

TESIS

**KEMANTAPAN PENYANGGA PADA LUBANG BUKAAN
END PORTAL PLTA KERINCI MERANGIN
PROVINSI JAMBI**

*Support Stability of Tunnel End Portal at Kerinci Merangin
Hydropower Jambi Province*

**APRIADI SAPUTRA
D062201001**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK GEOLOGI
DEPARTEMEN TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

**KEMANTAPAN PENYANGGA PADA LUBANG BUKAAN
END PORTAL PLTA KERINCI MERANGIN
PROVINSI JAMBI**

*Support Stability of Tunnel End Portal at Kerinci Merangin
Hydropower Jambi Province*

**APRIADI SAPUTRA
D062201001**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK GEOLOGI
DEPARTEMEN TEKNIK GEOLOGI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**KEMANTAPAN PENYANGGA PADA LUBANG BUKAAN
END PORTAL PLTA KERINCI MERANGIN
PROVINSI JAMBI**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister Teknik Geologi
pada Program Pasca Sarjana Teknik Geologi Universitas Hassanudin

Disusun dan diajukan oleh

**APRIADI SAPUTRA
D062 20 1001**

Kepada

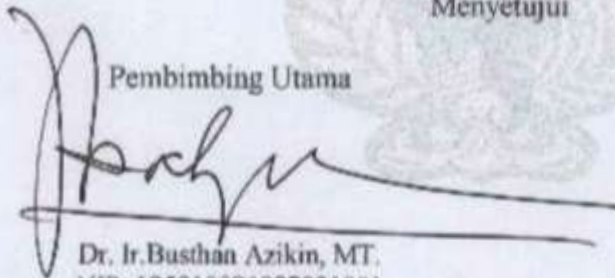
**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS**KEMANTAPAN PENYANGGA PADA LUBANG BUKAAN
END PORTAL PLTA KERINCI MERANGIN
PROVINSI JAMBI****APRIADI SAPUTRA
D062 20 1001**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Magister Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 25 Juli 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

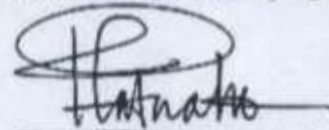
Menyetujui

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Bushan Azikin, MT.
NIP. 195910081987031001

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Hj. Ratna Husain L., MT.
NIP. 195902021986012001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST. MT.
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Geologi

Dr. Eng. Meutia Farida, ST. MT.
NIP. 1973100320001220001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Apriadi Saputra
Nomor Mahasiswa : D062 20 1001
Program Studi : Teknik Geologi

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul Kemantapan Penyangga pada Lubang Bukaan End Portal PLTA Kerinci Merangin Provinsi Jambi adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Ir. Busthan Azikin, MT. sebagai Pembimbing Utama dan Dr. Ir. Hj. Ratna Husain L., MT. sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam daftar pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini dalam proses publikasikan oleh *IOP* terindeks *Scopus* sebagai artikel yang berjudul Kajian Metode Penyanggaan Terowongan Berdasarkan Kelas Massa Batuan Menggunakan Metode *Rock Mass Rating (RMR)* dan *Q-System* di PLTA Kerinci Merangin, Provinsi Jambi.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada universitas Hasanuddin.

Gowa, 25 Juli 2023
Saya menyatakan

Apriadi Saputra



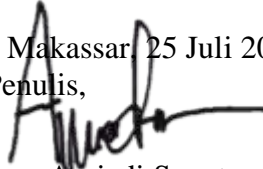
KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmatnya sehingga tesis ini dapat diselesaikan.

Adapun judul tesis ini adalah “Kemantapan Penyangga pada Lubang Bukaan End Portal PLTA Kerinci Merangin Provinsi Jambi” yang kemudian menjadi salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi Magister Teknik Geologi Universitas Hasanuddin. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada jajaran petinggi Universitas Hasanuddin:

1. Dr. Ir. Busthan Azikin, MT. sebagai Pembimbing Utama.
2. Dr. Ir. Hj. Ratna Husain L., MT. sebagai Pembimbing Pendamping.
3. Dr. Eng. Hendra Pachri, S.T., M.Eng. sebagai Ketua Departemen Jurusan Teknik Geologi Universitas Hasanuddin.
4. Dr. Eng. Meutia Farida, ST., MT. sebagai Ketua Program Studi Magister Teknik Geologi Universitas Hasanuddin.
5. Prof. Dr. Eng. Ir Muh. Isran Ramli ST., MT. sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Prof. Dr. Ir Jamaluddin Jompa, MSc. sebagai Rektor Universitas Hasanuddin Makassar.
7. Dr. Ir. Kaharuddin., MT, Dr. Ir. Hamid Umar, MS, dan Dr. Sultan, ST., MT. sebagai tim penguji tesis penulis.
8. Bapak dan ibu dosen Department Teknik Geologi Unhas.
9. Anshar Abdullah, MT sebagai Pembimbing Lapangan.
10. Bapak dan Ibu tercinta penulis mengucapkan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan motivasi mereka selama penulis menempuh pendidikan di Universitas Hasanuddin.

Akhir kata izinkan penulis mengucapkan permintaan maaf kepada Almarhum bapak karena penulis tidak mampu menyelesaikan dan memperlihatkan karya ilmiah ini pada saat beliau masih hidup.

Makassar, 25 Juli 2023
Penulis,

Apriadi Saputra

ABSTRAK

APRIADI S. *Kemantapan Penyangga pada Lubang Buka End Portal PLTA Kerinci Merangin Provinsi Jambi.* (dibimbing oleh **Busthan Azikin** dan **Ratna Husain**)

Ekskavasi pembangunan terowongan di PLTA Kerinci Merangin Provinsi Jambi merupakan pekerjaan yang kompleks, karena akan selalu berhadapan dengan kondisi ketidakstabilan. Salah satu cara untuk menghadapi ketidakstabilan pada atap dan dinding terowongan adalah dengan menentukan kondisi massa batuan pada terowongan dan mengetahui jenis kombinasi penyanggaan yang akan digunakan. Penelitian ini menggunakan metode empirik klasifikasi *Rock Mass Rating (RMR)* dan *Q-System* dan Metode numerik untuk memperhitungkan kondisi tegangan pada face terowongan. Hasil penentuan klasifikasi massa batuan berdasarkan *RMR* menunjukkan kualitas batuan berada pada *fair rock* dan *poor rock*. Sedangkan kelas massa batuan berdasarkan *Q-System* termasuk kualitas batuan *very poor*. Rekomendasi penyanggaan pada face terowongan menurut *RMR* menggunakan kombinasi penyangga rockbolt, shotcrete dan wire mesh. Sedangkan rekomendasi penyanggaan menurut *Q-System* adalah dengan kombinasi penyangga rockbolt dan shotcrete. Pemodelan secara numerik untuk memperlihatkan kondisi tegangan massa batuan dilakukan dengan beberapa simulasi yaitu dengan tanpa penyangga, dengan penyangga actual dilapangan, penyangga dengan rekomendasi *RMR*, serta penyangga dengan rekomendasi *Q-sistem*. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa kondisi massa batuan pada daerah penelitian akan mendapatkan faktor keamanan lebih tinggi dan baik jika menggunakan rekomendasi *RMR* (FK=3,71).

Kata kunci : Penyangga, *RMR*, *Q-System*, PLTA Kerinci, Jambi

ABSTRACT

APRIADI S. Support Stability of Tunnel End Portal at Kerinci Merangin Hydropower Jambi Province (supervised by **Busthan Azikin** and **Ratna Husain**)

Excavating tunnel construction at the Kerinci Merangin hydropower plant in Jambi Province is a complex job, because it will always be faced with conditions of instability. One of the ways to deal with the instability of the tunnel roof and walls is to determine the condition of the rock mass in the tunnel and to know the type of support combination to be used. This study uses an empirical method of *Rock Mass Rating (RMR)* and *Q-System* classification and a numerical method to calculate the stress conditions on the tunnel face. The results of determining the rock mass classification based on the *RMR* showed that the rock quality was in the fair rock and poor rock. Meanwhile, the rock mass class based on the *Q-System* included very poor rock quality. Recommendations for supporting the tunnel face according to *RMR* use a combination of rockbolt supports, shotcrete and wiremesh. While the support recommendation according to the *Q-System* is a combination of rockbolt and shotcrete supports. Numerical modeling to show the stress conditions of the rock mass is carried out with several simulations, without using a supports, with actual supports in the field, supports with *RMR* recommendations, and supports with *Q-system* recommendations. The results of this simulation indicate that the condition of the rock masses in the study area will get a higher and better safety factor if using the *RMR* recommendation (FK = 3.71).

