

T E S I S

EVALUASI GEOLOGI TEKNIK PADA PELAKSANAAN KONSTRUKSI TEROWONGAN SALURAN PENGELAK BENDUNGAN JRAGUNG KABUPATEN SEMARANG, JAWA TENGAH

**Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Guna Mencapai Gelar Magister Teknik (MT)**



Oleh :

**M U L Y A D I
NIM : 20202100035**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
2 0 2 3**

T E S I S

EVALUASI GEOLOGI TEKNIK PADA PELAKSANAAN KONSTRUKSI TEROWONGAN SALURAN PENGELAK BENDUNGAN JRAGUNG KABUPATEN SEMARANG, JAWA TENGAH

**Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan
Guna Mencapai Gelar Magister Teknik (MT)**



Oleh :

**M U L Y A D I
NIM : 20202100035**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
2 0 2 3**

HALAMAN PERSETUJUAN TESIS

EVALUASI GEOLOGI TEKNIK PADA PELAKSANAAN KONSTRUKSI TEROWONGAN SALURAN PENGELAK BENDUNGAN JRAGUNG KABUPATEN SEMARANG, JAWA TENGAH



Tanggal, 4 September 2023

Pembimbing I,

Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph.D.
NIK. 210288012

Tanggal, 4 September 2023

Pembimbing II,

Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T.
NIK. 210200031

HALAMAN PENGESAHAN TESIS

EVALUASI GEOLOGI TEKNIK PADA PELAKSANAAN KONSTRUKSI TEROWONGAN SALURAN PENGELAK BENDUNGAN JRAGUNG KABUPATEN SEMARANG, JAWA TENGAH

Disusun oleh :

M U L Y A D I
NIM. 20202100035

Dipertahankan di Depan Tim Penguji Tanggal : 30 Agustus 2023

Tim Penguji
1. Ketua



(Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph.D.)

2. Anggota



(Ir. Moh. Fauqun Ni'am, M.T., Ph.D.)

3. Anggota



(Dr. Rifqi Brilyant Arief, S.T., M.T.)

Tesis ini diterima sebagai salah satu persyaratan untuk
memperoleh gelar Magister Teknik (MT)

Semarang, 4 September 2023

Mengetahui,
Ketua Program Studi,




Prof. Dr. Ir. Antonius, MT.
NIK. 210202033

Mengesahkan,
Dekan Fakultas Teknik,




Ir. H. Rachmat Mulyono, MT., Ph.D.
NIK. 210293018

MOTTO

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ ءَامَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ
وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ

Artinya :

Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat. Dan Allah Maha Teliti apa yang kamu kerjakan. (Q.S. Al-Mujadalah : 11).

كُنْتُمْ خَيْرَ أُمَّةٍ أُخْرِجَتْ لِلنَّاسِ تَأْمُرُونَ بِالْمَعْرُوفِ
وَتَنْهَوْنَ عَنِ الْمُنْكَرِ وَتُؤْمِنُونَ بِاللَّهِ ۚ وَلَوْ ءَامَنَ أَهْلُ
الْكِتَابِ لَكَانَ خَيْرًا لَهُمْ مِنْهُمُ الْمُؤْمِنُونَ وَأَكْثَرُهُمُ
الْفَاسِقُونَ (١١٠)

Artinya :

Kamu adalah umat yang terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh kepada yang ma'ruf, dan mencegah dari yang munkar, dan beriman kepada Allah. Sekiranya Ahli Kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka, di antara mereka ada yang beriman, dan kebanyakan mereka adalah orang-orang yang fasik. (Q.S. Ali 'Imron : 110).

HALAMAN PERSEMBAHAN

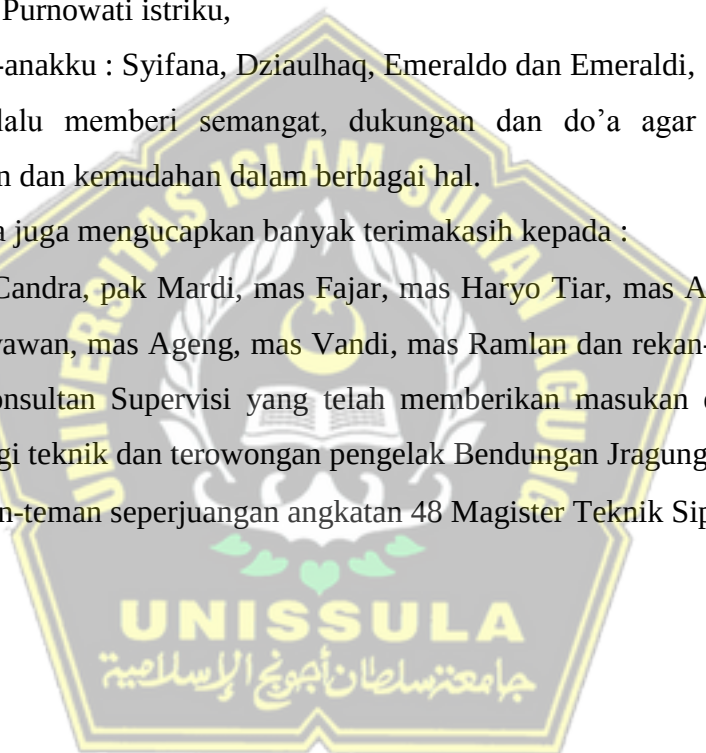
Puji syukur Alhamdulillah kehadiran Allah Subhanahu WaTa'ala, berkat ridhoNYA, saya dapat menyelesaikan program pasca sarjana Magister Teknik Sipil Unissula. Tak lupa sholawat dan salam saya haturkan kepada Nabi Muhammad Salallahu Alaihi Wasalam.

Tesis ini ku persembahkan untuk :

- Bapak Achmad Sudjai (almarhum) dan Ibunda Taruni selaku orang tua saya,
 - Dewi Purnowati istriku,
 - Anak-anakku : Syifana, Dziaulhaq, Emeraldो dan Emeraldi,
- yang selalu memberi semangat, dukungan dan do'a agar selalu diberi kesehatan dan kemudahan dalam berbagai hal.

