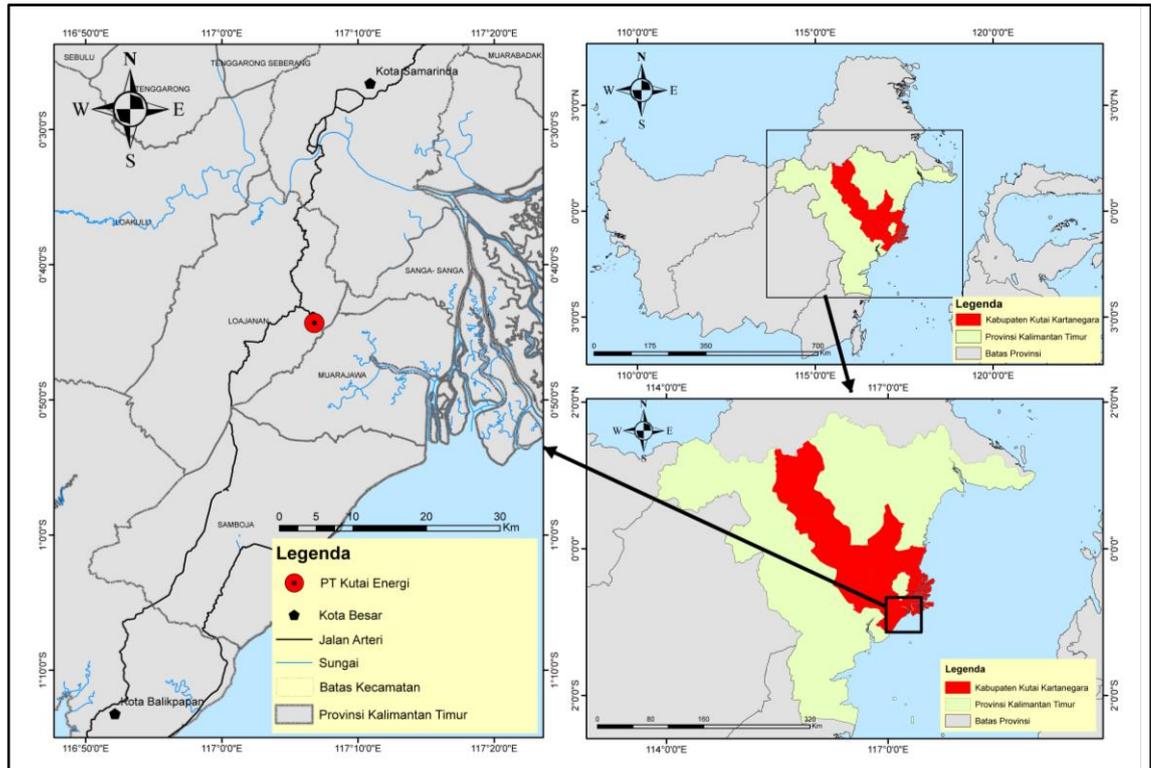
1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini berupa hasil analisis kestabilan lereng dari dua pendekatan yang berbeda dalam menggambarkan kondisi lereng. Hasil dari penelitian dapat menjadi referensi bagi perusahaan dan pembaca lainnya untuk mengevaluasi metode analisis kestabilan lereng yang digunakan, sehingga mampu memberikan pilihan pendekatan yang paling sesuai untuk hasil yang lebih akurat. Keakuratan hasil yang didapatkan memberikan pilihan yang efisien untuk upaya-upaya pengelolaan dan mitigasi terhadap lereng penambangan.

1.5 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di salah satu perusahaan tambang batubara yang tercakup dalam Wilayah Izin Usaha Pertambangan (WIUP) operasi produksi batubara PT Kutai Energi. WIUP operasi produksi PT Kutai Energi secara astronomis terletak pada posisi $117^{\circ}6'15,1''$ BT – $117^{\circ}9'49''$ BT dan $0^{\circ}43'30''$ LS – $0^{\circ}46'59,9''$ LS atau berdasarkan proyeksi UTM *East* 9919865,54 m – 9913421,40 m dan *North* 511593,93 m – 518202,92 m yang termasuk dalam zona UTM 50S. Secara administratif, WIUP operasi produksi PT Kutai Energi terletak di Desa Tani Harapan, Kecamatan Muara Jawa, Kabupaten Kutai Kartanegara, Provinsi Kalimantan Timur. Lokasi ini berjarak \pm 90 km dari pusat Kota Balikpapan, Provinsi Kalimantan Timur.

Wilayah operasional penambangan PT Kutai Energi terbagi atas beberapa *pit* penambangan yang secara keseluruhan masih aktif beroperasi. *Pit High Caloric Value* (HCV) merupakan salah satu *pit* dalam WIUP operasi produksi PT Kutai Energi yang menjadi fokus daerah pada penelitian ini. Lokasi WIUP operasi produksi PT Kutai Energi dapat dilihat melalui Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Peta lokasi WIUP operasi produksi PT Kutai Energi

1.6 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahap, antara lain:

1. Tahap Persiapan

Tahap persiapan dilakukan untuk memperoleh informasi lebih detail mengenai topik penelitian yang akan dilakukan. Tahap persiapan meliputi kegiatan berikut.

a. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari dan mengkaji referensi yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Referensi yang dibutuhkan untuk penelitian ini mengenai prosedur analisis aliran air tanah dengan perubahannya akibat infiltrasi hujan dan analisis kestabilan lereng dengan pengaruh air tanah, khususnya air tanah yang membentuk zona jenuh transien. Referensi yang digunakan bersumber dari buku teks, buku digital, jurnal penelitian, dan artikel ilmiah, serta informasi terkait dari internet.

b. Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Perumusan masalah dilakukan setelah dilakukan kajian literatur dari berbagai sumber mengenai metode analisis kestabilan lereng dengan pendekatan jenuh dan tidak jenuh yang dikaitkan dengan studi kasus dari lokasi penelitian.

2. Tahap Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini berasal dari PT Kutai Energi dan data-data pendukung dari literatur dengan topik yang serupa.

3. Tahap Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data terbagi menjadi penentuan masukan parameter material dan pembuatan model tiga dimensi yang akan digunakan dalam penelitian. Tahapan selanjutnya adalah penentuan perubahan distribusi tekanan pori melalui analisis aliran air tanah menggunakan perangkat lunak *Rocscience* RS3. Tahapan terakhir adalah analisis kestabilan lereng menggunakan perangkat lunak *Rocscience* Slide3 berdasarkan parameter material, model tiga dimensi, dan hasil distribusi tekanan pori.

4. Tahap Analisis Data

Tahapan analisis data merupakan kajian mendalam terhadap hasil yang didapatkan. Tahapan ini berisi analisis mengenai perubahan dan distribusi tekanan air pori akibat infiltrasi hujan untuk semua kondisi. Selanjutnya analisis dilakukan untuk melihat pengaruh dari perubahan kondisi air dalam lereng terhadap kestabilan lereng. Hasil analisis dari setiap kondisi akan dilakukan perbandingan.

5. Tahap Penyusunan Laporan

Tahap penyusunan laporan merupakan tahap akhir dari kegiatan penelitian. Data-data yang telah diperoleh dan dianalisis kemudian disajikan dalam laporan.

Pada bagian akhir laporan ditarik kesimpulan dari masalah-masalah yang telah dirumuskan sebelumnya berdasarkan hasil dari pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan. Laporan disusun berdasarkan format yang telah ditentukan oleh Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

6. Seminar dan Penyerahan Laporan Tugas Akhir

Laporan tugas akhir yang telah disusun kemudian dipresentasikan di hadapan pembimbing dan tim penguji dalam Seminar Hasil Penelitian Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Selanjutnya hasil penelitian dipresentasikan dalam Ujian Sidang Sarjana Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Laporan akhir yang telah dipresentasikan dalam seminar hasil dan ujian sidang sarjana diserahkan ke Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

BAB II

KESTABILAN LERENG DAN TEKANAN AIR PORI

2.1 Prinsip Dasar Analisis Kestabilan Lereng

Analisis kestabilan lereng dilakukan untuk menilai tingkat kestabilan suatu lereng. Istilah kestabilan lereng dapat didefinisikan sebagai ketahanan blok diatas suatu permukaan miring (diukur dari garis horizontal) terhadap runtuh dan gelinciran (Kliche, 1999). Pada lereng akan timbul suatu gaya penggerak akibat adanya gravitasi dan cenderung membuat blok di atas permukaan miring tersebut bergerak menuruni lereng. Jika gaya penggerak tersebut sangat besar dan kekuatan geser dari material penyusun lereng relatif kecil maka longsoran dapat terjadi (Terzaghi and peck, 1967). Untuk menyatakan tingkat kestabilan suatu lereng, dikenal istilah Faktor Keamanan (FK). Faktor keamanan diperlukan untuk mengetahui kemantapan suatu lereng (Arif, 2016).