Keyword : Support, *RMR*, *Q-System*, Kerinci Hydropower, Jambi

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS	ii
PERSETUJUAN TESIS	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	2
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Geologi Regional	4
2.1.1 Geomorfologi	4
2.1.2 Stratigrafi.....	6
2.1.3 Struktur Geologi.....	7
2.2 Klasifikasi Massa Batuan	9
2.3 Kekuatan Massa Batuan Hoek-Brown	13
2.4 Tegangan Insitu	15

2.5	Sistem Penyangga Pada Lubang Bukaannya	17
2.6	Metode Elemen Hingga	20
2.7	Perhitungan Faktor Keamanan	20
BAB III METODE PENELITIAN		
3.1	Rancangan Penelitian	22
3.2	Lokasi dan Kesampaian Daerah	22
3.3	Teknik Pengumpulan Data	23
3.4	Pengujian Laboratorium	23
3.5	Teknik Pengolahan Data	23
3.6	Analisis Data	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Pengujian Laboratorium	26
4.1.1	Pengujian Petrografi	26
4.1.2	Pengujian Sifat Fisik	27
4.1.3	Pengujian Sifat Mekanik	27
4.2	Klasifikasi Massa Batuan	27
4.2.1	Rock Mass Rating (RMR)	28
4.2.2	Rekomendasi Penyangga Berdasarkan RMR	33
4.2.3	Klasifikasi Massa Batuan System-Q	33
4.2.4	Rekomendasi Penyangga Berdasarkan System-Q	34
4.3	Analisis Numerik	36
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	52
DAFTAR PUSTAKA		53
LAMPIRAN		55

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
Tabel 2.1 Klasifikasi Parameter dan Pembobotan RMR.....	11
Tabel 2.2 Panduan Penyanggaan Berdasarkan RMR	12
Tabel 2.3 Faktor kerusakan pada penggalian bawah tanah	15
Tabel 4.1 Hasil pengujian bobot isi	27
Tabel 4.2 hasil uji kuat tekan batuan	27
Tabel 4.3 Hasil penentuan kelas massa batuan pada face 1	29
Tabel 4.4 Hasil Penentuan kelas massa batuan pada face 2	30
Tabel 4.5 Hasil penentuan kelas massa batuan pada face 3	31
Tabel 4.6 Hasil rekapitulasi parameter RMR	32
Tabel 4.7 Kelas massa batuan menurut RMR	32
Tabel 4.8 Rekomendasi penyangga berdasarkan nilai RMR.....	33
Tabel 4.9 Hasil konversi nilai RMR terhadap system Q	34
Tabel 4.10 Harga ESR untuk berbagai jenis tujuan penggalian.....	34
Tabel 4.11 Hasil Rekomendasi Penyangga Sistem-Q	36
Tabel 4.12 Properties material untuk input pemodelan.....	39
Tabel 4.13 Properties Penyangga	40
Tabel 4.14 Rekapitulasi nilai σ_1 , σ_3 dan hasil perhitungan FK simulasi I	43
Tabel 4.15 Rekapitulasi nilai σ_1 , σ_3 dan hasil perhitungan FK simulasi II	44
Tabel 4.16 Rekapitulasi nilai σ_1 , σ_3 dan hasil perhitungan FK RMR	46
Tabel 4.17 Rekapitulasi nilai σ_1 , σ_3 dan hasil perhitungan FK RMR	47
Tabel 4.18 Rekapitulasi nilai σ_1 , σ_3 dan hasil perhitungan FK simulasi IV.....	49
Tabel 4.19 Nilai faktor keamanan tiap model lubang bukaan.....	49

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
Gambar 2.1 Peta geologi lembar sungai penuh dan ketaun.....	5
Gambar 2.2 Kenampakan geomorfologi regional dari citra SRTM.....	6
Gambar 2.3 Peta geologi lokal lubang bukaan endportal.....	7
Gambar 2.4 Peta geologi lubang bukaan PLTA kerinci.....	8
Gambar 2.5 Baut-batuan (rockbolt).....	18
Gambar 2.6 Beton tembak (Shotcrete).....	18
Gambar 2.7 Kawat baja (wiremesh).....	19
Gambar 2.8 Steel set.....	19
Gambar 2.9 Kriteria keruntuhan mohr-coulomb.....	21
Gambar 3.1 Peta lokasi penelitian PLTA kerinci merangin.....	23
Gambar 3.2 Bangan Alir Penelitian.....	25
Gambar 4.1 Kenampakan sampel secara makroskopis dan mikroskopis.....	26
Gambar 4.2 Kondisi bidang diskontinu pada lokasi face terowongan.....	28
Gambar 4.3 Kurva rekomendasi penyangga berdasarkan Q-system.....	36
Gambar 4.4 Geometri model.....	37
Gambar 4.5 Diskretisasi Model dan kondisi batas.....	38
Gambar 4.6 Titik pengamatan lubang bukaan.....	41
Gambar 4.7 Nilai σ_1 pada simulasi I sebelum dilakukan penyangga.....	42
Gambar 4.8 Nilai σ_3 pada simulasi I sebelum dilakukan penyangga.....	42
Gambar 4.9 Nilai σ_1 pada simulasi II menggunakan penyangga actual.....	43
Gambar 4.10 Nilai σ_1 pada simulasi II menggunakan penyangga actual.....	44
Gambar 4.11 Nilai σ_1 STA 8+869 menggunakan penyangga RMR kelas III.....	45
Gambar 4.12 Nilai σ_3 STA 8+869 dengan penyangga RMR kelas III.....	45
Gambar 4.13 Nilai σ_1 STA 8+875, 8+881 dengan penyangga RMR kelas IV.....	46
Gambar 4.14 Nilai σ_3 STA 8+875, 8+881 dengan penyangga RMR kelas IV.....	47
Gambar 4.15 Nilai σ_1 pada simulasi II menggunakan penyangga system Q.....	48
Gambar 4.16 Nilai σ_3 pada simulasi II menggunakan penyangga system Q.....	48

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
Lampiran 1 Hasil Pengujian Petrologi.....	55
Lampiran 2 Hasil Pengujian Sifat Fisik.....	57
Lampiran 3 Hasil Pengujian Kuat Tekan	58
Lampiran 4 Pengamatan Face pada Lubang Bukaan.....	60
Lampiran 5 Hasil Properties Massa Batuan Software Rocklab.....	68

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Singkatan/Istilah	Arti/Keterangan
End portal	Area kerja/ Bagian akhir dari terowongan PLTA Kerinci
Face	Muka terowongan/ bagian akhir dari excavasi
Excavasi	Kemajuan penggalian terowongan
Geomorfologi	Bentuk alam
mdpl	Meter di atas permukaan laut
Relief	Perbedaan ketinggian antar permukaan
Fisiografi	Karakter fisik
Kontinen	Benua
Konvergen	Gerakan lempeng yang saling bertabrakan
Subduksi	Zona pertemuan dua lempeng yang menimbulkan lipatan dll.
Menganan	Menunjukkan arah pergerakan sesar relatif ke kanan
Lubang bukaan	Terowongan
RMR	Rock mass rating
Sistem-q	Klasifikasi menggunakan kualitas batuan index
Span	Area excavasi yang belum disupport
σ (sigma)	Tegangan
σ_1	Tegangan mayor
σ_3	Tegangan minor
c	Cohesi
ϕ	Sudut geser dalam
γ	Bobot Isi
ν	Poisson Ratio
Rockbolt	Penyangga baut
Shotcrete	Beton tembak
Wiremesh	Kawat baja
FK	Faktor keamanan