Tak lupa saya juga mengucapkan banyak terimakasih kepada :

- Mas Candra, pak Mardi, mas Fajar, mas Haryo Tiar, mas Andi Arfa, mas Hidayawan, mas Ageng, mas Vandi, mas Ramlan dan rekan-rekan lainnya di Konsultan Supervisi yang telah memberikan masukan dalam diskusi geologi teknik dan terowongan pengelak Bendungan Jragung,
- Teman-teman seperjuangan angkatan 48 Magister Teknik Sipil Unissula.



ABSTRAK

Terowongan pengelak Bendungan Jragung merupakan terowongan yang dibangun untuk mengelakkan air sungai selama pelaksanaan konstruksi Bendungan Jragung. Terletak di Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah. Terowongan ini direncanakan memiliki panjang 400 m dan diameter dalam 5,30 m. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi geologi teknik area penelitian dalam pelaksanaan kestabilan lereng portal, metode penggalian, dan sistim penyangga terowongan.

Kondisi geologi dan geologi teknik didapatkan dari investigasi geologi dan pengujian laboratorium. Penentuan kualitas massa batuan dilakukan dengan metode GSI dan RMR. Analisis kestabilan lereng portal terowongan dilakukan dengan metode empiris berupa *Circular Failure Chart* (CFC) dan metode numeris menggunakan software *Slide* dan *Phase2*. Pada analisis metode penggalian dan sistim penyangga digunakan metode empiris berdasarkan RMR dan NATM yang didasari oleh hasil penentuan kualitas massa batuan.

Lokasi penelitian terletak pada anggota Banyak Formasi Kalibeng dengan litologi penyusun terdiri dari satuan batupasir perselingan batulempung dan batulanau dan satuan batulempung sisipan batupasir dan batulanau. Dari hasil pengamatan di lapangan maupun uji sifat mekanik di laboratorium, batuan di lokasi penelitian tergolong ke dalam batuan lunak. Hasil analisis kestabilan lereng menunjukkan lereng dengan sudut 40° pada inlet dan 45° pada outlet portal terowongan yang disertai dengan perbaikan geometri lereng berupa terasering, baut batuan dan juga shotcrete dinilai aman terhadap kondisi gempa. Adanya heterogenitas kondisi massa batuan yang melewati trase terowongan, sehingga untuk metode penggalian dan sistim penyangga terowongan dibagi menjadi 4 (empat) segmen. Metode penggalian massa batuan menggunakan *digging* dan *ripping*. Secara keseluruhan metode penggalian terowongan dilakukan dengan tahapan *top heading* dan *bench*. Untuk sistim penyangga terowongan menggunakan *steel rib*, *rock bolts*, *wiremesh*, *shotcrete* dan *lining concrete*.

Kata kunci : Terowongan pengelak, Bendungan Jragung, Kestabilan lereng, Metode Penggalian, Sistim penyangga.

ABSTRACT

A diversion tunnel of the Jragung dam is a tunnel to evade the river during the Jragung Dam construction. Located in Semarang Regency, Central Java Province. This tunnel is planned to have a length of 400 m and an inner diameter of 5,30 m. This study aims to evaluate the geological engineering conditions at the research site used in planning the stability of the tunnel portal slopes, excavation methods, and support systems.

Geological conditions and engineering geology were obtained from geological investigation and laboratory testing. Rock mass quality was determined using the GSI and RMR methods. The slope stability analysis was carried out using an empirical method in a Circular Failure Chart (CFC) and a numerical method using *Slide* and *Phase2* software. In the excavation method and the support system analysis, empirical methods are used based on RMR and NATM, which rock mass quality results influenced the analysis.

The research is located in the Banyak members of the Kalibeng Formation with lithology consisting of sandstone intercalated with claystone and siltstone units and claystone intercalated with sandstone and siltstone units. From the results of field observations and mechanical properties testing in the laboratory, the rocks at the research site are classified as soft rocks. The results of the slope stability analysis show that slopes with an angle of 40° at the inlet and 45° at the outlet of the tunnel portal accompanied by improvements to the slope geometry in the form of terracing, rock bolts and shotcrete are considered safe against earthquake conditions. The fact that heterogeneity in the condition of the rock mass passing through the tunnel alignment, so that the excavation method and the tunnel support system are divided into four segments. The rock mass excavation methods use digging and ripping. Overall the tunnel excavation method is carried out in the top heading and bench stages. The tunnel support system uses steel rib, rock bolts, wiremesh, shotcrete and lining concrete.

Key words: Diversion tunnel, Jragung dam, Slope stability, Excavation method, Support systems.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : M U L Y A D I

NIM. : 20202100035

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tesis yang berjudul :

**EVALUASI GEOLOGI TEKNIK PADA PELAKSANAAN KONSTRUKSI
TEROWONGAN SALURAN PENGELAK BENDUNGAN JRAGUNG
KABUPATEN SEMARANG, JAWA TENGAH**

Adalah benar hasil karya saya dan dengan penuh kesadaran bahwa saya tidak melakukan tindakan plagiasi atau mengambil alih seluruh atau sebagian besar karya tulis orang lain tanpa menyebutkan sumbernya. Jika saya terbukti melakukan tindakan plagiasi, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan aturan yang berlaku.

Semarang, 4 SEPTEMBER 2023



(M U L Y A D I)

KATA PENGANTAR

Puji syukur Penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu WaTa'ala yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga Penulis dapat menyelesaikan Laporan Tesis Evaluasi Geologi Teknik pada Pelaksanaan Konstruksi Terowongan Saluran Pengelak Bendungan Jragung, Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah.

Penyusunan Tesis merupakan salah satu program dari kurikulum Magister Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang harus ditempuh oleh setiap mahasiswa untuk memenuhi syarat akademis guna menyelesaikan studi pada program Magister (S2).

Penelitian tesis ini telah dilaksanakan sejak bulan Oktober 2022, dimulai dari penyusunan laporan proposal tesis, pelaksanaan penelitian, hingga sidang akhir tesis. Hal tersebut dimaksudkan agar mahasiswa mampu menerapkan ilmu pengetahuan yang diperoleh dari bangku perkuliahan dalam pelaksanaan konstruksi suatu proyek terowongan dengan segala permasalahannya.