Gaya yang bekerja pada suatu lereng yang dapat dilihat melalui Gambar 2.1 adalah gaya berat, kemudian dihasilkan gaya penggerak dan gaya penahan. Untuk menjaga agar benda di atas lereng tidak jatuh (*failure*), diperlukan perhitungan terhadap kemiringan sesuai dengan FK yang diinginkan. Faktor keamanan dapat dirumuskan sebagai berikut (Arif, 2016):

$$FK = \frac{\text{Kekuatan Geser}}{\text{Gaya Penggerak}} = \frac{F^*/A}{F/A} = \frac{\tau^*}{\tau} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana, τ adalah kekuatan geser, c adalah kohesi, σ_n adalah tegangan normal, dan ϕ adalah sudut gesek dalam. Dengan perhitungan lebih rinci didapatkan persamaan faktor keamanan sebagai berikut (Arif, 2016).

$$FK = \frac{c.A + \sigma_n .A.tan\phi}{W \sin \phi_f} = \frac{c.A + W \cos \phi_f .tan\phi}{W \sin \phi_f} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

W = Berat irisan

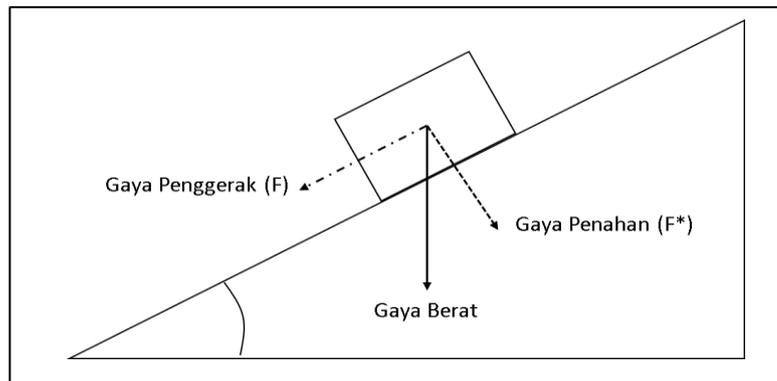
φ_f = Kemiringan bidang longsoran

Stabilitas lereng ditunjukkan dengan nilai Faktor Keamanan (FK). Adapun nilai-nilai FK untuk menilai kestabilan suatu lereng menurut Joseph E. Bowles (1984) sebagai berikut:

$FK < 1,07$: Keruntuhan biasa terjadi (labil)

$1,07 < FK < 1,25$: Keruntuhan pernah terjadi (kritis)

$FK \geq 1,25$: Keruntuhan jarang terjadi (stabil)



Gambar 2.1 Faktor keamanan sederhana (Arif, 2016)

2.2 Analisis Kestabilan Lereng

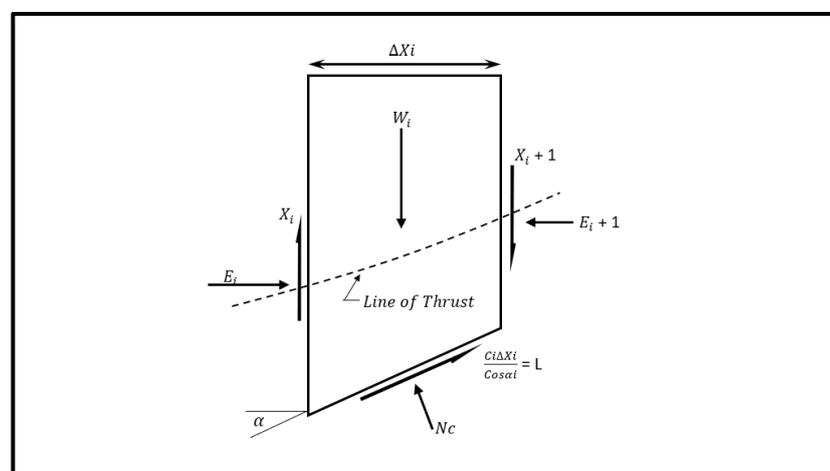
Metode yang dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng sangat beragam. Penggunaan metode ini tergantung pada data yang tersedia, program komputer, tingkat ketelitian perhitungan yang diperlukan, dan keluaran (*output*) yang diperlukan. Semakin teliti data yang digunakan untuk perhitungan kestabilan lereng, hasil yang diperoleh akan semakin mendekati kenyataan sebenarnya. Hal lain yang perlu diperhatikan juga ialah kemampuan dari ahli geoteknik (Arif, 2016).

2.2.1 Metode Keseimbangan Batas

Metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*) merupakan metode yang

sangat populer untuk digunakan dalam menganalisis kestabilan lereng tipe gelinciran dan rotasional. Metode ini relatif sederhana dan mudah digunakan, serta telah terbukti kehandalannya dalam praktik rekayasa selama bertahun-tahun (Arif, 2016). Metode kesetimbangan batas menggunakan geometri representatif, kekuatan geser material dan/atau hubungan bidang lemah, berat unit material, air tanah, dan kondisi pembebanan/dukungan eksternal untuk menentukan faktor keamanan lereng berdasarkan serangkaian asumsi mekanis penyederhanaan (Read *and* Stacey, 2009).

Solusi untuk kondisi kesetimbangan batas biasanya didasarkan pada metode irisan 2D, yang membagi tubuh menjadi beberapa irisan (n) di atas permukaan bidang gelincir. Permukaan ini sering diasumsikan melingkar, tetapi dapat mengambil bentuk apapun karena metode irisan dapat dengan mudah mengakomodasi kemiringan kompleks dan geometri potensial permukaan kegagalan, kondisi massa batuan yang bervariasi, dan beban batas eksternal. Namun, dalam penggunaan asumsi ini, keadaan statis tidak tentu karena solusinya memiliki lebih banyak kondisi yang tidak diketahui daripada persamaan. Gaya-gaya yang bekerja pada irisan individu dalam metode irisan diilustrasikan pada Gambar 2.2 (Read *and* Stacey, 2009).



Gambar 2.2 Gaya yang bekerja pada potongan bidang gelincir dalam metode irisan (Read *and* Stacey, 2009)

Persamaan terkait dan tidak diketahui diringkas dalam Tabel 2.1. Metode analisis

yang paling banyak dikenal berdasarkan metode irisan dan kondisi kesetimbangan statis yang dipenuhi oleh masing-masing irisan dirangkum dalam Tabel 2.2. Rincian tambahan dari metode ini dan metode lainnya dapat diperoleh dari sejumlah sumber yang berbeda, deskripsi dan contoh yang komprehensif dapat dilihat pada Abramson *et al.* (1996) (Duncan *and* Wright, 2005).

Tabel 2.1 Persamaan dan Ketidaktahuan yang terkait dengan metode irisan (Read *and* Stacey, 2009).

Persamaan	Kondisi	Total Persamaan
n	Kesetimbangan Momen Irisan ($\sum M = 0$)	
2n	Kesetimbangan Horizontal dan Vertikal Irisan ($\sum Fh = 0$ & $\sum Fv = 0$)	4n
n	Persamaan Mohr-Coulomb	
Tidak diketahui	Variabel	
1	Faktor Keamanan	
n	Gaya Normal, N	
n	Posisi N pada bidang gelincir	
n	Gaya Geser, T	6n-2
n-1	Gaya irisan horizontal, E_i dan $E_i + 1$	
n-1	Gaya irisan Vertikal, X_i dan $X_i + 1$	
n-1	Garis Dorongan, Posisi dari E_i , $E_i + 1$	

Tabel 2.2 Kondisi kesetimbangan statik yang sering digunakan dalam metode irisan (Krahn, 2002)

Metode	Gaya Normal antar irisan (E)	Gaya Geser antar irisan (X)	Kesetimbangan		Kemiringan Resultan X/E
			Momen	Gaya Horizontal	
Fellenius OMS	Tidak	Tidak	Ya	Tidak	Tidak ada
Bishop yang disederhanakan	Ya	Tidak	Ya	Tidak	Horizontal
Janbu yang disederhanakan	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Horizontal
US Corps of Engineers	Ya	Ya	Tidak	Ya	kemiringan permukaan Irisan
Lowe & Karafiath	Ya	Ya	Tidak	Ya	Rata-rata kemiringan

Metode	Gaya Normal antar irisan (E)	Gaya Geser antar irisan (X)	Keseimbangan		Kemiringan Resultan X/E permukaan dan dasar irisan
			Momen	Gaya Horizontal	
Morgenstern-Price	Ya	Ya	Ya	Ya	Berfariasi
Spencer	Ya	Ya	Ya	Ya	Konstan

Metode irisan biasa atau *original methods of slice* (OMS) mengabaikan semua gaya antar irisan dan tidak memenuhi keseimbangan gaya untuk massa geser atau irisan individu. Metode Bishop yang disederhanakan dan metode Janbu yang disederhanakan juga hanya solusi keseimbangan parsial. Keduanya mengasumsikan nol gaya antar irisan, mengurangi jumlah yang tidak diketahui menjadi $(4n-1)$, meninggalkan solusi yang terlalu deterministik. Bishop meninggalkan keseimbangan gaya horizontal yang tidak terpenuhi untuk satu irisan dan Janbu tidak sepenuhnya memenuhi keseimbangan momen; Janbu menyajikan faktor koreksi, f_0 , untuk menjelaskan kekurangan ini. Bishop dan Janbu juga menguraikan metode yang lebih rinci yang memungkinkan untuk memenuhi keseimbangan dengan lebih baik. Metode-metode tersebut juga menunjukkan bahwa posisi garis dorong adalah tambahan yang tidak diketahui. Dalam analisis selanjutnya, keseimbangan dikatakan terpenuhi secara akurat jika asumsi memilih garis dorong yang benar (Read and Stacey, 2009).

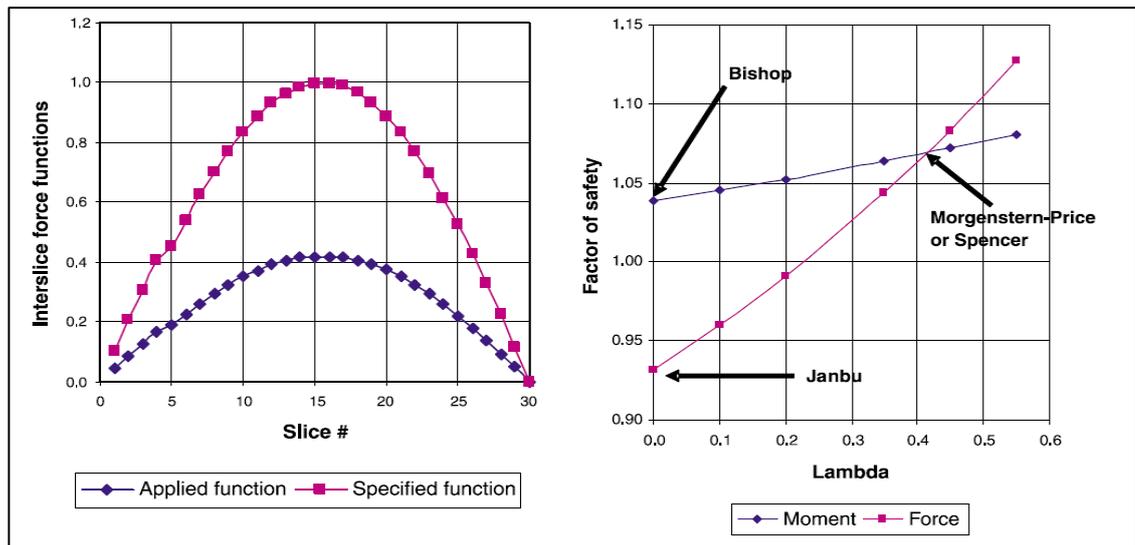
Metode Morgenstern-Price, Spencer, dan Sarma semuanya memenuhi keseimbangan gaya dan momen. Metode solusi irisan yang sepenuhnya memenuhi keseimbangan telah terbukti memberikan nilai yang sama untuk faktor keamanan. Dalam kasus stabilitas lereng batuan keras, teknik solusi yang sering digunakan adalah teknik Spencer, Morgenstern-Price, dan Janbu, karena dapat memodelkan permukaan keruntuhan yang tidak beraturan (Read and Stacey, 2009).