Properties batuan	Sifat/karakteristik batuan
ESR	(Excavation Support Ratio) Fungsi dari terowongan
RQD	Rock Quality Designation, memperkirakan kualitas batuan
Diskontinuitas	Bidang pemisah massa batuan
Fault	Patahan/sesar
Kemantapan	Kestabilan/kesimbangan
Penyangga	Alat pembantu untuk massa batuan dalam meningkatkan kekuatannya.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Provinsi Jambi, Kabupaten Kerinci terdapat Pembangkit Listrik Tenaga Air bernama PLTA Kerinci Merangin. Hasil kajian yang telah dilakukan PLTA ini menggunakan lubang bukaan sebagai jalur air (*waterway*) sepanjang 12 km dengan beda elevasi awal lubang bukaan sampai akhir lubang bukaan *End Portal* adalah 400 meter dan ditargetkan akan menghasilkan tenaga listrik berkapasitas 350 MW (4 X 87,5 MW) (Abdullah, 2021). Permasalahan yang sering dihadapi dalam konstruksi lubang bukaan adalah potensi ketidakstabilan atap dan dinding lubang bukaan akan mengakibatkan runtuhnya lubang bukaan. yang berimbas pada keselamatan pekerja, kerusakan alat, kerusakan system penyangga hingga gagalnya beroperasi fungsi konstruksi (Hoek et al., 1998; Koesnaryo, 1999 dalam Lama, 2017). Lokasi pengambilan data pada area *End Portal* merupakan batuan slate yang diketahui memiliki struktur foliasi dan terbentuk dari suhu dan tekanan yang rendah. Hal ini menjadi tantangan bagi peneliti untuk memperoleh kestabilan pada lubang bukaan.

Ketidakmampuan lubang bukaan menurut Hoek and Brown (1980) dapat disebabkan oleh struktur geologi yang merugikan, tegangan pada batuan yang berlebihan, *swelling*, dan karena tekanan atau aliran air tanah yang berlebihan. Untuk meningkatkan kemampuan lubang bukaan dilakukan dengan penilaian stabilitas penggalian bawah permukaan menggunakan tiga metode yakni analitik, metode empirik dan metode observasi (Ridho, 2019; Bieniawski 1989). Penilaian stabilitas penggalian bawah tanah dapat digunakan metode rancangan dimana dibedakan menjadi 3 kategori yakni metode analitik, metode empirik dan metode observasi. Metode analitik digunakan untuk menganalisis tegangan dan deformasi di sekitar lubang bukaan. Metode empirik menggunakan analisis berdasarkan pengalaman praktisi terdahulu untuk mendapatkan kestabilan lubang bukaan sedangkan metode observasi didasarkan pada pemantauan massa batuan.

Penerapan sistem penyangga untuk menyangga atap dan dinding lubang bukaan diharapkan dapat menjadi kekuatan massa batuan dan mencegah pergerakan dari massa batuan sehingga lubang bukaan menjadi stabil.

1.2 Rumusan Masalah

Lubang bukaan PLTA Kerinci Merangin khususnya pada area *End Portal* di dominasi oleh batuan slate yang diketahui memiliki karakter berbutir halus dan berfoliasi dan berdasarkan hasil pengamatan *face* lubang bukaan menunjukkan kondisi batuan yang tidak menguntungkan. Berdasarkan hal ini, menjadi tantangan bagi peneliti untuk memperoleh kestabilan dengan rumusan masalah sebagai berikut.

1. Bagaimana kekuatan massa batuan pada lubang bukaan *End Portal*?
2. Bagaimana sistem penyangga secara empirik pada lubang bukaan *End Portal*?
3. Bagaimana sistem penyangga yang tepat untuk mendapatkan kemantapan lubang bukaan melalui pemodelan numerik?

1.3 Tujuan Penelitian

Memperoleh kestabilan dalam lubang bukaan menjadi tujuan utama dalam penelitian ini, kestabilan diperoleh dengan dua metode yakni dengan metode empirik untuk menentukan kondisi massa batuan pada *face* lubang bukaan, serta menentukan kombinasi penyangga yang tepat pada dinding dan atap terowongan. Dan metode numerik dengan memperoleh tegangan untuk menentukan faktor keamanan pada titik pengamatan di dinding dan atap lubang bukaan. Alur tujuan untuk memperoleh kestabilan adalah sebagai berikut.

1. Memperoleh kondisi kekuatan massa batuan pada lubang bukaan *End Portal*.
2. Memperoleh sistem penyangga secara empirik pada lubang bukaan *End Portal*.
3. Menganalisis sistem penyangga yang tepat untuk mendapatkan kemantapan lubang bukaan melalui pemodelan numerik.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat secara teoritis maupun praktis.

1. Manfaat teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan, pengetahuan, serta dapat menjadi rujukan bagi peneliti selanjutnya dalam menganalisis kestabilan lubang bukaan di tempat yang lain pada kasus yang sama.

2. Manfaat praktis

Mengatasi masalah ketidakstabilan dan sebagai evaluasi penggunaan system penyangga lubang bukaan di *End Portal* PLTA Kerinci Merangin.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian dilakukan hanya pada *face* lubang bukaan di *End Portal* yang berfokus pada parameter massa batuan, dan tidak memperhitungkan beban bangunan sipil yang berada di atas permukaan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