Pada kesempatan ini, Penulis hendak menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah mendukung kelancaran pelaksanaan penelitian dan penyusunan laporan tesis ini, yaitu:

1. Bapak Ir. H. Rachmat Mudiyo, M.T., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Antonius, M.T. selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil;
3. Bapak Prof. Ir. H. Pratikso, MST., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing 1;
4. Bapak Dr. Abdul Rochim, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 2;
5. Bapak Muhamad Adek Rizaldi, S.T., M.Tech. selaku Kepala Balai Besar Wilayah Sungai Pemali Juana yang telah memberikan izin dalam pelaksanaan penelitian dan pengambilan data;
6. Staf akademik Program Magister Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung yang telah membantu dalam pengurusan administrasi penyusunan laporan tesis;

7. Rekan-rekan di Konsultan Supervisi pembangunan Bendungan Jragung yang telah mendukung dan memberikan semangat selama proses pelaksanaan penelitian mulai dari awal hingga laporan ini selesai.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan laporan tesis ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, Penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk menyempurnakan laporan tesis ini.

Akhir kata, Penulis berharap semoga laporan tesis ini dapat bermanfaat bagi perkembangan penguasaan ilmu geologi teknik dalam konstruksi terowongan dan ilmu pengetahuan lainnya.

Semarang, Agustus 2023

Penulis,

Mulyadi



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERSETUJUAN TESIS	ii
HALAMAN PENGESAHAN TESIS	iii
MOTTO	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN.....	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xx
ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN.....	xxi
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1. Latar Belakang Penelitian	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Lingkup Penelitian	3
1.4.1. Lokasi Penelitian	3
1.4.2. Lingkup Pekerjaan	4
1.5. Penelitian Terdahulu dan Keaslian Penelitian	5
1.6. Tujuan Penelitian	8
1.7. Manfaat Penelitian	8
 BAB II KAJIAN PUSTAKA	 9
2.1. Tinjauan Pustaka	9
2.1.1. Geologi dan Geologi Teknik Regional	9
2.1.1.1. Geomorfologi Regional	10

2.1.1.2. Struktur Geologi Regional	10
2.1.1.3. Stratigrafi Regional	11
2.1.1.4. Geologi Teknik Regional	13
2.1.2. Geologi dan Geologi Teknik Daerah Penelitian	16
2.1.2.1. Geomorfologi Daerah Penelitian.	16
2.1.2.2. Struktur Daerah Penelitian.	18
2.1.2.3. Stratigrafi Daerah Penelitian.	18
2.1.2.4. Geologi Teknik Daerah Penelitian.	19
2.1.3. Perencanaan Terowongan Pengelak	24
2.2. Landasan Teori	26
2.2.1. Pengertian Terowongan	26
2.2.2. Pemetaan Geologi dan Geologi Teknik	27
2.2.3. Pengujian Sifat Indeks dan Keteknikan Tanah atau Batuan di Laboratorium	31
2.2.3.1. Sifat Indeks Tanah dan Batuan	31
2.2.3.2. Sifat Keteknikan Tanah dan Batuan	33
2.2.3.3. Klasifikasi Tanah	36
2.2.4. Klasifikasi Massa Batuan	39
2.2.4.1. <i>Rock Quality Designation</i> (RQD).	39
2.2.4.2. <i>Rock Mass Rating</i> (RMR).	41
2.2.4.3. <i>Geological Strength Index</i> (GSI).	45
2.2.4.4. Hubungan RMR terhadap GSI	48
2.2.5. Kestabilan Lereng Portal Terowongan	48
2.2.6. Metode Penggalian dan Sistem Penyangga Terowongan dengan NATM.	50
2.2.7. Perangkat Lunak	60
2.2.8. Hipotesis	61
BAB III METODE PENELITIAN	63
3.1. Pengertian Umum	63
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	63
3.3. Tahapan Penelitian	64
3.3.1. Tahapan Pendahuluan	64

3.3.2. Tahapan Pengumpulan Data	64
3.3.2.1. Pengumpulan Data Primer	64
3.3.2.2. Pengumpulan Data Sekunder.....	66
3.3.3. Tahapan Analisis	67
3.3.3.1. Analisis Laboratorium	67
3.3.3.2. Analisis Data	68
3.3.3.2.1. Pembuatan Peta Geomorfologi	69
3.3.3.2.2. Pembuatan Peta Geologi	69
3.3.3.2.3. Pembuatan Peta GSI	69
3.3.3.2.4. Analisis Parameter Kekuatan Massa Batuan.....	69
3.3.3.2.5. Evaluasi Kualitas Massa Batuan Bawah Permukaan	69
3.3.3.2.6. Penentuan Parameter Pelaksanaan Terowongan	70
3.3.3.2.6.1. Geometri Terowongan	70
3.3.3.2.6.2. Sistem Penyangga	70
3.3.3.2.6.3. Kemiringan Portal	70
3.3.3.2.6.4. Material Properties	70
3.3.3.2.7. Analisis Kestabilan Lereng pada Portal Terowongan	70
3.3.3.2.8. Analisis Metode Penggalian Terowongan.....	70
3.3.3.2.9. Analisis Sistem Penyangga Terowongan	71
3.3.4. Tahapan Evaluasi Hasil	71
3.3.5. Tahapan Pelaporan	71
3.4. Jadwal Pelaksanaan Penelitian Tesis	73

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN..... 74

4.1. Hasil Penelitian	74
4.1.1. Karakteristik Geologi dan Geologi Teknik	74
4.1.1.1. Geomorfologi	74
4.1.1.2. Litologi	79
4.1.1.3. Stratigrafi pada Trase Terowongan.	83
4.1.1.4. Struktur geologi.	85
4.1.1.5. Analisis Air Tanah.....	87
4.1.1.6. Karakteristik Geologi Teknik.	88

4.1.1.7. Analisis Kualitas Massa Batuan.	92
4.1.2. Analisis Kestabilan Lereng Portal Terowongan.....	95
4.1.2.1. <i>Circular Failure Chart</i> (CFC).	96
4.1.2.2. <i>Finite Element Method</i> (FEM).	98
4.1.3. Analisa Empiris Metode Penggalian dan Sistem Penyangga Terowongan	104
4.2. Pembahasan.....	109
4.2.1. Evaluasi Kondisi Geologi.....	109
4.2.1.1. Geomorfologi	110
4.2.1.2. Litologi dan Stratigrafi	110
4.2.1.3. Struktur Geologi.	110
4.2.1.4. Kondisi Air Tanah.	111
4.2.2. Evaluasi Kondisi Geologi Teknik	111
4.2.2.1. Geologi Teknik.	112
4.2.2.2. Kualitas Massa Batuan.	113
4.2.3. Evaluasi Kestabilan Lereng pada Portal Terowongan.....	113
4.2.4. Evaluasi Metode Penggalian pada Terowongan.....	114
4.2.5. Evaluasi Sistem Penyangga pada Terowongan	115
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	117
5.1. Kesimpulan	117
5.2. Saran	119
DAFTAR PUSTAKA	120