Formulasi keseimbangan batas umum/*General Limit Equilibrium* (GLE)

dikembangkan oleh Fredlund pada 1970-an yang mencakup elemen kunci dari semua metode yang tercantum dalam Tabel 2.2. Formulasi GLE didasarkan pada dua persamaan faktor keamanan terhadap kesetimbangan momen (F_m) dan kesetimbangan gaya horizontal (F_f) sehingga memungkinkan rentang kondisi gaya normal dan gaya geser antar irisan. Gaya geser antar irisan dalam metode GLE diselesaikan dengan Persamaan (2.4) yang diusulkan oleh Morgenstern-Price (Krahn, 2003).

$$X = E\lambda f(x) \dots\dots\dots (2.4)$$

di mana $f(x)$ adalah fungsi, λ (dalam desimal) adalah persentase dari fungsi yang digunakan, E adalah gaya normal irisan, dan X adalah gaya geser antar irisan. Gambar 2.3 (a) menunjukkan fungsi setengah sinus yang khas. Kurva atas pada gambar ini adalah fungsi spesifik yang sebenarnya. Kurva bawah adalah fungsi yang digunakan (Krahn, 2003).



Gambar 2.3 (a) Fungsi gaya antar irisan setengah sinus (b) hubungan faktor keamanan dan λ (Krahn, 2003)

Faktor keamanan GLE terhadap kesetimbangan momen (F_m) dan kesetimbangan gaya horizontal (F_x) dinyatakan pada Persamaan (2.5) dan (2.6) (Krahn, 2003).

$$F_m = \frac{\sum [c' \beta R + (N-v) R \tan \phi']}{\sum W_x - \sum N f \pm D d} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$F_x = \frac{\sum [c' \beta \cos \alpha + (N - v \beta) \tan \phi' \cos \alpha]}{\sum N \sin \alpha - D \cos \omega} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana c' adalah kohesi efektif, ϕ' adalah sudut gesek dalam efektif, v adalah tekanan air pori, N adalah gaya normal pada dasar irisan, W adalah berat irisan, D beban eksternal, β ; R ; x ; d ; f ; ω adalah parameter geometri, dan α adalah inklinasi dari dasar irisan (Krahn, 2003).

Salah satu variabel kunci dalam kedua persamaan adalah gaya normal di dasar setiap irisan (N). Gaya normal (N) diperoleh dengan penjumlahan gaya-gaya vertikal sehingga keseimbangan gaya vertikal terpenuhi. Dalam bentuk persamaan, gaya normal di dasar irisan didefinisikan sebagai persamaan (2.7) (Krahn, 2003).

$$N = \frac{W + (X_R - X_L) - \frac{c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \phi'}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana F adalah F_m ketika N disubstitusikan ke dalam faktor keamanan persamaan momen, dan F adalah F_f ketika N disubstitusikan ke dalam faktor keamanan dari persamaan gaya (Krahn, 2003).

Gaya normal dasar irisan bergantung pada gaya geser antar irisan X_R dan X_L di kedua sisi irisan. Gaya normal dasar irisan akibatnya berbeda untuk berbagai metode tergantung pada bagaimana masing-masing metode menangani gaya geser antar irisan. Metode GLE menghitung F_m dan F_f untuk rentang nilai λ . Dengan nilai-nilai yang dihitung ini, grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (b) dapat digambar yang menunjukkan bagaimana F_m dan F_f bervariasi dengan λ (Krahn, 2003).

Faktor keamanan Spencer dan Morgenstern-Price (MP) ditentukan pada titik di mana kedua kurva bersilangan pada Gambar 2.3 (b). Pada titik ini, FK memenuhi kesetimbangan momen dan gaya. Titik persilangan FK Spencer atau MP ini tergantung pada fungsi gaya antar irisan. Metode MP dapat memanfaatkan fungsi umum X/E yang bervariasi. Posisi pada kurva gaya tergantung pada prosedur yang digunakan untuk

menentukan kemiringan resultan antar irisan. Kemiringan resultan antar irisan adalah $\arctan(\lambda)$ ketika $f(x)$ konstan 1,0 seperti pada metode Spencer (Krahn, 2003).

2.2.2 Metode Keseimbangan Batas Tiga Dimensi

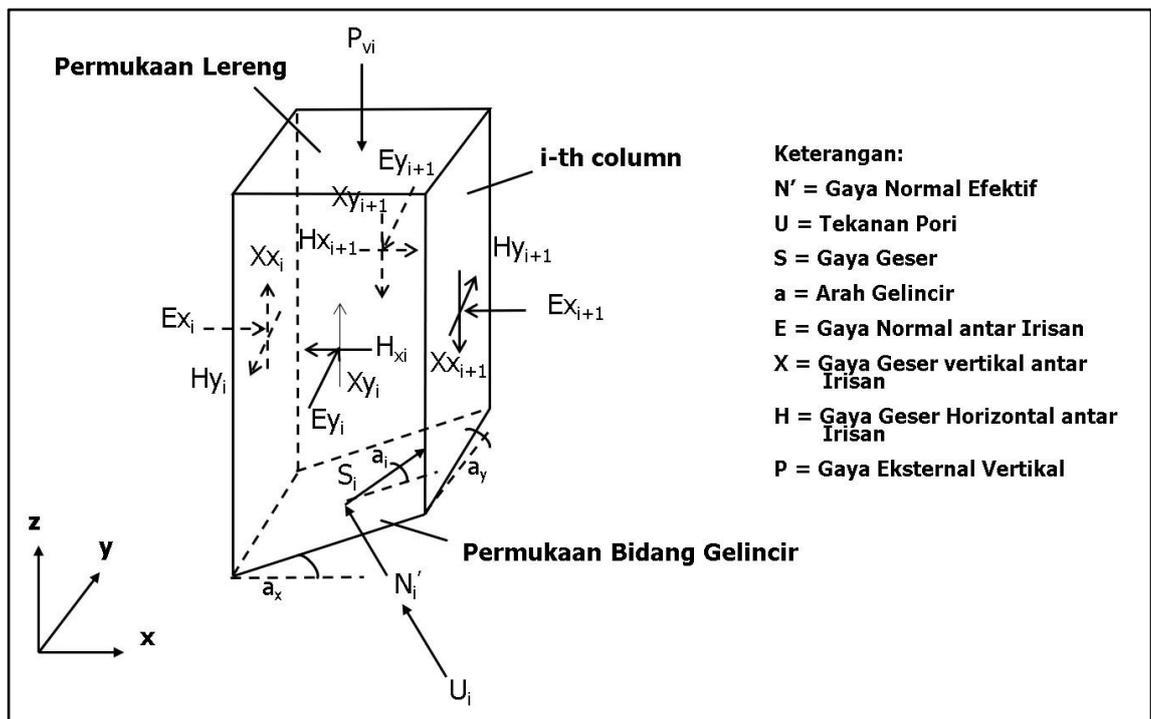
Kebutuhan dan tekanan untuk menganalisa suatu lereng 3D lebih terdengar saat ini. Hal ini dikarenakan analisis 2D mengasumsikan bahwa lebar lereng adalah lebar tak terhingga sehingga mengabaikan efek 3D (Cheng *and* Yip, 2007). Dalam kebanyakan kasus, rasio lebar terhadap tinggi tidak cukup panjang dan bervariasi tegak lurus terhadap gerakan irisan. Oleh karena itu, analisis 3D dianggap penting dilakukan untuk menghasilkan faktor keamanan yang representatif. Selain itu, dalam analisis 3D, volume longsor juga dapat diperkirakan yang tidak dijangkau dalam analisis 2D. Jika volumenya dapat ditentukan, dapat berguna sebagai salah satu pertimbangan dalam memberikan rekomendasi pencegahan longsor (Azizi *et al.*, 2020).

Model tiga dimensi adalah versi halus dari dua dimensi dengan memproyeksikan bidang irisan ke dalam kolom dan menentukan gaya resultan serta momen berdasarkan arah x , y , dan z . Keseimbangan gaya dan momen yang bekerja pada massa kolom keseluruhan digunakan untuk menentukan tiga kemungkinan arah bidang gelincir berikut (Cheng *and* Yip, 2007):

1. kolom bergerak ke arah yang sama;
2. kolom bergerak menuju satu sama lain; dan
3. kolom bergerak ke arah yang berlawanan.

Potensial massa bidang irisan dibagi menjadi beberapa kolom dalam analisis tiga dimensi. Pada kondisi keseimbangan batas, gaya internal dan eksternal yang bekerja pada setiap kolom ditunjukkan pada Gambar 2.4. Dimana a_i adalah sudut ruang untuk arah geser terhadap proyeksi bidang x - y ; a_x dan a_y adalah kemiringan alas sepanjang arah x dan y yang diukur pada pusat setiap kolom; E_{xi} dan E_{yi} adalah gaya normal antar kolom dalam masing-masing arah x dan y ; H_{xi} dan H_{yi} adalah gaya geser antar kolom

lateral dalam arah x dan y; N'_i dan U_i adalah gaya air pori normal dan dasar efektif; P_{vi} dan S_i adalah gaya eksternal vertikal dan gaya geser mobilisasi dasar; dan X_{xi} dan X_{yi} adalah gaya geser vertikal antar kolom pada bidang yang tegak lurus terhadap arah x dan y. Berat material dan beban vertikal diasumsikan bekerja di tengah setiap kolom untuk kesederhanaan (Cheng and Yip, 2007).