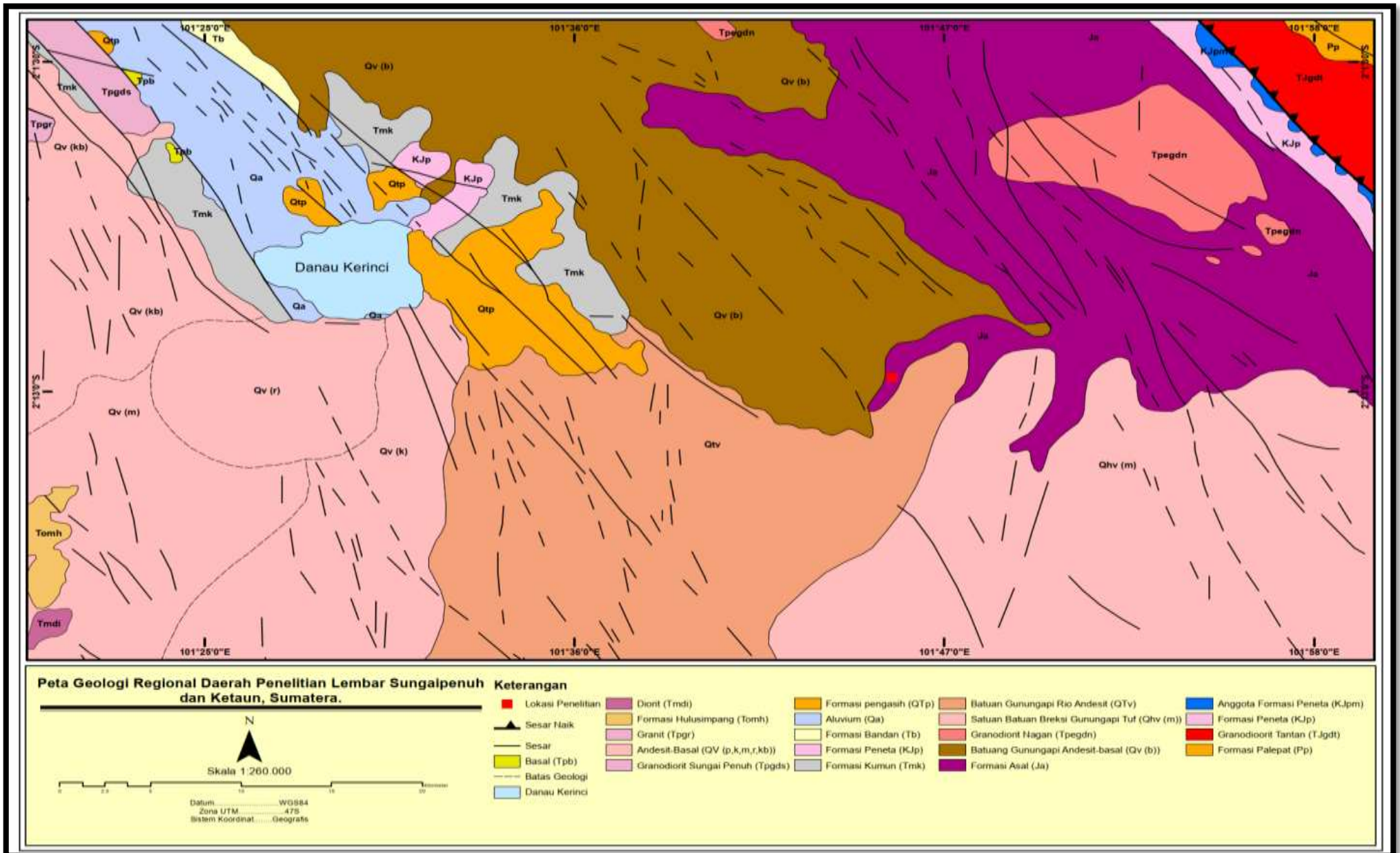
2.1 Geologi Regional

Berdasarkan peta geologi regional berskala 1:250.000 yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung, daerah penelitian masuk kedalam Peta Geologi Lembar Sungai Penuh dan Ketaun (Kusnama dkk., 1992) (Gambar 2.1).

2.1.1 Geomorfologi

Daerah penelitian merupakan geomorfologi perbukitan bergelombang dengan ketinggian berkisar antara 100 sampai 800 mdpl yang sebagian besar penduduknya mencari nafkah dengan berkebun. Menurut Dinas PUPR Kabupaten Kerinci (2015) berdasarkan *relief* dan batuan penyusunnya daerah penelitian dapat dibagi menjadi enam satuan geomorfologi.

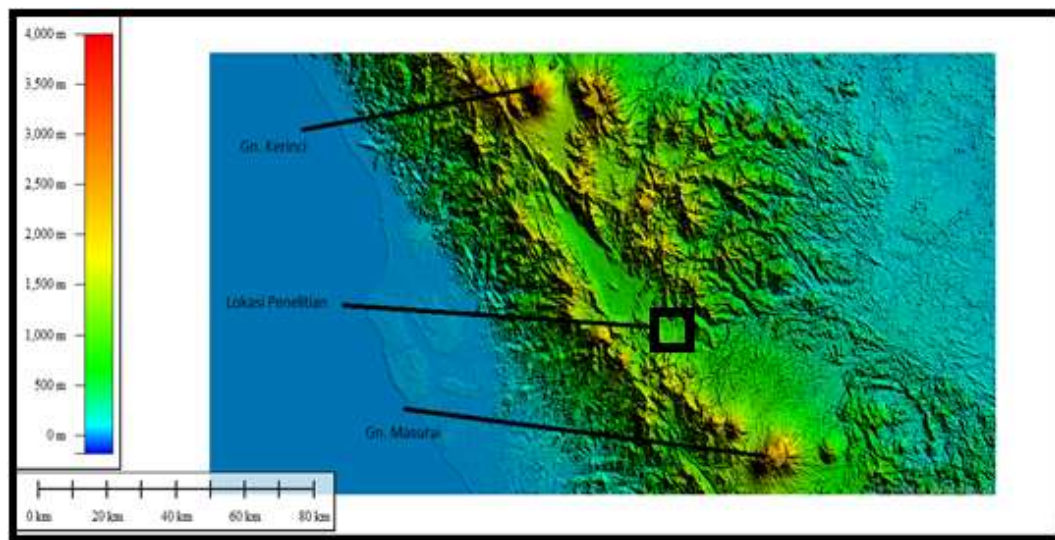
1. Pegunungan batuan pra-tercier, satuan ini berada di sebelah timur Kabupaten Kerinci yang memiliki sudut lereng yang cukup terjal (>16%), dengan litologi penyusunnya terdiri dari perselingan batu sabak, filit, dan batupasir.
2. Pegunungan batuan gunung api terciar, satuan ini berada di sebelah barat Kabupaten Kerinci dengan sudut lereng lereng yang terjal (>16%), dengan litologi penyusun terdiri dari breksi dan tuf.
3. Pegunungan batuan sedimen, satuan ini berada di sekitar Lembah Kerinci dan memiliki *soil* yang cukup tebal dikarenakan pelapukan yang cukup intensif. litologi penyusun dari pegunungan ini adalah batupasir, tuf, breksi dan konglomerat.
4. Pegunungan batuan intrusi, satuan ini berada di sebelah barat Kabupaten Kerinci. dengan morfologi pegunungan dengan puncak yang tumpul. Litologi penyusunnya terdiri atas granit dan granodiorit.
5. Pegunungan batuan gunung api kuarter, morfologi tersusun oleh batuan gunung api kuarter, beberapa di antaranya masih aktif, yaitu Gunungapi Kerinci, Gunungapi Raya, Gunungapi Kunyit.



Gambar 2.1 Sebagian Peta Geologi Lembar Sungai Penuh dan Ketaun (Kusmama dkk., 1992)

6. Kipas aluvial dan dataran aluvial, terbentang di lembah kerinci dengan batuan penyusun endapan aluvial.

Berdasarkan citra SRTM, geomorfologi regional lokasi penelitian berada di Tenggara Gunung Kerinci yang memiliki ketinggian 3.805 mdpl dan di Barat laut Gunung Masurai yang memiliki ketinggian 2935 mdpl (Gambar 2.2). Menurut Abdullah (2021) geomorfologi pada daerah ini sangat dipengaruhi oleh litologi penyusun perbukitan yang secara umum disusun oleh batuan vulkanik seperti andesit-basalt dan breksi lahar yang dominan tersingkap di lokasi penelitian.



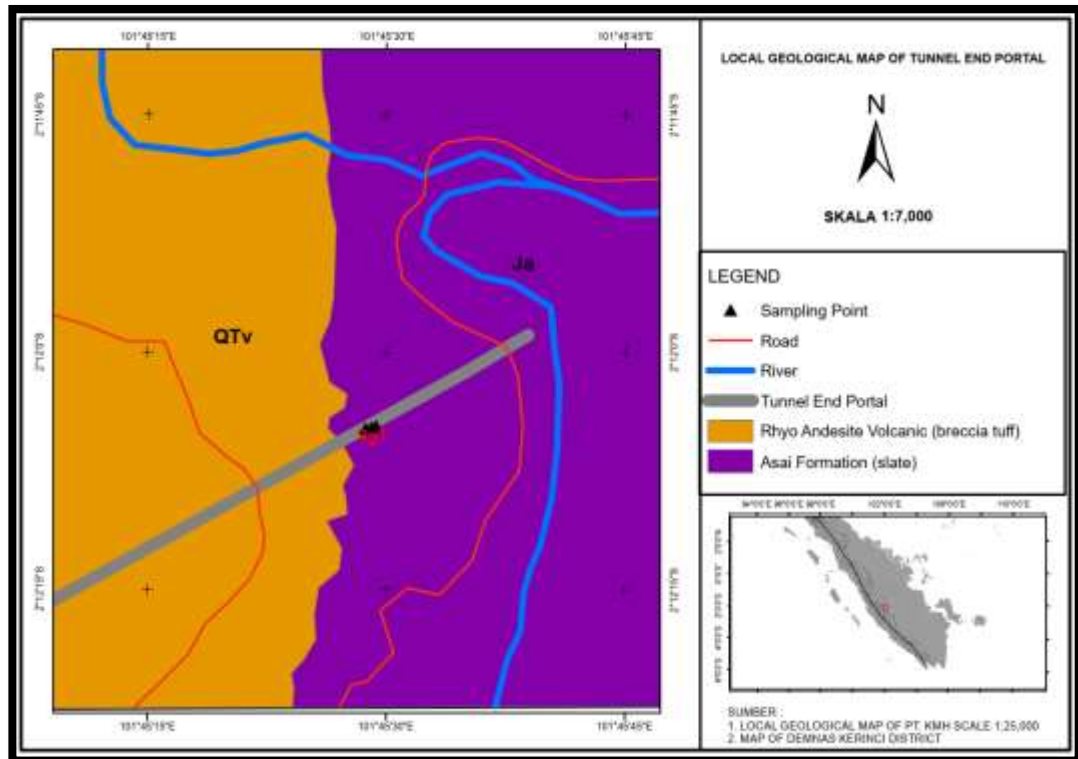
Gambar 2.2 Kenampakan geomorfologi regional (Citra SRTM).