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1. Penelitian Terdahulu	5
Tabel 2.1. Klasifikasi Batuan dari CRIEPI	20
Tabel 2.2. Klasifikasi Kemiringan Lereng (van Zuidam, 1983)	28
Tabel 2.3. Tingkat Pelapukan Batuan (ISRM, 1978)	29
Tabel 2.4. Estimasi Nilai Uniaxial Compressive Strength (UCS) di Lapangan untuk Batuan Utuh (Hoek and Brown, 1998)	30
Tabel 2.5. Klasifikasi Tanah berdasarkan System USCS (Das, 1995)	37
Tabel 2.6. Kualitas Massa Batuan berdasarkan RQD (Deere, 1989)	40
Tabel 2.7. Penilaian masing-masing Parameter RMR (Bieniawski, 1989)	43
Tabel 2.8. Kualitas Massa Batuan (Bieniawski, 1989)	44
Tabel 2.9. Panduan Penggalian dan Sistem Penyangga Terowongan dengan Sistem RMR (Bieniawski, 1989)	44
Tabel 2.10. Penentuan Kondisi Kekar (joint condition) Tanpa Infilling (Das et al., 2013)	46
Tabel 2.11. Penentuan Kondisi Kekar (joint condition) jika Terdapat Infilling (Das et al., 2013)	47
Tabel 2.12. Kualitas GSI Massa Batuan (Das et al., 2013)	48
Tabel 3.1. Jadwal Pelaksanaan Penelitian	73
Tabel 4.1. Kedudukan Kekar-kekar di Lokasi Penelitian	86
Tabel 4.2. Resume Hasil Pengujian Sifat Index dan Mekanik Batuan	91
Tabel 4.3. Hasil Analisis Menggunakan <i>Circular Failure Chart</i>	97
Tabel 4.4. <i>Properties</i> Material Tanah dan Batuan pada FEM	98
Tabel 4.5. <i>Properties</i> Baut Batuan (<i>Rock Bolt</i>) pada FEM	98
Tabel 4.6. Koefisien Kegempaan OBE Lereng Portal Terowongan pada FEM	99
Tabel 4.7. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Portal Inlet dengan FEM	100
Tabel 4.8. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Portal Outlet dengan FEM	101
Tabel 4.9. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Portal Inlet dengan FEM dan Total Displacement Maksimum	102
Tabel 4.10. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Portal Outlet dengan FEM dan Total Displacement Maksimum	103
Tabel 4.11. Hasil Analisis Kualitas Massa Batuan pada Elevasi Terowongan	106

Tabel 4.12. Hasil Analisis Metode Penggalan Terowongan	107
Tabel 4.13. Hasil Analisis Sistem Penyangga Terowongan.....	108



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Peta Lokasi Pembangunan Bendungan Jragung (PT. Indra Karya, 2019) ...	4
Gambar 2.1. Peta Geologi Regional Lembar Salatiga, Jawa (Sukardi dan T. Budhitrisona, 1992).....	9
Gambar 2.2. Peta Geomorfologi Regional Pulau Jawa (Verstappen, 2000)	10
Gambar 2.3. Peta Pola Arah Struktur Geologi Jawa 2003 (PT. Indra Karya, 2019).....	11
Gambar 2.4. Kolom Stratigrafi Regional Lembar Salatiga, Jawa (Sukardi dan T. Budhitrisona, 1992).....	13
Gambar 2.5. Peta Jalur Gempa dan Sesar Aktif di Pulau Jawa (Pusgen, 2017)	14
Gambar 2.6. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampau 7% dalam 75 tahun (Pusgen, 2017)	15
Gambar 2.7. Peta Geologi Daerah Penelitian (PT. Indra Karya, 2019)	16
Gambar 2.8. Kondisi Topografi Daerah Penelitian (Sumber : Google Earth, 2022)	18
Gambar 2.9. Profil Geologi Memanjang Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019).....	21
Gambar 2.10. Profil Geologi Teknik Memanjang Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019)	22
Gambar 2.11. Lokasi Titik Pemboran Bendungan Jragung (PT. Indra Karya, 2019).....	23
Gambar 2.12. Denah dan Tata Letak Bendungan Jragung (PT. Indra Karya, 2019)	24
Gambar 2.13. Denah dan Potongan Memanjang Bangunan Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019)	25
Gambar 2.14. Tipikal Penampang Melintang Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019)	25
Gambar 2.15. Geometri Penampang Melintang Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019)	26
Gambar 2.16. Dimensi Sampel untuk Uji Index Point Load (ASTM D 5731-02)	35
Gambar 2.17. Gambaran Prosedur Penentuan Nilai RQD (Deere, 1989).....	40
Gambar 2.18. Chart Estimasi Nilai GSI untuk Batuan Terkekarkan (Hoek et al., 2007) ..	45
Gambar 2.19. Kondisi GSI dipadukan dengan Analisis Kuantitatif (Hoek dkk., 2013) ..	47
Gambar 2.20. Ilustrasi Metode Penggalan Terowongan Sistem NATM (Schweiger, H.F., 1974)	51
Gambar 2.21. Tipe Tension Bolt (Baut Tarik Batuan)	53
Gambar 2.22. Tipe Full Column Adhesive bolt (Baut Geser)	53
Gambar 2.23. Tipe Steel Rib (Singh dan Rajnish, 2006).....	55