Gambar 2.4 Gaya yang bekerja pada kolom 3D individual sesuai metode kesetimbangan batas kolom irisan (Cheng and Yip, 2007)

Formulasi 3D saat ini membutuhkan asumsi berikut (Chend and Yip, 2007):

1. kriteria kegagalan Mohr-Coulomb valid;
2. untuk metode Morgenstern-Price, faktor keamanan dihitung berdasarkan arah geser a' , dimana gaya dan momen adalah sama; dan
3. arah geser sama untuk semua kolom.

Dengan kriteria kegagalan Mohr-Coulomb, faktor keamanan ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.8).

$$F = \frac{S_{fi}}{S_i} = \frac{c'A_i + N'_i \tan \phi'_i}{S_i} \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana S_{fi} adalah resultan total gaya geser yang berada pada dasar kolom i ; N'_i adalah gaya normal dasar efektif; c' adalah kekuatan kohesif efektif; dan A_i adalah luas dasar kolom. Gaya geser dasar S_i dan gaya normal dasar N_i dinyatakan sebagai komponen gaya terhadap arah x , y , dan z untuk kolom i (Cheng *and* Yip, 2007).

2.2.3 Analisis dengan Menggabungkan Tekanan Air Pori

Tekanan pori mengontrol tegangan efektif massa batuan di dinding lereng. Bertindak dalam massa batuan yang disambung, peningkatan tekanan pori mengurangi tegangan efektif yang menyebabkan pengurangan kekuatan geser massa batuan. Persamaan (2.9) dimana v adalah tekanan pori dan $(\sigma_n - v)$ adalah tekanan efektif menggambarkan pengurangan kekuatan geser akibat tekanan pori. Oleh karena itu, asumsi mendasar yang mendasari semua analisis stabilitas pada lereng batuan yang disambung dengan keberadaan air adalah bahwa prinsip tegangan efektif berlaku pada semua skala analisis, dari lereng keseluruhan skala besar hingga lereng antar jenjang. Tekanan pori di dalam lereng juga biasanya merupakan satu-satunya elemen desain lereng yang dapat dengan mudah dimodifikasi dengan intervensi buatan (Read *and* Stacey, 2009).

$$\tau = c + (\sigma_n - v) \tan \phi \dots\dots\dots (2.9)$$

Terdapat tiga pendekatan yang umum digunakan untuk memperhitungkan pengaruh air dalam analisis kestabilan lereng (Read *and* Stacey, 2009).

1. Pendekatan lereng kering. Dalam pendekatan ini, lereng diasumsikan kering. Hal ini dapat berarti bahwa aliran air dan rembesan dapat muncul pada muka lereng, selama tidak ada tekanan yang signifikan, ini dapat berarti bahwa tidak ada tekanan air antara muka lereng dan setiap permukaan bidang runtuh yang potensial.
2. Pendekatan lereng jenuh. Ini mungkin pendekatan yang paling umum. Diasumsikan bahwa massa batuan di bawah permukaan freatik sepenuhnya

jenuh dan tekanan pori bekerja pada semua rekahan terlepas dari skala dan/atau konektivitasnya. Pada dasarnya, lereng diasumsikan sebagai kerikil. Namun, dalam hampir semua kasus, massa batuan yang disambung direpresentasikan sebagai kontinum ekivalen. Analisis aliran biasanya dilakukan untuk menentukan distribusi kondisi jenuh dari tekanan pori di lereng. Distribusi tekanan yang dihasilkan mengabaikan kemungkinan pengurangan tekanan pori karena deformasi lereng yang diinduksi pertambangan. Dari sudut pandang analisis stabilitas, konsep permukaan freatik tidak berguna dalam massa batuan yang disambung dengan konektivitas yang buruk. Hanya ada tekanan air dan kadar air, yang mungkin ada di wilayah yang terpisah. Batas kontinu antara bagian lereng yang jenuh dan tidak jenuh mungkin tidak ada.

3. Pendekatan hibrida. Pendekatan ini mencoba untuk mengakui perbedaan rezim tekanan air yang ada di dalam lereng, yang direpresentasikan sebagai sistem blok batuan yang dipisahkan oleh rekahan eksplisit. Fraktur eksplisit biasanya memiliki tekanan pori yang ditentukan. Blok batuan biasanya berperilaku sebagai kontinum yang secara implisit mencakup patahan kecil (struktur) dan mungkin tidak menentukan tekanan pori. Asumsi yang melekat adalah bahwa rekahan eksplisit sering kali memiliki permeabilitas dan konektivitas yang tinggi sehingga tekanan pori di dalamnya tidak terpengaruh oleh deformasi lereng. Pendekatan ini menawarkan fleksibilitas paling tinggi karena tekanan pori yang berbeda dapat ditentukan secara terpisah di berbagai komponen lereng batuan.

Pengaruh tekanan air dalam mengurangi tegangan efektif dapat memberikan paham yang lebih baik terhadap stabilitas lereng. Dua metode biasanya digunakan untuk menentukan distribusi tekanan pori di dalam lereng. Metode yang paling teliti adalah melakukan analisis aliran lengkap, dan menggunakan tekanan pori yang dihasilkan dalam analisis stabilitas. Sebuah metode yang kurang teliti, tetapi lebih umum adalah

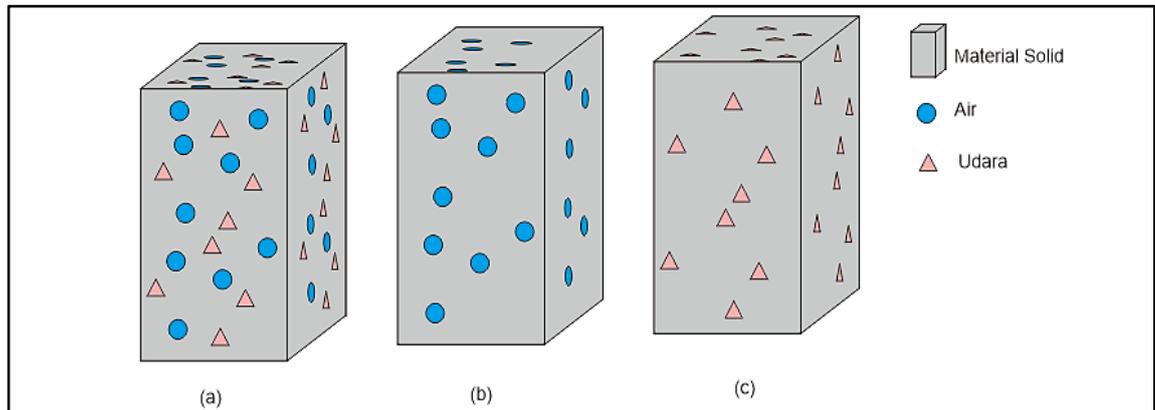
untuk menentukan muka air tanah dan tekanan pori yang dihasilkan diberikan oleh produk dari kedalaman vertikal di bawah permukaan air, kepadatan air, dan gravitasi. Dalam pengertian ini, pendekatan muka air tanah setara dengan menentukan permukaan *piezometric*. Kedua metode tersebut menggunakan permukaan freatik yang serupa (Wyllie *and* Mah, 2004).

Dua cara dilakukan untuk mengevaluasi kesalahan yang dihasilkan dalam penentuan muka air tanah tanpa melakukan analisis aliran. Dalam satu kasus, analisis aliran dilakukan untuk menentukan tekanan pori. Dalam kasus kedua, tekanan ditentukan hanya dengan menggunakan permukaan *piezometric* yang diasumsikan sebagai permukaan freatik yang diambil dari analisis aliran. Tidak ada perbedaan signifikan dalam prediksi stabilitas antara analisis aliran lengkap dan hanya menentukan permukaan *piezometric*. Namun, tidak jelas apakah kesimpulan ini dapat diekstrapolasi ke kasus lain misalnya yang melibatkan aliran anisotropik (Wyllie *and* Mah, 2004).

2.3 Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan merupakan karakteristik dasar batuan yang mempengaruhi perilaku batuan. Perbedaan komposisi padatan, air, dan udara dari setiap batuan menyebabkan terjadinya perbedaan karakteristik yang berkaitan dengan kekuatan batuan apabila dilakukan pengujian sifat mekanis. Penelitian mengenai prediksi kekuatan batuan dari pengujian sifat fisik batuan telah banyak dilakukan. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, para peneliti memperkenalkan beberapa persamaan empiris yang dapat digunakan dalam menentukan kekuatan batuan berdasarkan sifat fisik batuan (Rajabzadeh *et al.*, 2012). Informasi mengenai kecenderungan dan sifat-sifat dari batuan alami dapat diperoleh dengan melakukan pengujian skala kecil di laboratorium. Pengujian spesimen skala kecil dianggap dapat mewakili kondisi massa batuan yang ada di lapangan secara keseluruhan (Arif, 2016). Ilustrasi kondisi batuan

dalam menggambarkan kondisi fisik batuan yang terdiri dari material solid, air, dan udara ditunjukkan melalui Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Ilustrasi kondisi batuan; (a) Kondisi batuan alami; (b) Kondisi batuan jenuh; (c) Kondisi batuan kering

Parameter-parameter sifat fisik yang dapat diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium, meliputi bobot isi, berat jenis, kadar air, derajat kejenuhan, porositas, dan nisbah rongga. Uraian mengenai parameter-parameter sifat fisik tersebut sebagai berikut (Arif, 2016).

1. Bobot isi (*density*)

Bobot isi merupakan perbandingan antara massa batuan terhadap volume total batuan tersebut. Batuan terdiri dari massa padat, air, dan gas. Rongga pada batuan yang berupa pori-pori dan rekahan akan terisi oleh air dan gas. Pada kondisi jenuh, batuan dianggap hanya memiliki massa padatan dan massa air. Bobot isi dibedakan menjadi bobot isi natural (*natural density*), bobot isi jenuh (*saturated density*), dan bobot isi kering (*dry density*).

2. Berat jenis (*specific gravity*)

Berat jenis merupakan perbandingan antara bobot isi padatan batuan terhadap bobot isi air. Berat jenis menyatakan perbedaan berat batuan dibandingkan dengan berat air. Berat jenis dibedakan menjadi berat jenis asli (*true specific gravity*) dan berat jenis semu (*apparent specific gravity*).

3. Kadar air (*water content*)

Kadar air merupakan persentase perbandingan antara massa air dalam batuan dengan massa total batuan. Kadar air dibedakan menjadi kadar air asli (*natural water content*) dan kadar air jenuh (*saturated water content*).