2.1.2 Stratigrafi

Menurut Dinas PUPR Kabupaten Kerinci (2015) secara umum keadaan geologi wilayah Kabupaten Kerinci terletak pada penyebaran beberapa formasi batuan geologi, yaitu Formasi Asal, Formasi Pemeta, Formasi Bandan, Formasi Kumun, Formasi Pengasih, Batuan Gunung Api Rio-Andesit, Batuan Gunung Kuarter, Batuan Gunungapi Andesit-Basal, Batuan Gunungapi Berksi, Batuan Gunungapi Tuf, Endapan aluvium.

Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Sungai Penuh dan Ketaun, lokasi penelitian berada Formasi Asal (Ja) berumur Jura, yang terdiri dari perselingan batu sabak, filit, batulempung meta, batupasir meta, batulanau meta

dan tuf, yang memiliki ketebalan sekitar 2000 meter. Lokasi penelitian berada pada *End Portal* dari PLTA Kerinci Merangin dimana lubang bukaannya mengarah dari barat daya ke timur laut. Dengan Satuan Batuan Gunung Api Rio Andesit (QTv) meliputi breksi tuf, yang terkonsolidasi baik dengan breksi laharik. Lokasi sampling berada di bagian akhir terowongan (*End Portal*) pada Formasi Asal (Ja) yang merupakan interkalasi batu sabak/*slate* dan batupasir meta.

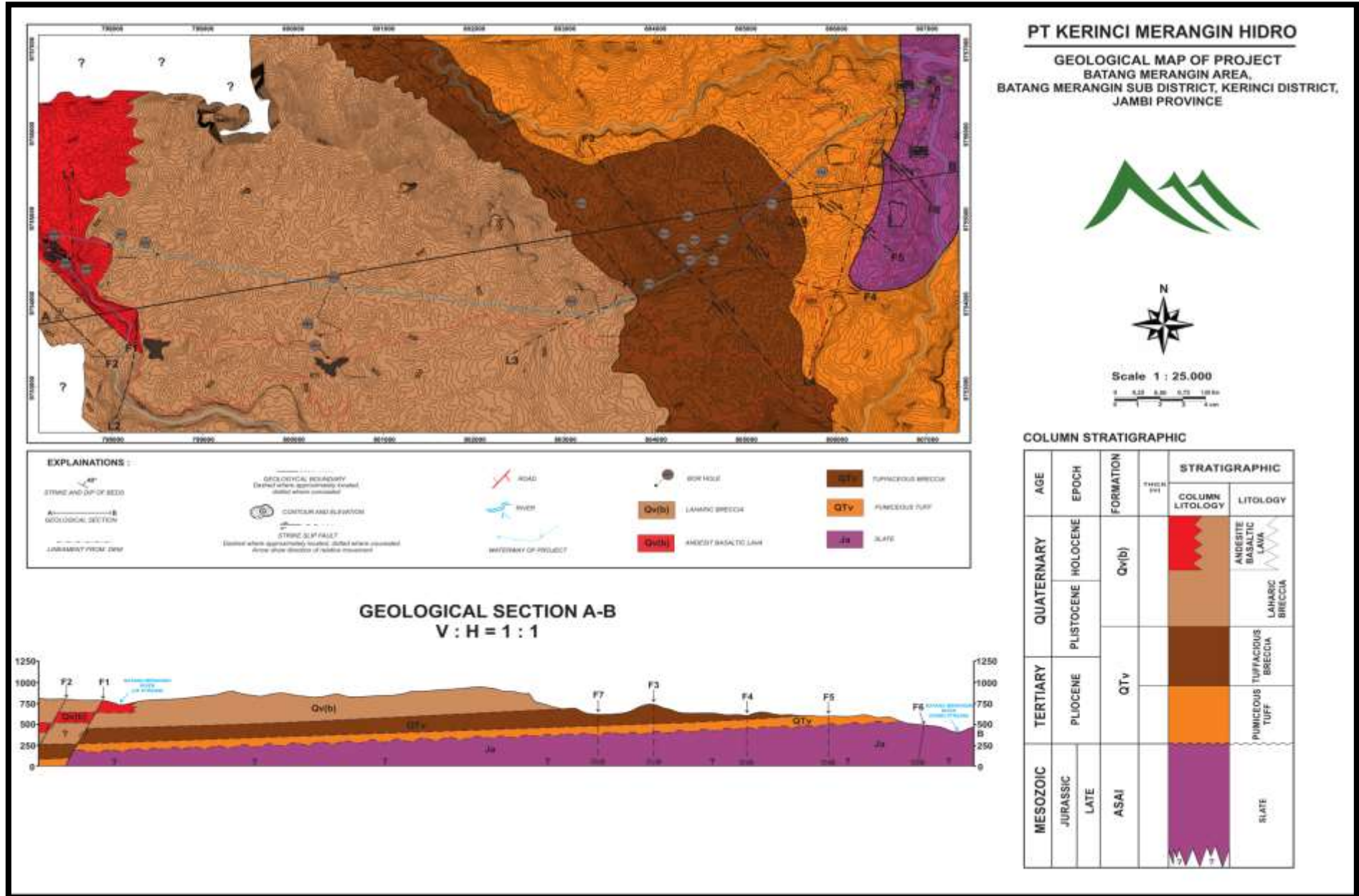


Gambar 2.3 Peta geologi lokal lubang bukaan *End Portal* (PT. KMH, 2021)

2.1.3 Struktur geologi

Menurut Nita & Junedi (2020) secara fisiografi Pulau Sumatra terletak di sebelah Barat Daya dari Kontinen Paparan Sunda dan merupakan jalur konvergen antara lempeng Hindia–Australia yang menyusup di sebelah barat lempeng Paparan Sunda. Hasil dari konvergen menghasilkan *subduksi* di *sepanjang palung sunda* dan pergerakan lateral mengangan dari sistem sesar Sumatra. Menurut Van Bemmelen (1949) dalam Nita & Junedi, (2020) pulau Sumatra terbagi kedalam 3 zona yaitu Perbukitan Barisan, zona Sesar Semangko dan Pola kelurusan.

Peta Geologi Lubang Bukaan PLTA Kerinci Merangin menunjukkan bahwa sepanjang lubang bukaan terdapat tujuh sesar dengan kode F1 sampai F7.



Gambar 2.4 Peta geologi lubang bukaan PLTA Kerinci (PT. KMH, 2021)

Dimana terdapat dua sesar normal dengan kode F1 dan F2 dan lima sesar geser dengan kode F3 sampai F7. Lokasi *End Portal* terdapat dua sesar geser (*strike-slip*) dengan kode F5 dan F6. Menurut Abdullah (2021) Dari hasil pengamatan DEM SRTM didapatkan pola kelurusan sebesar 11 pola kelurusan yang berarah barat laut (NW)–tenggara (SE) dan utara (N)–selatan (S). pada insvestigasi sebelumnya yang dilakukan oleh Nippon Koei terdapat dua sesar yang sudah di konfirmasi yaitu sesar normal (*normal fault*) dan sesar mendatar (*strike-slip fault*).

2.2 Klasifikasi Massa Batuan

Pada tahap studi kelayakan dan perancangan awal dari suatu proyek, dimana ketersediaan informasi tentang karakteristik massa batuan, tegangan, dan kondisi air tanah sangat kurang, penggunaan klasifikasi massa batuan dapat menjadi alternatif yang menguntungkan. Pendekatan ini dapat berfungsi sebagai daftar yang dibuat untuk memastikan bahwa semua informasi yang dibutuhkan telah diperhitungkan. Selain itu, penggunaan satu atau lebih klasifikasi massa batuan dapat memberikan gambaran mengenai komposisi dan karakteristik dari suatu massa batuan untuk memberikan perkiraan awal kebutuhan penyangga dan untuk memperkirakan kekuatan dan perubahan bentuk massa batuan (Patrick, 2013).