Gambar 2.24. (a) Penampang Melintang dan (b) Penampang Memanjang Tipikal Pola Perkuatan dan Dinding Terowongan (PUPR, 2015).....	56
Gambar 2.25. Pelaksanaan Contact Grouting (Hardjomuljadi, 2010)	58
Gambar 2.26. Pelaksanaan Consolidation Grouting (Hardjomuljadi, 2010)	59
Gambar 2.27. Curtain grouting upper half (Hardjomuljadi, 2010).....	59
Gambar 2.28. Perbandingan antara Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb dan Hoek-Brown (Das et al., 2013)	61
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian Tesis	72
Gambar 4.1. Kenampakan Geomorfologi Daerah Penelitian.....	74
Gambar 4.2. Peta Pola Aliran Sungai Daerah Penelitian	75
Gambar 4.3. Peta Geomorfologi Daerah Penelitian.....	76
Gambar 4.4. Kenampakan Satuan Morfologi Perbukitan Struktural Curam.....	77
Gambar 4.5. Kenampakan Satuan Morfologi Perbukitan Struktural Miring.....	78
Gambar 4.6. Kenampakan Satuan Morfologi Dataran Sungai.....	78
Gambar 4.7. Singkapan Alluvial pada Alur Sungai Sta. 1+140.....	79
Gambar 4.8. Singkapan Batupasir Perselingan Batulempung dan Batulanau pada Sta. 0+960 (strike/dip= N 341° E/ 83°)	80
Gambar 4.9. Foto Hasil Uji Petrografi Batupasir.....	80
Gambar 4.10. Singkapan Batulempung Sisipan Batupasir dan Batulanau di Sta.0+760 (strike/dip= N 353°E/ 81°).....	81
Gambar 4.11. Foto Hasil Uji Petrografi Batulempung	81
Gambar 4.12. Contoh Pengamatan Sampel Inti Batuan Hasil Pemboran BP-03	82
Gambar 4.13. Peta Geologi dan Penampang Geologi Daerah Penelitian	83
Gambar 4.14. Profil Geologi pada Trase Terowongan Pengelak.....	84
Gambar 4.15. Kedudukan kekar berpasangan pada batupasir di Sta. 0+940 (N351°E/85° & N68°E/87°)	85
Gambar 4.16. Hasil Analisis Kekar dengan Kedudukan Umum N345°E/82°	86
Gambar 4.17. Hasil Analisis Kelurusan Punggungan berarah Barat Laut – Tenggara (N342°E)	87
Gambar 4.18. Foto Sampel Pemboran Inti pada Trase Terowongan	90
Gambar 4.19. Penampang Geologi Teknik pada Trase Terowongan Pengelak	92
Gambar 4.20. Analisis Hubungan GSI dan RMR	93
Gambar 4.21. Peta GSI Permukaan Daerah Penelitian	94
Gambar 4.22. Kualitas Massa Batuan Trase Terowongan Berdasarkan Analisis GSI	94

Gambar 4.23. Kualitas Massa Batuan Trase Terowongan Berdasarkan Analisis RMR....	95
Gambar 4.24. Diagram Alir Analisis Kestabilan Lereng	96
Gambar 4.25. <i>Circular Failure Chart</i> untuk analisis stabilitas pada <i>inlet</i>	97
Gambar 4.26. <i>Circular Failure Chart</i> untuk analisis stabilitas pada <i>outlet</i>	97
Gambar 4.28. Penilaian Tipe Penggalan Menggunakan Grafik GSI Tsiambaos dan Saroglou.....	105
Gambar 4.29. Pembagian Segmen berdasarkan Analisis Kualitas Massa Batuan	106
Gambar 4.30. Evaluasi Kondisi Geologi pada Trase Terowongan	109
Gambar 4.31. Evaluasi Kondisi Geologi Teknik pada Trase Terowongan.....	112



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Analisis GSI dan RMR Bawah Permukaan.....	126
Lampiran 2 : Deskripsi dan Dokumentasi Pemboran (Borlog).....	135
Lampiran 3 : Hasil Uji Laboratorium <i>Unconfined Compression Strength</i>	152
Lampiran 4 : Hasil Uji Laboratorium <i>Triaxial</i>	166
Lampiran 5 : Hasil Uji Laboratorium <i>Direct Shear</i>	176
Lampiran 6 : Hasil Uji Laboratorium <i>Index Properties</i>	186
Lampiran 7 : Hasil Uji Laboratorium <i>Petrografi</i>	190



ARTI SIMBOL DAN SINGKATAN

γ_{unsat} : densitas kering

γ_{sat} : densitas jenuh

σ_{ci} : kuat tekan

c' : kohesi

ϕ' : sudut geser

k : permeabilitas

E' : modulus young

ν' : poisson rasio

e : void rasio

m_i : konstanta massa batuan utuh

m, s, a : konstanta massa batuan

D : faktor gangguan

Ψ_{max} : sudut dilatasi maksimum

CFC : Circular Failure Chart

FEM : Finite Element Method

GSI : Geological Strength Index

RMR : Rock Mass Rating

RQD : Rock Quality Designation

SF : Safety Factor



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Penelitian

Perencanaan pembangunan Bendungan Jragung dimulai sejak tahun 1976 oleh Direktorat Jenderal Sumber Daya Air melalui Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Pemali Juana yang akan dibangun di Kabupaten Semarang Provinsi Jawa Tengah. Penelitian dan perencanaan Bendungan Jragung yang telah dilakukan antara lain; Studi kelayakan (FS) dikaji oleh Engineering Consultants Inc. (ECI). Denver, Co. USA (1976), Final Desain dikaji oleh PRC Engineering Consultants, Inc. Englewood, Colorado, USA. (1979), Detail Desain dikerjakan oleh (PT. Indra Karya Cabang-1 Malang (2015) dan *Detail Engineering Design* (DED) dikerjakan oleh PT. Indra Karya (Persero) pada tahun 2019. Tujuan dilakukannya pembangunan Bendungan Jragung adalah untuk pengendalian banjir dari 1.580 m³/det menjadi 981 m³/det mereduksi 68% (Q_{PMF}), pemenuhan air baku sebesar 1 m³/detik, suplai air irigasi seluas 4528 Ha, potensi PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro) sebesar 1,4 MW dan untuk aliran pemeliharaan sungai sebesar 0,15 m³/det.

Salah satu unsur penunjang kelancaran pembangunan bendungan adalah pengelakan air sungai. Pengelakan air sungai pada pembangunan bendungan dapat dilakukan dengan menggunakan saluran pengelak berupa saluran terbuka maupun saluran tertutup/ terowongan. Sistem pengelakan sungai pada Bendungan Jragung dilakukan dengan pembuatan saluran terbuka pengarah *inlet*, aliran sungai dialihkan menuju terowongan sepanjang ± 400 m dengan diameter 5,3 m dan kemudian aliran sungai menuju sungai induk melalui saluran terbuka pengarah *outlet*. Pada saat akhir konstruksi, saluran pengelak ditutup dengan menggunakan pintu, yang selanjutnya saluran pengelak dimanfaatkan untuk *intake* irigasi, air baku dan PLTA . Dalam kondisi khusus, saluran pengelak ini dapat digunakan lagi misalnya untuk keperluan penurunan muka air waduk secara cepat dengan cara mengangkat pintu darurat.