4. Derajat kejenuhan (*degree of saturation*)

Derajat kejenuhan merupakan persentase perbandingan antara kadar air natural dengan kadar air jenuh. Derajat kejenuhan menunjukkan perbandingan jumlah air yang terdapat dalam keadaan natural dengan volume maksimum air yang dapat mengisi rongga batuan.

5. Porositas (*porosity*)

Porositas merupakan persentase perbandingan antara volume pori terhadap volume total batuan.

6. Nisbah rongga (*void ratio*)

Nisbah rongga merupakan perbandingan antara volume rongga dalam batuan terhadap volume padatan pada batuan.

2.4 Sifat Mekanis Batuan

Sifat mekanis merupakan kecenderungan yang diperlihatkan oleh batuan apabila diberikan gaya, baik itu gaya tekan, tarik, atau geser. Nilai sifat mekanis batuan dapat diperoleh dari pengukuran spesimen batuan di laboratorium. Spesimen batuan yang diambil di lapangan memiliki dimensi yang lebih kecil dan dianggap memiliki partikel struktur yang homogen sesuai dengan kondisi yang ada di lapangan. Meski kondisi batuan di lapangan memiliki struktur yang teratur dan tersebar secara acak, namun spesimen uji untuk laboratorium dianggap mampu mewakili kondisi kemenerusan dan karakteristik struktur batuan di lapangan (Jaeger *et al.*, 2007).

Semua massa batuan memiliki bidang diskontinu seperti kekar, bidang

perlapisan, dan sesar. Pada kedalaman yang dangkal dimana tegangan-tegangan yang bekerja sangat rendah atau dapat diabaikan, deformasi ataupun runtuh yang terjadi pada batuan utuh (*intact rock*) dan massa batuan lebih banyak dikendalikan oleh lunturn pada bidang diskontinu dan sifat fisik butiran batuan utuh diantara bidang lunturn/gesernya. Uji laboratorium yang sering digunakan dalam kebutuhan analisis kestabilan lereng adalah uji geser langsung. Uji laboratorium ini bertujuan untuk menentukan kekuatan dari batuan. Pengujian sifat mekanis di laboratorium bersifat destruktif sehingga spesimen uji sifat mekanis tidak dapat digunakan kembali (Rai dkk., 2014).

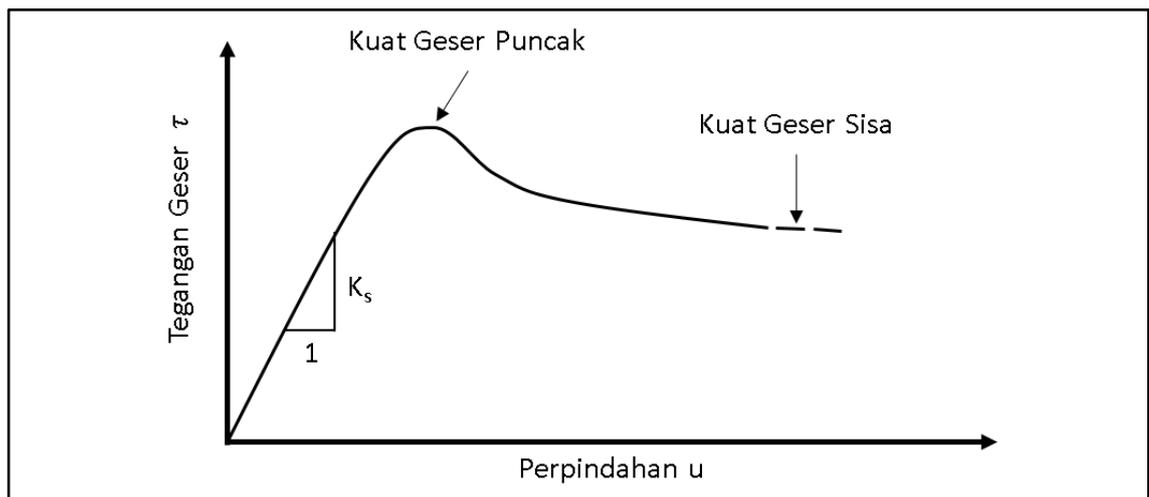
2.4.1 Kuat Geser Batuan (*Rock Shear Strength*)

Kuat geser batuan merupakan perlawanan internal batuan terhadap tegangan yang bekerja sepanjang bidang geser dalam batuan, yang dipengaruhi oleh karakter intrinsik dan faktor eksternal. Untuk mengetahui kuat geser batuan pada tegangan normal tertentu diperlukan uji kuat geser yang menggunakan contoh uji paling tidak sebanyak 3 buah. Setiap contoh dikenakan gaya normal (F_n) tertentu yang diaplikasikan tegak lurus terhadap permukaan bidang diskontinu dan gaya geser (F_s) dikenakan untuk menggeser contoh batuan hingga pecah.

Pada perpindahan yang relatif kecil, batuan akan mengikuti perilaku elastis. Hal ini ditandai dengan hubungan linear antara tegangan geser dan perpindahan. Kemiringan geser linier tersebut adalah kekakuan geser (*shear stiffness*) batuan. Setelah melewati tahap elastik, pada umumnya batuan getas (*brittle*) akan mengalami deformasi plastik dan kemudian runtuh ketika tegangan yang bekerja mencapai kekuatan geser puncak batuan. Setelah itu, tegangan geser yang digunakan untuk menggeser batuan akan turun hingga mencapai nilai yang konstan dan disebut dengan kekuatan sisa batuan.

Pada batuan yang bersifat *ductile*, deformasi plastik tetap terjadi tetapi tidak

diikuti dengan penurunan kekuatan geser. Hasil pengujian kuat geser langsung kemudian diplot ke dalam kurva Mohr-Coulomb sehingga dapat ditentukan parameter-parameter kekuatan batuan seperti kurva intrinsik (*strength envelope*), kuat geser (τ), kohesi (c), tegangan normal (σ_n), dan sudut geser dalam (ϕ). Hubungan antara gaya perpindahan horizontal terhadap tegangan geser membentuk kurva seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kurva tegangan-perpindahan geser (Rai dkk., 2014)

2.4.2 Faktor- faktor yang Mempengaruhi Kuat Geser Batuan

Penting untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan geser bidang diskontinu yang memisahkan blok dari massa batuanya. Faktor tersebut terbagi menjadi faktor intrinsik yang merupakan faktor yang menunjukkan karakteristik internal batuan, terdiri dari kohesi (c); sudut gesek dalam (ϕ), dan faktor ekstrinsik merupakan faktor yang berasal dari lingkungan batuan baik yang alami maupun tidak. Faktor-faktor tersebut antara lain (Rai dkk., 2014):

1. Tegangan normal (σ_n)

Semakin besar tegangan normal yang bekerja, semakin besar tegangan yang dibutuhkan untuk menyebabkan batuan tersebut bergeser. Hal ini mengindikasikan bahwa kekuatan bidang diskontinu pada posisi yang sangat

dalam cenderung semakin kuat. Pembentukan rekahan dapat terjadi ketika batuan diberi beban normal sebesar 30 - 50% dari kuat tekan uniaksialnya dan ditandai dengan batas perubahan kurva regangan volumetrik.

2. Keberadaan dan tekanan air

Tekanan air dalam batuan merupakan gaya angkat (*uplift force*) atau tekanan air pori (u) yang akan mengurangi tegangan normal yang bekerja menjadi tegangan normal efektif (σ_{eff}) yang besarnya ($\sigma_n - u$) sehingga akan mengurangi kekuatan geser batuan. Pada batuan lunak yang memiliki nilai kuat tekan uniaksial di bawah 25 MPa (ISRM, 1979) seperti batu lumpur dan batu lempung, nilai kohesi dan sudut geser dalamnya dapat berubah secara drastis dengan adanya perubahan kandungan air. Hal ini terkait dengan sifat mineral penyusunnya yang reaktif atau mudah mengikat air seperti mineral lempung *montmorillonite* dan *kaolinite*. Terikatnya air oleh mineral batuan lunak dapat menyebabkan terganggunya keseimbangan butiran penyusun batuan tersebut. Pengaruh air akan semakin bertambah dengan adanya pori pada batuan dimana air akan sangat mudah menyerap karena adanya energi bebas permukaan, sehingga menyebabkan terjadinya pengurangan kuat tarik pada batuan.

3. Mineralogi dan ukuran butiran

Butiran yang kecil biasanya *monocrystalline* dan ikatannya ataupun nilai kohesinya relatif lebih tinggi dibanding butiran besar. Pada batuan yang ukuran butirannya lebih besar, permukaan gesernya cenderung membentuk gelombang kasar (*irregularities*) ketika mengalami pergeseran. Hal ini menyebabkan sudut geser dalam batuan yang diperoleh dari uji laboratorium lebih besar dari aslinya. Kenney (1967) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa komposisi mineral ternyata lebih berpengaruh terhadap kuat geser tanah daripada ukuran butiran ataupun karakteristik plastisitas tanah.

4. Kekasaran permukaan geser

Semakin kasar permukaan geser, semakin besar Kekuatan geser batuan. Tetapi kekasaran ini akan berpengaruh hanya pada tegangan normal yang rendah karena pada tegangan normal yang cukup tinggi permukaan geser akan hancur sehingga perilaku kekuatan geser batuan akan lebih dipengaruhi oleh kekuatan batuan utuh (*intact rock*) daripada kekasaran permukaan geser. Kekasaran permukaan bidang diskontinu akan mempengaruhi kekuatan geser batuan pada tingkat tegangan normal hingga 20% kuat tekan batuan.

5. Banyaknya bidang diskontinu

Bidang-bidang diskontinu pada massa batuan dapat mengganggu distribusi tegangan karena terdapat banyak permukaan yang tidak saling kontak satu sama lain. Kontak parsial atau hanya pada titik-titik tertentu dapat menyebabkan konsentrasi tegangan yang tinggi dan mengakibatkan kehancuran lokal. Dengan keberadaan bidang-bidang diskontinu pada batuan, perambatan rekahan pada batuan dapat dengan mudah terjadi ketika mendapat gaya dari luar. Hal ini menyebabkan kekuatan batuan menurun. Selain itu, walaupun rekahan tidak menyebabkan runtuh secara total, keberadaannya dapat menyebabkan terganggunya sifat mekanik batuan dan menimbulkan sifat anisotropi.