Klasifikasi massa batuan yang paling sering digunakan ada dua, yaitu klasifikasi Geomekanika atau *Rock Mass Rating (RMR)* (Bieniawski, 1989) dan Klasifikasi *Q-System* atau *Rock Tunnelling Quality Index* (Barton et al., 1974). Kedua metode ini memasukkan keadaan geologi, geometrik, dan parameter-parameter teknik dalam memberikan nilai kuantitatif terhadap kualitas massa batuan. Persamaan Sistem *RMR* dan *Q-System* adalah penggunaan beberapa parameter yang sama dalam menghitung penilaian kualitas massa batuan. Perbedaan kedua sistem terletak pada bobot yang berbeda untuk parameter yang sama dan ada beberapa parameter yang hanya dimiliki oleh masing-masing sistem (Patrick, 2013).

2.2.1 Klasifikasi Geomekanika (*Rock Mass Rating*).

Bieniawski (1976) mempublikasikan suatu klasifikasi massa batuan yang disebut Klasifikasi Geomekanika atau lebih dikenal dengan *Rock Mass Rating (RMR)*. Setelah bertahun-tahun, klasifikasi massa batuan ini telah mengalami penyesuaian dikarenakan adanya penambahan data masukan sehingga Bieniawski membuat perubahan *rating* pada parameter yang digunakan untuk penilaian klasifikasi massa batuan tersebut. Pada penelitian ini, klasifikasi massa batuan yang digunakan adalah klasifikasi massa batuan versi tahun 1989 (Bieniawski, 1989). Terdapat 5 (lima) parameter utama dan 1 (satu) parameter pengontrol yang digunakan dalam klasifikasi *RMR* yaitu:

1. Kuat tekan uniaxial batuan utuh (*intact rock*).
2. *Rock Quality Designation (RQD)*.
3. Spasi bidang diskontinyu.
4. Kondisi bidang diskontinyu.
5. Kondisi air tanah.
6. Orientasi/arah bidang diskontinyu.

Pada penggunaan sistim klasifikasi ini, massa batuan dibagi kedalam daerah struktural yang memiliki kesamaan sifat berdasarkan parameter di atas dan klasifikasi massa batuan untuk setiap daerah tersebut dibuat terpisah. Batas dari daerah struktur tersebut biasanya disesuaikan dengan kenampakan perubahan struktur geologi seperti patahan, perubahan kerapatan kekar, dan perubahan jenis batuan. Dalam klasifikasi massa batuan dengan *Rock Mass Rating (RMR)* sistem seperti disajikan pada (Tabel 2.1), setiap parameter yang ditinjau mempunyai nilai *rating* tersendiri. Nilai dari setiap parameter tersebut kemudian dijumlahkan untuk memperoleh nilai *RMR*. Yang perlu mendapat perhatian pada penggunaan klasifikasi massa batuan dengan system *RMR* adalah pada pengaturan nilai untuk orientasi bidang diskontinyu. Pada bagian tersebut penilaian *rating* dibagi ke dalam 3 bagian yaitu: penilaian untuk terowongan, pondasi, dan lereng. Pada penelitian ini, nilai *rating* yang digunakan adalah nilai *rating* untuk terowongan.

Pembobotan klasifikasi massa batuan *Rock Mass Rating (RMR)* seperti pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Parameter dan pembobotan *RMR* (Bieniawski, 1989)

CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS							
1. Uniaxial Compressive Strength (UCS)							
UCS (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
Rating	15	12	7	4	2	1	0
2. Rock Quality Design (RQD)							
RQD (%)	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
Rating	20	17	13	8	3		
3. Spacing of Discontinuities (SJ)							
spacing	> 2 m	0,6 - 2 m	200-600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
rating	20	15	10	8	5		
4. Condition of discontinuities (CJ)							
Persistence	Length (m)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20	
	rating	6	4	2	1	0	
Separation	Aperture (mm)	none	< 0,1	0,1 - 1	1 - 5	> 5	
	rating	6	5	4	1	0	
Roughness	Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided	
	rating	6	5	3	1	0	
Infilling	Gouge (mm)	none	Hard <5	Hard >5	Soft <5	Soft >5	
	rating	6	4	2	2	0	
Weathering	Weathering	Unweathered	Slightly W.	Moderately W.	Highly W.	Decomposed	
	rating	6	5	3	1	0	
5. Groundwater (GW)							
Condition	Dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
Rating	15	10	7	4	0		
6. Rating adjustment for discontinuities (AJ)							
Strike Perpendicular to Tunnel Axis				Strike Parallel to Tunnel Axis		Irrespective of Strike	
Drive with Dip		Drive Against Dip		Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 0° - 20°	
Dip 45°-90°	Dip 20°-45°	Dip 45°-90°	Dip 20°-45°				
Very Favorable	Favorable	Fair	Unfavorable	Very Unfavorable	fair	fair	
Rating	-2	-5	-10	-12	-5	-5	
Rating & Class	81-100 (I)	61 - 80 (II)	41 - 60 (III)	21- 40 (IV)	< 20 (V)		
Deskripsi	Very Good R.	Good Rock	Fair Rock	Poor Rock	Very Poor R.		
Stand-up Time	20 Years	1 Years	1 weeks	10 hours	30 minutes		
Span	15 m span	10 m span	5 m span	2,5 m span	1 m span		

Tabel 2.2 Panduan penggalian dan penyanggaan lubang bukaan berdasarkan *RMR* (Bieniawski, 1989)

Rock mass class	Excavation	Rock bolts	Shotcrete	Steel sets
I - Very good rock RMR 81-100	Full face, 3 m advance.	Generally no support required except spot bolting		
II - Good rock RMR 61-80	Full face, 1-1.5 m advance. Complete support 20 m from face.	Locally, bolts in crown 3 m long, spaced 2.5 m with occasional wire mesh.	50 mm in crown where required.	None.
III - Fair rock RMR 41 - 60	Top heading and bench 1.5-3 m advance in top heading. Commence support after each blast. Complete support 10 m from face.	Systematic bolts 4 m long, spaced 1.5-2 m in crown and walls with wire mesh.	50-100 mm in crown and 30 mm in side	None.
IV - Poor rock RMR 21-40	Top heading and bench 1 - 1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation, 10 m from face.	Systematic bolts 4-5 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh.	100-150 mm in crown and 100 mm in sides	Light to medium ribs spaced 1.5 m where required
V - Very poor rock RMR < 20	Multiple drift 0.5 - 1.5 m advance in top heading. Install support concurrently with excavation. Shotcrete as soon as possible after blasting.	Systematic bolts 5-6 m long, spaced 1-1.5 m in crown and walls with wire mesh. Bolt invert	150-200 mm in crown, 150 mm in sides, and 50 mm on face.	Medium to heavy ribs spaced 0.75 m with steel lagging and forepoling if required. Close invert

2.2.2 Klasifikasi Q-System (*Rock Tunnelling Quality Index*)

Berdasarkan evaluasi sebagian besar kasus kestabilan bawah permukaan, Barton dan kawan-kawan dari *Norwegian Geotechnical Insitute* mengusulkan indeks baru, *Rock Tunnelling Quality Index (Q)* untuk menentukan karakteristik massa batuan dan kebutuhan penyangga. Terdapat enam parameter yang digunakan dalam klasifikasi *Q-System*, yaitu (Barton et al., 1974) :

1. *Rock Quality Designation (RQD)*
2. Jumlah set kekar (*Jn*)
3. Kekasaran Permukaan Bidang Diskontinu (*Jr*)
4. Tingkat alterasi bidang diskontinu (*Ja*)
5. Kondisi hidrologi bidang diskontinu (*Jw*)
6. *Stress Reduction Factor (SRF)*

Menghitung nilai *Q-System* dapat menggunakan persamaan berikut (Barton et al, 1974).