Terowongan saluran pengelak pada Bendungan Jragung dilaksanakan oleh BBWS Pemali Juana melalui PT. Brantas Abipraya dan PT. Pelita, KSO. yang hingga saat ini masih dalam tahap konstruksi. Dari desain-desain sebelumnya telah didapatkan hasil desain antara lain hasil penyelidikan geologi regional, desain geometri terowongan dan trase jalur terowongan. Klasifikasi massa batuan di dalam galian terowongan pengelak, metode penggalian dan sistem penyangga dilakukan dengan metode *Rock Mass Rating (RMR)* yang dikembangkan oleh Bieniaswki (1976). Metode RMR ini banyak digunakan karena kemudahan dan fleksibilitasnya. Misalnya dalam penelitian Rahmati et al. (2014) dan Moon et al. (2001).

Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Salatiga oleh Sukardi dan T. Budhitrisna (1992) pada daerah penelitian terdapat struktur lipatan dan sesar. Struktur geologi ini dimungkinkan berpengaruh terhadap perencanaan terowongan. Pada analisis keamanan terowongan saluran pengelak, data yang diperlukan antara lain kondisi geologi dan geologi teknik (tanah dan batuan, struktur geologi, air tanah dan kegempaan), peta geologi detail, peta kemiringan lereng, dan peta kualitas massa batuan. Analisis kestabilan lereng portal terowongan saluran pengelak penting untuk dilakukan sebab pada daerah penelitian rawan terjadi tanah longsor. Dalam penelitian ini analisis kestabilan lereng portal terowongan akan dilakukan dengan metode empiris maupun numerik. Sedangkan analisis metode penggalian terowongan dan sistem penyangga terowongan penting untuk menjamin keamanan pada masa konstruksi maupun setelah konstruksi. Diharapkan dengan dilakukannya kajian evaluasi kondisi geologi teknik pada pelaksanaan konstruksi terowongan saluran pengelak Bendungan Jragung, struktur terowongan dapat berfungsi dengan baik selama masa layan bendungan.

Metode empiris lain untuk membantu penentuan kualitas massa batuan adalah *Geological Strength Index (GSI)* yang diperkenalkan oleh Hoek (1994). Metode GSI telah banyak digunakan dan dikembangkan, seperti pada beberapa publikasi oleh Marinos et al. (2005), Tsiambaos and Saroglou (2010), dan Hoek et al. (2013). Nilai GSI juga diperlukan dalam perhitungan lereng portal terowongan dengan metode numerik.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, rumusan masalah dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut :

- a. Bagaimana kondisi geologi teknik di daerah penelitian?
- b. Bagaimana kondisi kestabilan lereng portal terowongan jika dilakukan analisis dengan metode numerik?
- c. Apa metode penggalian yang sesuai dengan kondisi geologi teknik di lokasi penelitian?
- d. Apa sistem penyangga terowongan yang sesuai digunakan pada kondisi di lokasi penelitian?

1.3. Batasan Masalah

Penelitian yang dilakukan memiliki batasan masalah, diantaranya adalah :

- a. Pemetaan geologi teknik dibatasi pada lokasi penelitian, yakni pada area terowongan dan sekitarnya;
- b. Desain geometri terowongan, jalur terowongan dan dimensi terowongan, menggunakan data primer dan sekunder yang diperoleh dari lapangan dan literatur desain sebelumnya;
- c. Analisis terhadap kestabilan terowongan didasarkan pada hasil pemetaan geologi teknik, pemboran inti, dan kualitas massa batuan;
- d. Analisis kestabilan lereng menggunakan perangkat lunak *Slide* yang dilakukan pada lokasi portal *inlet* dan *outlet* terowongan melalui permodelan 2 dimensi (2D) dan diasumsikan homogen pada tiap lapisan batumannya, tanpa memperhitungkan genangan air waduk.

1.4. Lingkup Penelitian

1.4.1. Lokasi Penelitian

Bendungan Jragung secara administratif terletak di Desa Candirejo, Kecamatan Pringapus, Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah. Daerah penelitian terletak pada koordinat $7^{\circ}08'40,30''\text{LS}$ dan $110^{\circ}32'30,43''\text{BT}$. Untuk menuju lokasi Bendungan, dapat ditempuh dengan kendaraan roda dua atau roda empat dari kota Semarang menuju desa Candirejo dalam waktu sekitar 1,5 jam.

Kemudian perjalanan dilanjutkan dengan kendaraan *double* gardan menuju lokasi proyek pembangunan Bendungan Jragung. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Peta Lokasi Pembangunan Bendungan Jragung (PT. Indra Karya, 2019)

1.4.2. Lingkup Pekerjaan

Lingkup pekerjaan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Melakukan studi pustaka terkait dengan penelitian yang berhubungan dengan geologi regional, mulai dari morfologi, stratigrafi dan struktur geologi, mekanika tanah/batuan, kualitas massa batuan, kestabilan lereng, metode penggalian dan analisis kestabilan terowongan;
- Melakukan pengumpulan data sekunder, berupa hasil pengujian laboratorium terhadap sampel bawah permukaan dan geometri terowongan;

- c. Melakukan pengumpulan data primer berupa pengambilan dan pengamatan sampel batuan permukaan dan bor inti, serta analisis kualitas massa batuan dengan metode *Geological Strength Index (GSI)* dan *Rock Mass Rating (RMR)*;
- d. Melakukan uji laboratorium untuk mendapatkan sifat fisik dan mekanik batuan;
- e. Melakukan analisis kestabilan lereng pada portal terowongan, metode penggalian dan sistem penyangga terowongan.

1.5. Penelitian Terdahulu dan Keaslian Penelitian

Penelitian terdahulu yang terkait dengan geologi regional, geologi dan geologi teknik daerah penelitian, analisis stabilitas dan metode penggalian terowongan sebagaimana terdapat pada Tabel 1.1. Beberapa studi pada penelitian tersebut lebih banyak difokuskan pada tubuh bendungan sedangkan untuk terowongan pengelak dibutuhkan penelitian lebih lanjut, dengan tetap melewati tahap penelitian geologi dikarenakan kompleksitas pada bangunan yang terletak di bawah tanah.