2.5 Air Tanah

Kehadiran air tanah di lereng batuan dapat memiliki efek yang merugikan pada stabilitas karena tekanan air mengurangi stabilitas lereng dengan mengurangi kekuatan geser permukaan potensial runtuh. Tekanan air di retakan tarik atau celah serupa di dekat permukaan mengurangi stabilitas dengan meningkatkan gaya yang menginduksi pergeseran. Selain itu, perubahan kadar air beberapa batuan, terutama serpih, dapat menyebabkan percepatan pelapukan dan penurunan kekuatan geser (Wyllie *and* Mah,

2004).

Efek paling penting dari air tanah dalam massa batuan adalah penurunan stabilitas akibat tekanan air di dalam bidang lemah. Ketika mempertimbangkan efek air tanah dalam desain lereng, ada dua pendekatan yang bisa dilakukan untuk memperoleh data tentang distribusi tekanan air dalam massa batuan yang dirincikan sebagai berikut (Wyllie *and* Mah, 2004).

1. Pengurangan pola aliran air tanah dari pertimbangan konduktivitas hidraulik massa batuan dan sumber air tanah.
2. Pengukuran langsung ketinggian air di lubang bor atau sumur, atau tekanan air dengan menggunakan piezometer yang dipasang di lubang bor.

Ketika terdapat pengaruh dari tekanan air pada stabilitas lereng, adalah penting bahwa perkiraan terbaik dari kemungkinan nilai kisaran tekanan air tanah harus tersedia sebelum analisis stabilitas rinci dilakukan. Banyak faktor yang mengendalikan aliran air tanah dalam massa batuan yang memiliki kekar. Jika studi rinci tentang kondisi air tanah diperlukan, disarankan untuk mendapatkan data tambahan dari sumber seperti Freeze *and* Cherry (1979) dan Cedergren (1989) tentang analisis aliran air tanah, dan Dunnicliff (1993) tentang instrumentasi (Wyllie *and* Mah, 2004).

Penentuan muka air tanah pada tambang terbuka terbagi menjadi tiga metode yang diantaranya (Mandzic, 1992):

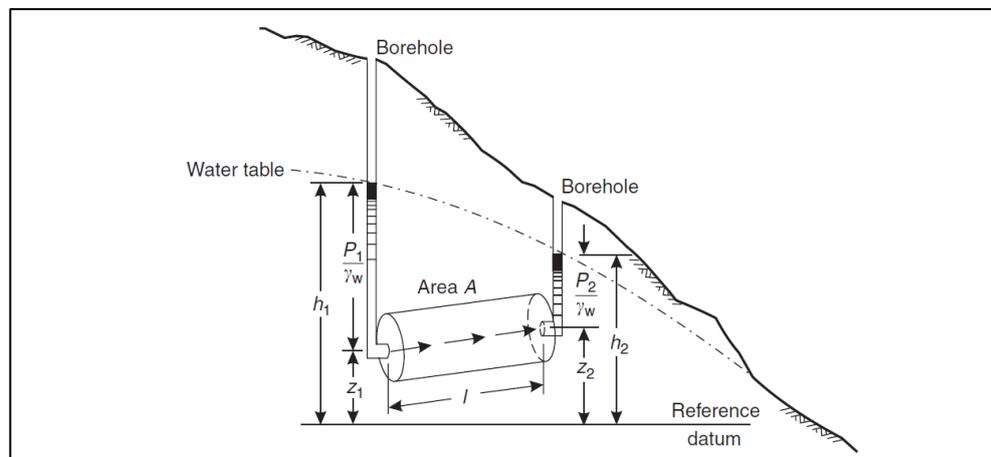
1. metode klasik dalam penentuan tekanan air pori dapat diasumsikan melalui level muka air tanah (*Phreatic Surface*);
2. kondisi tekanan air dapat diketahui melalui pembacaan piezometer; dan
3. penyesuaian air secara teoritis pada kondisi tekanan air aktual untuk tipe aliran air anisotropik atau isotropik.

Air tanah dalam keadaan alaminya selalu bergerak. Gerakan ini diatur oleh prinsip-prinsip hidraulik yang mapan. Aliran melalui akuifer, yang sebagian besar

merupakan media berpori alami, dapat dinyatakan dengan apa yang dikenal sebagai hukum Darcy. Penerapan hukum Darcy memungkinkan laju dan arah aliran air tanah dievaluasi. Konduktivitas hidraulik, yang merupakan ukuran permeabilitas media, merupakan konstanta penting dalam persamaan aliran. Penentuan konduktivitas hidraulik dapat dilakukan dengan beberapa teknik laboratorium atau lapangan (Todd *and* Mays, 2005).

2.5.1 Konduktivitas Hidraulik

Parameter dasar yang menentukan aliran air tanah dan distribusi tekanan air dalam media geologi adalah konduktivitas hidraulik. Parameter ini menghubungkan laju aliran air melalui material dengan gradien tekanan yang diterapkan di atasnya. Suatu media memiliki konduktivitas hidraulik jika dalam satuan waktu akan mentransmisikan air tanah dalam satuan volume pada viskositas kinematik yang ditetapkan melalui penampang satuan luas, diukur pada sudut siku-siku ke arah aliran, di bawah gradien hidraulik satuan. Ilustrasi contoh tanah atau batuan berbentuk silinder di bawah muka air tanah pada suatu lereng dapat dilihat pada Gambar 2.7 (Todd *and* Mays, 2005).



Gambar 2.7 Ilustrasi hukum Darcy untuk definisi konduktivitas hidraulik (Wyllie *and* Mah, 2004)

Dengan luas penampang A dan panjang l , ketinggian air di lubang bor di kedua ujung sampel ini berada pada ketinggian h_1 dan h_2 di atas datum referensi. Jumlah air

yang mengalir melalui sampel dalam satuan waktu adalah Q menurut hukum Darcy, dan V adalah kecepatan pelepasan. Koefisien konduktivitas hidraulik K menurut hukum ini didefinisikan sebagai (Todd *and* Mays, 2005):

$$K = \frac{Ql}{A(h_1 - h_2)} = \frac{Vl}{(h_1 - h_2)} \dots\dots\dots (2.10)$$

Persamaan (2.10) menunjukkan bahwa konduktivitas hidraulik K memiliki dimensi yang sama dengan kecepatan pelepasan V , yaitu panjang per satuan waktu. Satuan yang paling umum digunakan dalam studi air tanah adalah cm/s. Melalui Gambar 2.7 juga menunjukkan bahwa *total head* (h) pada setiap titik dapat dinyatakan dalam tekanan P , tinggi z di atas datum referensi, dan γ_w adalah massa jenis air. Hubungan antara parameter ini dinyatakan pada persamaan (2.11) (Todd *and* Mays, 2005):

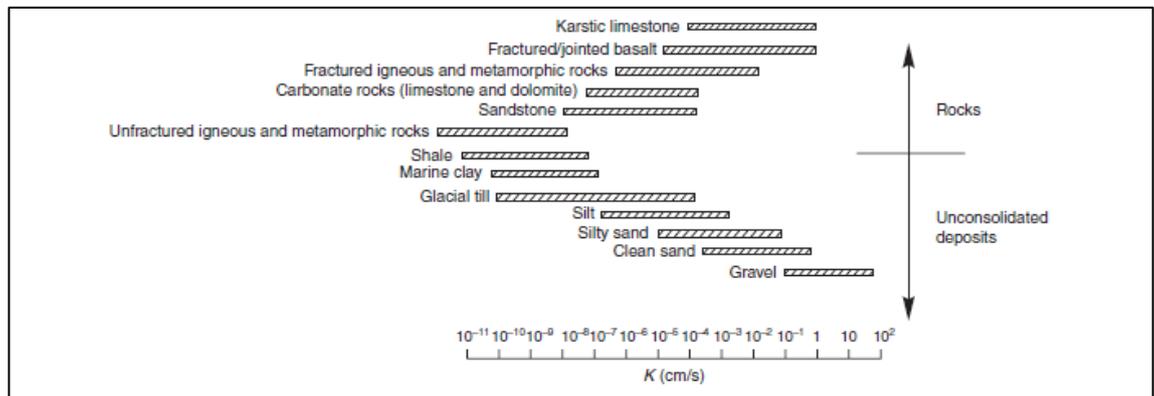
$$h = \frac{P}{\gamma_w} + z \dots\dots\dots (2.11)$$

Hukum Darcy berlaku untuk media berpori dan dapat digunakan untuk mempelajari aliran air tanah baik di batuan utuh dan massa batuan pada skala makroskopik. Namun, alirannya harus laminar, sehingga hukum Darcy tidak berlaku untuk aliran tidak linier atau turbulen pada fraktur individual (Todd *and* Mays, 2005).

Kisaran khas konduktivitas hidraulik sekunder untuk berbagai jenis batuan, serta endapan yang tidak terkonsolidasi, ditunjukkan pada Gambar 2.8. Kisaran konduktivitas hidraulik untuk bahan geologi mencakup 13 orde magnitudo dan untuk setiap jenis batuan tunggal rentangnya bisa empat orde magnitudo. Hal ini menunjukkan kesulitan dalam memprediksi jumlah dan tekanan aliran air di dalam lereng. Besaran konduktivitas hidraulik untuk berbagai kelas batuan tidak terkonsolidasi dan terkonsolidasi ditunjukkan pada Gambar 2.8 (Todd *and* Mays, 2005).

Konduktivitas hidraulik tanah atau batuan tergantung pada berbagai faktor fisik, termasuk porositas, ukuran dan distribusi partikel, bentuk partikel, susunan partikel, dan faktor lainnya. Secara umum, untuk media berpori yang tidak terkonsolidasi,

konduktivitas hidraulik bervariasi dengan ukuran partikel, bahan lempung menunjukkan nilai konduktivitas hidraulik yang rendah, sedangkan pasir dan kerikil menunjukkan nilai yang tinggi. Perlu dicatat Gambar 2.8 adalah rata-rata dari banyak pengukuran. Jelas bahwa ada kisaran nilai untuk setiap jenis batuan tergantung pada faktor-faktor seperti pelapukan, rekahan, saluran larutan, dan kedalaman (Todd *and* Mays, 2005).