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_n} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Dimana :

RQD = *Rock Quality Designation*

J_n = jumlah famili kekar

J_a = angka tingkat perubahan dan material pengisi kekar

J_w = faktor reduksi oleh air dalam kekar

SRF = *Stress Reduction Factor*

Menurut Bieniawski (1989) dalam Wibowo (2019) Untuk menentukan nilai *Q*, jika nilai *RMR* yang telah diketahui maka dapat dilakukan konversi nilai *RMR* ke *Q-System*. dengan korelasi nilai *RMR* dan *Q-System* dengan persamaan sebagai berikut.

$$Q = 10^{\frac{RMR - 50}{15}} \quad (2)$$

Dengan demikian aspek *SRF* tidak digunakan sebagai parameter tambahan dalam menentukan nilai *Q*.

2.2.3 Geological Strength Index (GSI)

Geological Strength Index (GSI) diperkenalkan oleh (Hoek et al., 1998) untuk memperkirakan pengurangan kekuatan massa batuan yang disebabkan oleh kondisi geologi yang berbeda. Kekuatan massa batuan terkekarkan tergantung kekuatan utuh dan bebas tidaknya blok-blok batuan yang menyusun massa batuan untuk jatuh dan berotasi pada kondisi tegangan yang berbeda. Hal tersebut dikontrol oleh bentuk geometri dari blok-blok batuan penyusun massa batuan maupun kondisi permukaan bidang pemisah antar blok-blok batuan tersebut. Penentuan nilai GSI berdasarkan hubungan dengan *RMR* (Bieniawski, 1989) sebagai berikut :

$$GSI = RMR - 5 \quad (3)$$

2.3 Kekuatan Massa Batuan Hoek-Brown

Hoek and Brown (1980) mengusulkan sebuah metode untuk menduga kekuatan massa batuan terkekarkan. Kriteria Hoek-Brown dikembangkan

berdasarkan pengalaman proyek berbagai Negara. Kemudian kriteria tersebut mengalami perubahan versi atau update pada tahun 1988 dan 1992 dan hasil penggabungan bentuk awal dan modifikasinya diperoleh persamaan kriteria runtuh Hoek-Brown *generalized Hoek-Brown* (Hoek et al., 2002) :

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left[m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right]^a \quad (4)$$

Dimana :

- σ_1 = tegangan utama mayor
- σ_3 = tegangan utama minor
- σ_c = kuat tekan uniaksial batuan conto utuh
- m_b, s, a = konstanta Hoek-Brown

nilai m_b adalah konstanta untuk massa batuan, s dan a adalah konstanta yang bergantung pada karakteristik massa batuan. Nilai m_i dapat diperoleh dari konstanta untuk *intact rock*. Disamping menentukan konstanta massa batuan m dan s dari pengaruh tegangan air pori, kriteria runtuh juga dapat menentukan kohesi (c) massa batuan dan sudut geser dalam (ϕ) massa batuan.

2.3.1 Hubungan Mohr-Coulomb dengan Hoek-Brown




Hubungan kriteria Mohr-Coulomb dengan Hoek-Brown dapat dipakai untuk untuk menentukan kohesi, sudut geser serta *properties* massa batuan yang dibutuhkan sebagai *input software phase 2. Roclab* adalah sebuah perangkat lunak untuk menentukan parameter kekuatan massa batuan, berdasarkan kriteria keruntuhan Hoek-Brown. *Roclab* menyediakan implementasi sederhana mengenai sifat-sifat massa batuan yang nantinya akan digunakan sebagai data masukan bagi program analisis numerik seperti *Phase2*. Berikut langkah-langkah menggunakan program *Roclab* :

1. Buka aplikasi *Roclab*
2. Masukkan data kuat tekan uniaksial (UCS), GSI, nilai konstanta 'mi' dan disturbance faktor (D). Setelah data tersebut dimasukkan, maka parameter massa batuan muncul secara otomatis.
3. Menyimpan file tersebut dan Meng-copy data tersebut apabila akan digunakan pada program *Phase2*.

2.3.2 Faktor kerusakan (*Disturbance Factor*)

Mendesain suatu lubang bukaan pada suatu lubang bukaan dengan kriteria Hoek–Brown dengan asumsi massa batuan tidak terganggu ($D=0$) adalah terlalu *optimistic* (Hoek et al., 2002), Kerusakan massa batuan dapat disebabkan oleh adanya kegiatan peledakan dan metode penggalian (Tabel 2.3). dalam mempertimbangkan dan mengestimasi kekuatan massa batuan perlu mempertimbangkan faktor kerusakan.

Tabel 2.3 Panduan untuk memperkirakan faktor kerusakan pada penggalian bawah tanah (Hoek et al., 2002)

Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of D
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	$D = 0$
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass. Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	$D = 0$ $D = 0.5$ No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	$D = 0.8$

2.4 Tegangan Insitu

Tegangan insitu merupakan tegangan alamiah yang bekerja di dalam massa batuan yang terdiri dari tegangan gravitasi, tegangan tektonik, tegangan sisa dan tegangan Thermal. Batuan pada kedalaman tertentu memiliki tegangan (*stress*) yang timbul akibat keberadaan lapisan yang berada tepat di atasnya dan yang timbul akibat peristiwa tektonik. Sebelum dilakukan penggalian, massa

batuan dalam kondisi setimbang. Setelah dilakukan penggalian kesetimbangan tersebut terganggu dan dapat mengubah distribusi tegangan awal. Tegangan terdiri dari tegangan vertikal dan tegangan horizontal. Pendekatan yang dilakukan untuk mengetahui tegangan vertikal adalah dengan asumsi berat batuan yang dari permukaan dikali dengan kedalaman dari permukaan sampai ke bukaan (Hoek et al., 1998).

$$\sigma_v = \gamma z \quad (5)$$

Dimana :

σ_v = Tegangan vertikal (MPa)

γ = Bobot isi batuan (MPa)

z = Kedalaman (m)

Sementara untuk mengestimasi tegangan horizontal jauh lebih sulit dibandingkan dengan tegangan vertikal. Biasanya, perbandingan tegangan horizontal terhadap tegangan vertikal diasumsikan dengan k , maka :

$$\sigma_h = k\sigma_v = k\gamma z \quad (6)$$

Dimana :

σ_h = Tegangan Horizontal (MPa)

γ = Bobot isi batuan (MN/m³)

z = Kedalaman (m)

Terzaghi & Richart (1952) mengusulkan bahwa gravitasi tidak mempengaruhi nilai k , maka dari itu didapatkan persamaan

$$k = \frac{\nu}{1-\nu} \quad (7)$$

Dimana :

ν = Poisson Ratio

Persamaan untuk menentukan k dengan rumus

$$k = 0,25 + 7Eh \left(0,001 + \frac{1}{z} \right) \quad (8)$$

Dimana :

E_h = Modulus deformasi bagian atas dari kulit bumi yang diukur pada arah horizontal (GPa)

z = Kedalaman (m)

Berbagai persamaan dibuat oleh para ahli untuk mengestimasi tegangan horizontal pada massa batuan. Sampai saat ini belum ada persamaan yang pasti untuk menentukan besarnya tegangan horizontal pada massa batuan. Semua persamaan sebatas pendekatan.

2.5 Sistem Penyangga pada Lubang Buka

Sistem penyangga merupakan peralatan yang digunakan untuk membantu massa batuan yang mendapatkan distribusi tegangan disekitar lubang bukaan akibat penggalian, agar dapat meningkatkan kekuatannya. Menurut sifatnya, penyanggaan terbagi menjadi dua yaitu :

2.5.1 Penyanggaan aktif (*active support*)

Penyanggaan Aktif (*Active Support*) merupakan sistem penyangga yang bersifat memperkuat massa batuan secara langsung. Penyangga aktif yang telah dipasang langsung memberikan tegangan awal terhadap massa batuan. Salah satu contoh penyangga aktif adalah *rockbolt*.