Tabel 1.1. Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Tahun	Judul	Hasil
1.	Engineering Consultants Inc. (ECI). Denver, Co. USA.	1976	Studi kelayakan (FS) Bendungan Jragung	Penempatan usulan as tubuh bendungan dan mengusulkan panjang tubuh bendungan 900m dengan tinggi bendungan 70 m.
2.	PRC Engineering Consultants, Inc. Englewood, Colorado, USA.	1979	Final Desain Bendungan Jragung	Penempatan usulan as tubuh bendungan dan mengusulkan panjang tubuh bendungan 1917m dengan tinggi bendungan 73 m
3.	Sukardi dan T. Budhitrisna	1992	Peta Geologi Lembar Salatiga, Jawa	Pemetaan geologi regional yang mencakup daerah Penelitian.

(Lanjutan)

4.	PT. Indra Karya Cabang-1 Malang	2015	Detail Desain Bendungan Jragung	Pemilihan tipe bendungan didasarkan pada kondisi topografi, kondisi geologi serta ketersediaan material timbunan disekitar lokasi bendungan. Berdasarkan pertimbangan tersebut maka Bendungan Jragung direncanakan dengan tipe urugan random lereng tumpuan dengan inti tegak.
5.	PT. Indra Karya (Persero)	2019	<i>Detail Engineering Design (DED)</i> Bendungan Jragung	Hasil survey topografi, hasil investigasi geologi dan rencana layout bendungan, perhitungan hidrologi dan analisis ekonomi.
6.	Sasangka, D.J.	2019	Analisis Kestabilan Portal dan Metode Ekskavasi Berdasarkan Kondisi Geologi Teknik Pada Terowongan Pengelak Bendungan Bener, Kabupaten Purworejo	Evaluasi kondisi geologi dan perencanaan Terowongan Pengelak Bendungan Bener di Kabupaten Purworejo
7.	Wibowo, A.	2019	Evaluasi Kondisi Geologi Teknik dan Analisis Kestabilan Ekskavasi Terowongan Air Nanjung, Provinsi Jawa Barat	Evaluasi kondisi geologi dan perencanaan Terowongan Air Nanjung di Kabupaten Bandung, Jawa Barat
8.	Muzakky, M.A. dan Indrawan, IGB.	2020	Karakteristik Geologi Teknik Bendungan Jragung, Kecamatan Pringapus, Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah	Penentuan karakteristik geologi teknik menggunakan aspek sebaran litologi, tingkat pelapukan dan kualitas massa batuan berdasarkan klasifikasi Geological Strength Index (GSI).

(Lanjutan)

9.	Nugroho, W.K.	2020	Evaluasi Kondisi Geologi Teknik dan Analisis Kestabilan Terowongan Pengelak Bendungan Pamukkulu Provinsi Sulawesi Selatan	Evaluasi kondisi geologi dan perencanaan Terowongan Pengelak Bendungan Pamukkulu di Sulawesi Selatan
10.	Chikalistyanti Sudrajat	2020	Analisis Sistem Penyangga pada Terowongan Pengelak Bendungan Beringin Sila di Kabupaten Sumbawa	Penentuan faktor keamanan pada sistem penyangga terowongan Beringin Sila. Analisis meliputi tegangan maksimum dari sistem penyangga <i>shotcrete</i> , <i>rockbolt</i> , <i>steel support</i> , <i>concrete lining</i> dan <i>grouting</i> .
11.	Lukman Hakim, A.D. Rahardjo, Z. Hulwani	2021	Analisis Stabilitas Slope Protection Terowongan Pengelak Bendungan Tigadihaji, Sumatera Selatan	Penentuan <i>strength factor</i> (SF) untuk menganalisis stabilitas slope di area slope inlet dan outlet terowongan pengelak, serta <i>slope protection</i> yang sesuai di area terowongan pengelak.
12.	Rama Anugrah Hulu, Piyen Jones Immanuel Yosua Ziliwu, Masriani Endayanti, Janner Napitupul.	2022	Analisis Perkuatan Lereng Tebing Pada Terowongan Proyek Pembangunan Bendungan Lau Simeme, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara Dengan Metode “ <i>Soil Nailing Grout</i> ”	Perkuatan lereng tebing pada terowongan Bendungan Lau Simeme, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara.

Dalam penelitian ini dikaji kondisi kestabilan lereng portal terowongan berdasarkan analisis numerik serta menentukan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan dengan beberapa metode. Mengacu pada Tabel 1.1, penelitian mengenai “Evaluasi Geologi Teknik pada Pelaksanaan Konstruksi Terowongan Saluran Pengelak Bendungan Jragung, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah” belum pernah dilakukan sebelumnya oleh penulis atau peneliti yang lain.

1.6. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk :

- a. Mengetahui kondisi geologi teknik meliputi kondisi geomorfologi, batuan dan tanah, struktur geologi, air tanah, dan kegempaan di daerah penelitian,
- b. Mengetahui kondisi kestabilan lereng portal terowongan berdasarkan analisis numerik,
- c. Menentukan metode penggalian terowongan yang sesuai dengan kondisi geologi teknik di lokasi penelitian,
- d. Menentukan sistem penyangga terowongan yang sesuai digunakan pada kondisi di lokasi penelitian.

1.7. Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan dapat diperoleh manfaat sebagai berikut :

- a. Memberikan gambaran mengenai kondisi geologi teknik pada lokasi pembangunan bendungan, khususnya pada terowongan pengelak,
- b. Memberikan masukan kepada pemangku kepentingan terkait dengan geometri lereng portal, metode penggalian dan sistem penyangga yang sesuai dengan kondisi geologi teknik pada terowongan,
- c. Memberikan kontribusi ilmu rekayasa teknik dalam kaitannya dengan geologi teknik dan konstruksi terowongan pengelak.