Gambar 2.8 Konduktivitas hidraulik dari beberapa material geologi (Atkinson, 2000)

Sebagian besar jenis batuan, aliran melalui batuan utuh dapat diabaikan (didefinisikan oleh $K_{primary}$), dan pada dasarnya semua aliran terjadi di sepanjang bidang lemah (didefinisikan oleh $K_{secondary}$). Istilah konduktivitas hidraulik sekunder mengacu pada aliran dalam massa batuan dan mencakup aliran di batuan utuh dan setiap diskontinuitas yang ada. Kondisi ini menghasilkan konduktivitas hidraulik sekunder yang memiliki rentang nilai yang luas tergantung pada persistensi, lebar, dan karakteristik pengisian dari bidang lemah. Misalnya, batupasir mungkin memiliki beberapa konduktivitas primer dan keberadaan bidang lapisan persisten dapat menghasilkan konduktivitas sekunder yang tinggi dalam arah yang sejajar dengan lapisan (Todd *and* Mays, 2005).

2.5.2 Permeabilitas Intrinsik

Permeabilitas batuan atau tanah menentukan kemampuannya untuk mentransmisikan cairan. Hal ini adalah sifat hanya dari medium dan tidak tergantung pada sifat larutan. Untuk menghindari kebingungan dengan konduktivitas hidraulik, yang

mencakup sifat-sifat air tanah, permeabilitas intrinsik k dapat dinyatakan sebagai persamaan (2.12) (Todd *and* Mays, 2005).

$$k = \frac{K\mu}{\rho g} \dots\dots\dots (2.12)$$

dengan K adalah konduktivitas hidraulik, μ adalah viskositas dinamis, ρ adalah densitas fluida, dan g adalah percepatan gravitasi. Kombinasi Persamaan (2.12) ke dalam Persamaan (2.10) menghasilkan (Todd *and* Mays, 2005):

$$k = - \frac{\mu v}{\rho g \left(\frac{dh}{dl}\right)} \dots\dots\dots (2.13)$$

2.5.3 Penentuan Konduktivitas Hidraulik

Konduktivitas hidraulik di zona jenuh dapat ditentukan dengan berbagai teknik, termasuk perhitungan dari rumus, metode laboratorium, uji pelacak, uji lubang auger, dan uji pemompaan sumur. Banyak peneliti telah mempelajari hubungan permeabilitas atau konduktivitas hidraulik dengan sifat-sifat media berpori. Beberapa formula telah dihasilkan berdasarkan pekerjaan analitik atau eksperimental. Kebanyakan rumus permeabilitas memiliki bentuk umum (Todd *and* Mays, 2005):

$$k = cd^2 = f_s f_a d^2 \dots\dots\dots (2.14)$$

dimana c adalah koefisien tak berdimensi, f_s adalah faktor bentuk butir (atau pori), f_a adalah faktor porositas, dan d adalah diameter butir karakteristik. Beberapa formula memberikan perkiraan hasil yang dapat diandalkan karena sulitnya memasukkan semua variabel yang mungkin dalam media berpori. Untuk media yang ideal, seperti kumpulan bola dengan diameter seragam, konduktivitas hidraulik dapat dievaluasi secara akurat dari porositas dan kondisi pengemasan yang diketahui (Todd *and* Mays, 2005).

2.6 Tekanan Air Pori

Batuan sedimen dalam formasi terdiri dari bahan padat dan cairan dalam jaringan berpori. Tekanan hidrostatik, P_h , adalah tekanan yang disebabkan oleh berat suatu kolom

fluida dan dinyatakan dalam persamaan (2.15) (Dutta *et al.*, 2021).

$$P_h = \int_0^z \rho_f(z)gdz + P_{udara} \approx \rho_f gz + P_{udara} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana z adalah tinggi kolom fluida, ρ_f adalah kerapatan fluida, g adalah percepatan gravitasi, dan P_{udara} menunjukkan tekanan akibat atmosfer. Ukuran dan bentuk kolom fluida tidak berpengaruh pada tekanan hidrostatik. Perkiraan di sisi kanan persamaan (2.15) mengasumsikan bahwa ρ_f konstan dan z adalah kedalaman di bawah permukaan tanah. Tekanan pori hidrostatik meningkat dengan kedalaman dan gradien pada kedalaman tertentu ditentukan oleh kerapatan fluida pada kedalaman tersebut. Air cenderung mengembang dengan naiknya suhu tetapi berkontraksi dengan naiknya tekanan. Jika suatu formasi bawah permukaan berada dalam kondisi hidrostatik, berarti terdapat sistem pori yang saling berhubungan dan terbuka dari permukaan bumi hingga kedalaman pengukuran. Ringkasnya, kerapatan fluida bergantung pada berbagai faktor, seperti jenis fluida (minyak, air, atau gas), konsentrasi padatan terlarut (yaitu, garam dan mineral lainnya), dan suhu serta tekanan fluida dan gas yang terlarut dalam fluida (Dutta *et al.*, 2021).

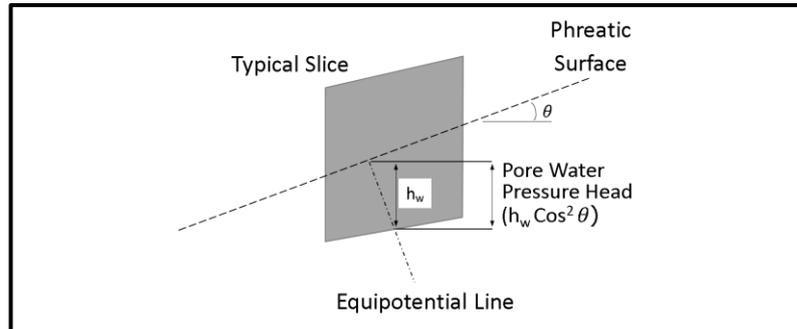
Tekanan air pori harus diperkirakan di lokasi yang relevan di lereng jika analisis tegangan efektif harus dilakukan. Tekanan pori biasanya diperkirakan dari kondisi air tanah yang dapat ditentukan dengan salah satu metode berikut (Abramson *et al.*, 1996):

2.6.1 Permukaan Freatik

Permukaan freatik yang digambarkan melalui garis dua dimensi, ditentukan oleh muka air tanah bebas. Dalam permukaan freatik, tekanan air pori dihitung dari kondisi rembesan konstan sesuai dengan sketsa yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Konsep ini didasarkan pada asumsi bahwa semua garis ekuipotensial adalah lurus dan tegak lurus terhadap segmen permukaan freatik yang melalui elemen irisan pada lereng. Jadi jika kemiringan segmen permukaan freatik adalah θ , dan jarak vertikal antara dasar irisan dan permukaan freatik adalah h_w , dan berat jenis air adalah γ_w , tekanan pori diberikan

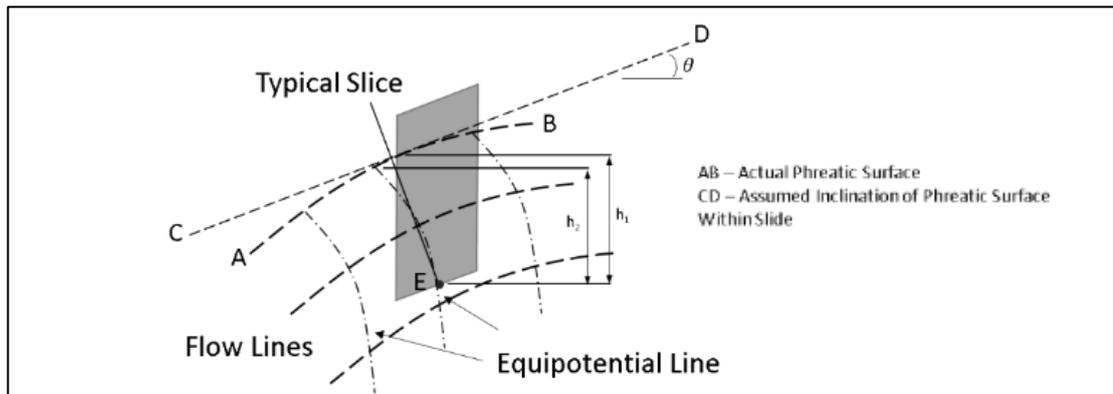
oleh Persamaan (2.16):

$$u = \gamma_w(h_w \cos^2 \theta) \dots\dots\dots (2.16)$$



Gambar 2.9 Perhitungan tekanan air pori dari permukaan freatik (Abramson *et al.*, 1996)

Permukaan freatik adalah asumsi yang masuk akal untuk permukaan garis lurus yang miring, tetapi akan memberikan perkiraan tekanan air pori yang lebih tinggi atau lebih rendah untuk permukaan freatik yang melengkung (cembung). Untuk permukaan freatik yang landai, permukaan freatik yang berbentuk cembung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 menghasilkan perkiraan tekanan air pori yang terlalu tinggi, sedangkan permukaan berbentuk cekung dapat menyebabkan perkiraan yang terlalu rendah. Estimasi berlebihan ini sepenuhnya disebabkan oleh asumsi garis ekuipotensial lurus yang berpotongan dengan garis permukaan freatik yang diproyeksikan, CD.



Gambar 2.10 Permukaan freatik dan kurva garis ekuipotensial (Abramson *et al.*, 1996)

Permukaan freatik sebenarnya pada garis AB, melengkung tajam, garis ekuipotensial juga harus melengkung, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.10. Dalam contoh ini, solusi tipikal akan menggunakan *head* tekanan air pori yang lebih besar, h_1 , daripada *head* sebenarnya, h_2 . Namun, perkiraan berlebihan ini kecil dan hanya akan mempengaruhi beberapa irisan dalam massa geser. Juga, konservatisme ini diperkirakan tidak akan mempengaruhi faktor keamanan secara signifikan.

2.6.2 Data *Piezometric*

Spesifikasi tekanan pori pada titik-titik diskrit di dalam lereng dan penggunaan skema interpolasi untuk memperkirakan tekanan air pori yang diperlukan di lokasi manapun. Ini adalah metode terbaik untuk menggambarkan distribusi tekanan air pori. Tekanan *piezometric* dapat ditentukan dari piezometer lapangan, jaring aliran yang disiapkan secara manual, atau solusi numerik menggunakan perbedaan hingga atau elemen hingga.