1. *Rockbolt* (Baut Batuan)

Baut batuan adalah penyangga yang mempunyai dua tujuan yaitu: menyangga batuan yang berpotensi runtuh, dan menahan atau menghentikan perpindahan permukaan lubang bukaan. Kedua tujuan dari baut batuan tersebut akan berfungsi sebagai penahan, penekan dan penguat. Menurut Hoek et al., (1998) Terdapat beberapa jenis *rockbolt* yaitu *mechanically anchored rockbolt* dan *resin anchored rockbolts*. Sedangkan dowel terbagi dalam 3 jenis yaitu *grouted dowel*, *frictional dowel* atau *split set* dan *swellex dowel*. Terdapat pula beberapa perlengkapan penunjang yang digunakan bersama dengan baut batuan, antara lain *Face Plate*, *WireMesh*, dll.



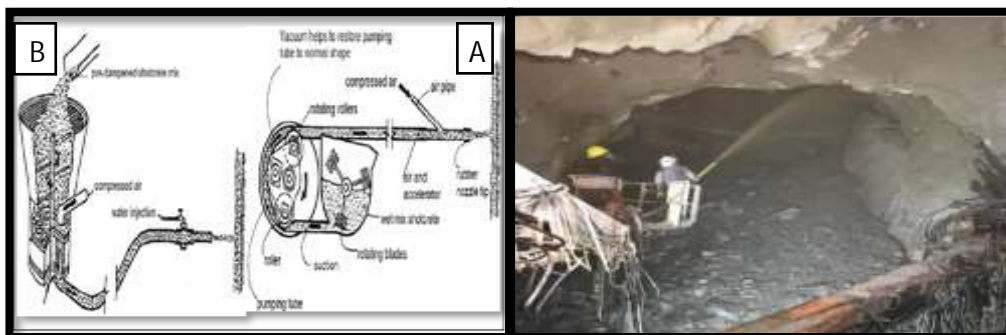
Gambar 2.5 Baut-batuan (*rockbolt*) (Ahmad, 2020)

2.5.2 Penyanggaan pasif (*passive support*)

Penyanggaan pasif yaitu sistem penyangga yang tidak langsung memberikan tegangan awal terhadap massa batuan pada saat pemasangan dan akan bekerja setelah massa batuan mengalami pergerakan. Contoh : *Shotcrete*, *Steelset*, dan *Wood* (Ahmad, 2020).

1. Beton tembak (*Shotcrete*)

Beton tembak dapat dihasilkan melalui campuran kering terdiri dari campuran semen dan agregat kering, serta air dan accelerator yang ditambahkan pada ujung selang penyemprot. Beton tembak campuran kering banyak digunakan karena peralatan yang digunakan lebih ringan dan ekonomis. Selain itu beton tembak juga dapat dihasilkan dari campuran basah yang pada dasarnya memiliki komponen yang sama dengan campuran kering hanya airnya telah dicampurkan dalam tempat pengaduk. *Accelerator* ditambahkan saat campuran dialirkan di tabung. Beton tembak campuran basah lebih menguntungkan karena tingkat debu yang dihasilkan lebih rendah, tidak membutuhkan keahlian khusus dalam menggunakannya, dan peralatan yang dibutuhkan lebih sedikit pada saat pengaplikasian (Ahmad, 2020).



Gambar 2.6 Beton tembak (*Shotcrete*) (Ahmad, 2020)

2. Kawat Baja (*wiremesh*)

Wiremesh merupakan jaring kawat baja yang terbuat dari kawat baja bulat rata atau ulir. Kawat-kawat tersebut dilas bersama-sama dengan mesin las otomatis, yang menjamin jarak (*spacing*) antar kawat seragam dan luas penampang lintang yang konsisten (Lama, 2017).



Gambar 2.7 Kawat baja (*wiremesh*)

3. *Steel set*

Steel set adalah salah satu anggota *support* konvensional yang digunakan dalam struktur geoteknik dan telah digunakan untuk waktu yang lama, terutama untuk menahan beban batuan. *Steel set* umumnya digunakan bersama dengan *wood lagging*. Namun, kecenderungan terakhir adalah menggunakan *Steel set* bersama dengan *shotcrete* dan atau *rockbolts* dalam kondisi batuan yang sulit. (Aydan, 2018 dalam Ahmad, 2020).



Gambar 2.8 *Steel set*

Sistem penyangga *steel set* dipasang apabila kondisi massa batuan yang buruk dengan banyak kekar dan sesar. Oleh karena itu, maka penggunaan penyangga ini diterapkan pada tempat-tempat tertentu saja.

2.6 Metode Elemen Hingga (*Finite Element*).

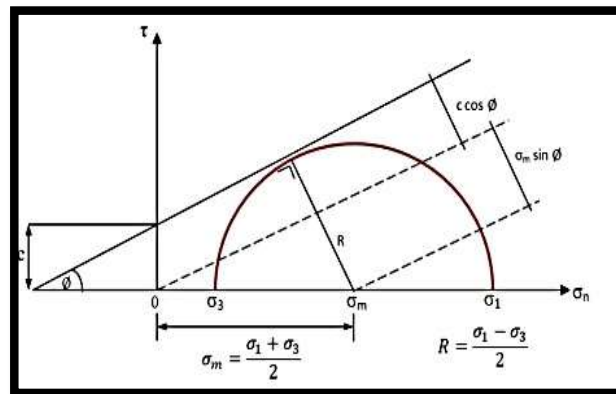
Analisis tegangan dan deformasi dalam lubang bukaan menggunakan teknik elemen hingga (*finite element*). Metode *finite element* adalah salah satu metode pendekatan secara numerik yang menggunakan metode differensial. Metode ini dapat digunakan untuk mengetahui dan menganalisis tegangan pada suatu struktur. Disebut *finite element* karena proses perhitungannya didahului dengan membagi suatu *continuum* menjadi beberapa elemen yang lebih kecil dan dikenal sebagai proses diskretisasi. Elemen yang lebih kecil ini merupakan elemen yang berhingga dan umumnya memiliki bentuk geometri yang lebih sederhana dibandingkan dengan *continuum*-nya (Patrick, 2013).

Dengan menggunakan *finite element* suatu masalah yang mempunyai derajat kebebasan tak berhingga dapat diubah menjadi suatu masalah dengan derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya akan lebih sederhana. Meskipun terapan asalnya ditujukan untuk masalah mekanika benda pejal, penggunaannya telah menyebar ke berbagai disiplin ilmu lainnya yang menggunakan dasar matematis yang sama dan cara interpolasi pengaruh tingkat tegangan pada elemen menggunakan Mohr-Coulomb dan Hoek-Brown dengan paket program *Phase2* dari *Rocscience* (Ahmad, 2020).

2.7 Perhitungan Faktor Keamanan

Kemantapan suatu lubang bukaan dapat dilihat dari nilai faktor keamanan. Nilai faktor keamanan merupakan perbandingan antara keadaan kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja pada batuan tersebut. Menurut Hoek and Bray (1981); Bieniewski (1989) dalam Yance dkk., (2020) nilai $FK > 1$ menjelaskan lubang bukaan dalam kondisi stabil, $FK = 1$ menjelaskan lubang bukaan dalam kondisi kritis dan $FK < 1$ menandakan tidak stabil.

Untuk perhitungan faktor keamanan menurut Rai dkk., (2014) menggunakan kriteria Mohr-coulomb. Penentuannya berdasarkan jarak dari pusat lingkaran *Mohr* ke garis kekuatan batuan dibagi dengan jari-jari lingkaran *Mohr*. Nilai faktor keamanan menyatakan perbandingan keadaan kekuatan batuan terhadap tegangan yang bekerja pada batuan tersebut.



Gambar 2.9 Kriteria keruntuhan mohr-coulomb (Rai dkk, 2014)

Dari Gambar 2.7 di atas, dapat ditentukan faktor keamanan menurut Mohr Coulomb (Rai et al, 2014) sebagai berikut :

$$FK = \frac{A}{B} = \frac{c \cdot \cos \Phi + \left\{ \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \right\} \sin \Phi}{\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)} \quad (9)$$

Keterangan :

- σ_1 = Tegangan mayor (MPa)
- σ_3 = Tegangan minor (MPa)
- Φ = Sudut geser dalam ($^{\circ}$)
- C = Kohesi (MPa)