2.6.3 Rasio Tekanan Air Pori

Salah satu pendekatan untuk mendefinisikan tekanan air pori sebagai fungsi dari tegangan lapisan penutup yang kemudian dikenal sebagai rasio yang disebut R_u . Pendekatan ini adalah metode yang populer dan sederhana untuk menormalkan tekanan air pori yang diukur dalam suatu kemiringan berdasarkan Persamaan (2.17).

$$R_u = \frac{u}{\sigma_v} \dots\dots\dots (2.17)$$

dimana u adalah tekanan air pori dan σ_v adalah total tegangan tanah vertikal di bawah permukaan dan kedalaman z . Secara efektif, nilai R_u adalah rasio antara tekanan pori dan tegangan vertikal total pada kedalaman yang sama. Rasio R_u dalam beberapa hal mirip dengan koefisien tekanan air pori Skempton (1954) B .

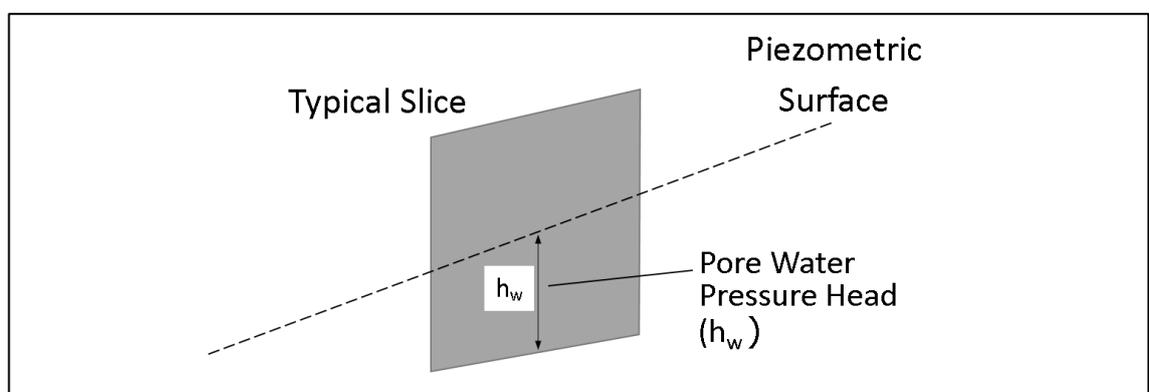
Faktor rasio tekanan air pori mudah diterapkan, tetapi kesulitan utama terkait dengan penetapan parameter ke berbagai bagian lereng yang berbeda. Sering ditemukan bahwa kemiringan akan membutuhkan pembagian yang luas ke banyak

daerah dengan nilai R_u yang berbeda. Metode ini, jika digunakan dengan benar akan memungkinkan pencarian permukaan yang paling kritis. Namun, biasanya dicadangkan untuk memperkirakan nilai FK dari grafik stabilitas lereng atau untuk menilai stabilitas satu permukaan.

2.6.4 Permukaan *Piezometric*

Permukaan ini ditentukan untuk analisis permukaan kegagalan tunggal yang unik. Pendekatan ini sering digunakan untuk analisis balik lereng yang runtuh. Karena kombinasi *piezometric* dan permukaan runtuh adalah unik, pencarian permukaan kritis tidak mungkin dilakukan. Pengguna harus memperhatikan bahwa permukaan *piezometric* tidak sama dengan permukaan freatik, karena tekanan air pori yang dihitung akan berbeda untuk kedua kasus tersebut.

Permukaan *piezometric* dapat dispesifikasikan agar sesuai dengan permukaan kegagalan tunggal yang unik di lereng. Fitur ini biasanya digunakan untuk menganalisis kembali kegagalan lereng di mana tekanan air pori telah ditentukan dari pengukuran *insitu*. Gambar 2.11 menunjukkan pendekatan yang diambil untuk menghitung tekanan air pori untuk permukaan *piezometric*. Pengguna harus mencatat bahwa jarak vertikal (ketinggian) diambil untuk mewakili tekanan.



Gambar 2.11 Perhitungan *pore water pressure head* untuk permukaan piezometer yang dispesifikkan (Abramson *et al.*, 1996)

Beberapa perangkat lunak komputer yang terlalu menyederhanakan analisis

dengan salah menafsirkan permukaan freatik sebagai permukaan *piezometric*. Dengan asumsi yang salah ini, tinggi tekanan pori yang ditaksir terlalu tinggi dan menjadi keliru untuk diambil sebagai jarak vertikal antara permukaan freatik dan dasar irisan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, bukan pendekatan yang benar dari Gambar 2.10.

2.6.5 Tekanan Air Pori Konstan

Pendekatan ini dapat digunakan jika ingin menentukan tekanan air pori konstan pada lapisan tertentu. Pendekatan ini dapat digunakan untuk menguji stabilitas timbunan yang ditempatkan pada kondisi lunak selama konstruksi di mana tekanan air pori berlebih dihasilkan menurut teori konsolidasi.

2.7 Infiltrasi

Infiltrasi didefinisikan sebagai proses masuknya air ke dalam batuan/tanah melalui permukaannya (Chow *et al.*, 1998). Laju infiltrasi umumnya dinyatakan dalam satuan yang sama dengan satuan intensitas curah hujan, yaitu millimeter per jam (mm/jam). Infiltrasi adalah proses mengalirnya air hujan ke dalam tanah disebabkan oleh tarikan gaya gravitasi dan gaya kapiler. Oleh karena itu, infiltrasi juga biasanya disebut sebagai aliran air yang masuk ke dalam tanah sebagai akibat gaya kapiler dan gravitasi (Sastrodarsono dan Takeda, 1999).

Infiltrasi curah hujan tidak sama dengan curah hujan total pada sebagian besar waktu dalam perhitungan numerik, sehingga sulit untuk mengkuantifikasi kondisi batas fluks yang melintasi permukaan lereng, sehubungan dengan infiltrasi dan pengaruh kondisi batas ini pada kondisi tekanan air pori di lereng (Xiong *et al.*, 2019). Untuk mengatasi masalah ini, Rahardjo *et al.* (2005) mencatat bahwa curah hujan dapat berkontribusi dari 40% sampai sekitar 100% dari total air untuk infiltrasi menurut hasil pengujian yang dilakukan, yang dapat digunakan dalam perhitungan numerik.

Laju infiltrasi curah hujan maksimum pada permukaan lereng ditentukan oleh

permeabilitas dan laju infiltrasi curah hujan R_{inf} dapat dinyatakan sebagai persamaan (2.18) (Xiong *et al.*, 2019).

$$R_{inf} = \begin{cases} I_r & I_r \leq K_w \\ K_w & I_r > K_w \end{cases} \dots\dots\dots (2.18)$$

dimana I_r adalah intensitas curah hujan. Ketika intensitas hujan lebih besar dari permeabilitas, aliran masuk maksimum sama dengan permeabilitas. Karena permeabilitas merupakan fungsi dari derajat kejenuhan, nilai laju infiltrasi hujan juga berubah dengan derajat kejenuhan (Xiong *et al.*, 2019).

2.8 Metode Elemen Hingga dalam Rembesan

Perkembangan perangkat lunak dalam bidang komputasi akhir-akhir ini sangat cepat, sehingga aplikasinya dapat dimanfaatkan hampir di berbagai bidang. Penyelesaian suatu masalah hidrogeologi dapat dianalisis dengan baik dan tepat, apabila dapat dibuat konsep model hidrogeologi itu sendiri. Konsep itu dapat dibuat dalam suatu model fisik, analog maupun model matematik yang dapat diselesaikan secara numerik dan analitik. Pembuatan model numerik dibuat apabila perhitungan secara analitis dan pengukuran di lapangan relatif sulit dilakukan. Model numerik yang dapat digunakan adalah model beda hingga maupun model elemen hingga (Thomas, 2011).

Serangkaian definisi metode elemen hingga dapat ditemukan dalam literatur yang sesuai. Secara praktis, definisi yang diturunkan dari yang asli oleh J. T. Oden paling cocok. Metode elemen hingga adalah metode numerik di mana setiap fungsi kontinu dapat didekati dengan model diskrit yang terdiri dari himpunan nilai fungsi yang diberikan (akhirnya dengan adalah turunan) pada sejumlah titik yang dipilih sebelumnya dalam domainnya, bersama-sama dengan perkiraan sepotong-sepotong dari fungsi di atas sejumlah subdomain terpisah yang terhubung (Kazda, 1990).

Ada sejumlah besar model numerik untuk mensimulasikan proses air tanah,

termasuk metode beda hingga dan elemen hingga, berdasarkan bentuk satu, dua, atau tiga dimensi dari persamaan Richard. Untuk memperhitungkan infiltrasi dan evapotranspirasi dalam metode ini, sebagai pengganti informasi meteorologi yang terperinci, batas atas model dan/atau zona akar biasanya ditetapkan sebagai fluks atau tinggi tekanan yang konstan atau bervariasi terhadap waktu. Berbeda dengan beberapa model neraca air, model numerik memungkinkan pengguna untuk secara lebih realistis mewakili sifat fisik media berpori, termasuk geologi kompleks dengan konduktivitas hidrolik dan karakteristik retensi air yang bervariasi secara spasial. Ketika batas bawah model ditentukan sebagai permukaan air, fluks air yang keluar dari dasar model merepresentasikan resapan air tanah (Weight, 2008).

Dasar dari pendekatan elemen hingga untuk masalah rembesan merupakan pendekatan energi. Mempertimbangkan laju disipasi energi dalam kubus tanah dasar pada Gambar 2.12, dapat ditunjukkan bahwa laju aliran, per satuan volume elemen mengatasi hambatan gesekan untuk mengalir adalah (Bromhead, 1992):

$$\frac{\Delta W}{\Delta V} = k_x \left\{ \frac{d\phi}{dx} \right\}^2 + k_y \left\{ \frac{d\phi}{dy} \right\}^2 + k_z \left\{ \frac{d\phi}{dz} \right\}^2 \dots\dots\dots (2.19)$$