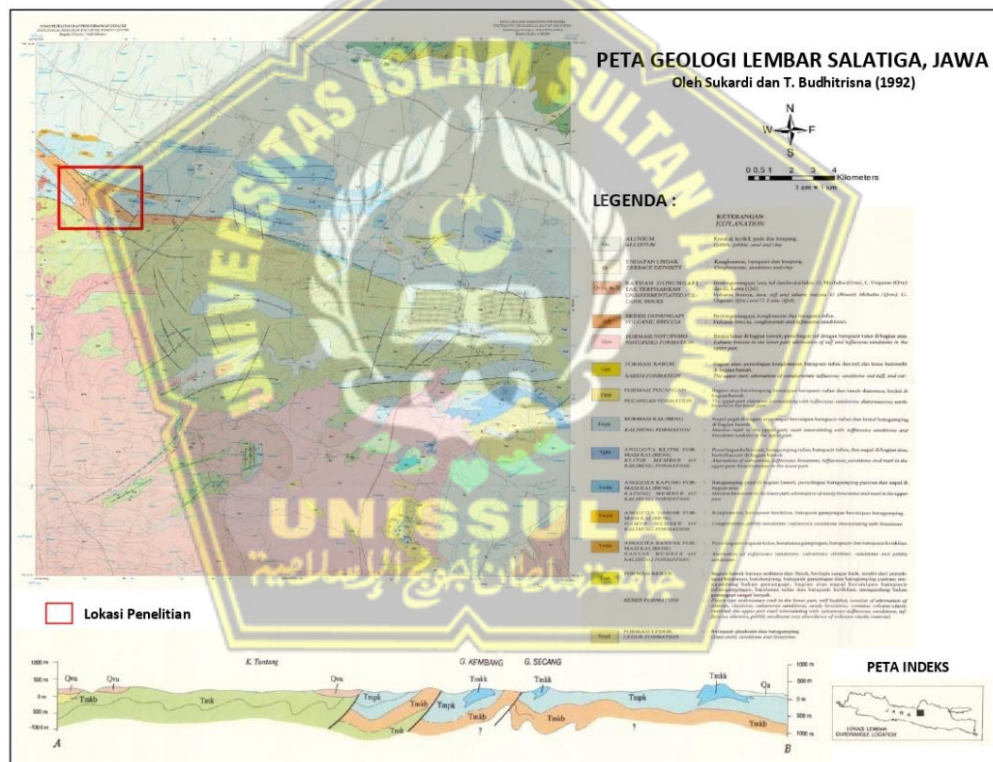
BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Geologi dan Geologi Teknik Regional

Daerah penelitian terletak di Kabupaten Semarang. Batuan penyusun Kabupaten Semarang ini didominasi oleh batuan sedimen dan batuan gunung api pada bagian permukaannya. Gabungan batuan tersebut termasuk dalam sifat jenis batuan relatif lunak air dimana kemampuannya meresapkan air hujan tergolong besar. Jenis pelapukan batuan ini relatif rawan terhadap gerakan tanah bila mendapatkan curah hujan yang tinggi.



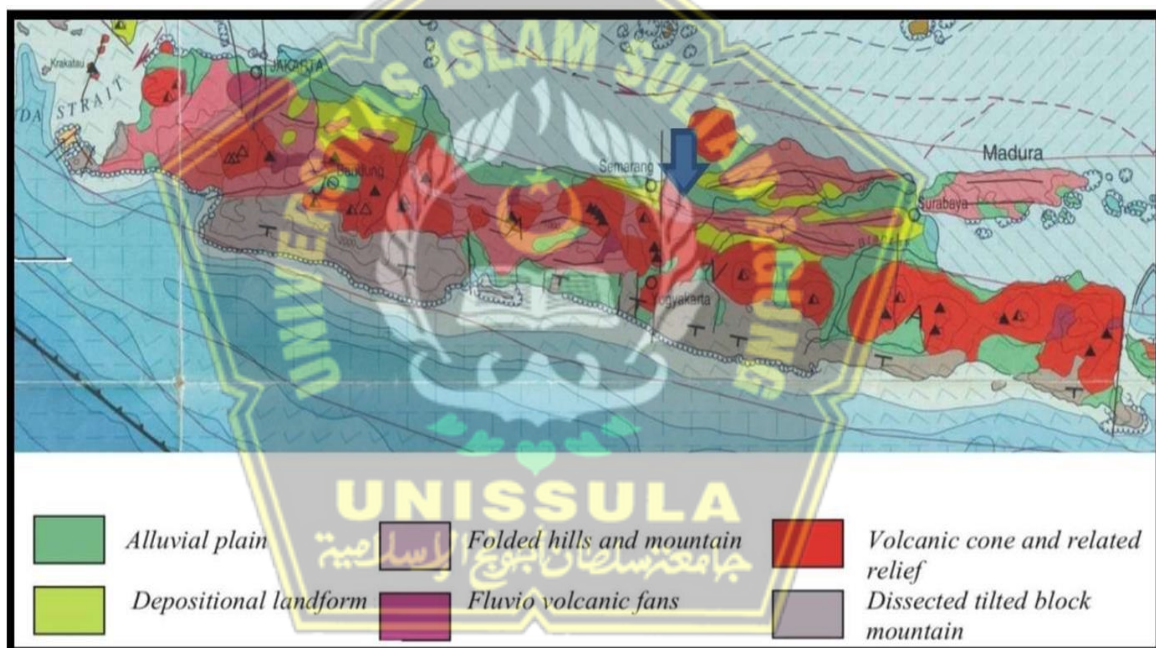
Gambar 2.1. Peta Geologi Regional Lembar Salatiga, Jawa (Sukardi dan T. Budhitrisna, 1992)

Berdasarkan peta geologi regional Lembar Salatiga, Jawa (Sukardi dan Budhitrisna, 1992) seperti Gambar 2.1., daerah penelitian dipengaruhi oleh beberapa formasi litologi yang termasuk pada lajur Kendeng, terdiri dari : Aluvium(Qa), Batuan gunung api tak terpisahkan(Qvu), Breksi gunung api (Qvb), Formasi Kabuh (Qpk), Formasi Pucangan (Qpp), Formasi Kalibeng (TmPk),

Anggota klitik formasi kalibeng(Tpkk), Anggota kapung formasi kalibeng(Tmkk), Anggota damar formasi kalibeng (Tmkd), Anggota dari formasi Banyak:Formasi Kalibeng (Tmkb), Formasi Kerek (Tmk) dan Formasi Pelang (Tomp).

2.1.1.1. Geomorfologi Regional

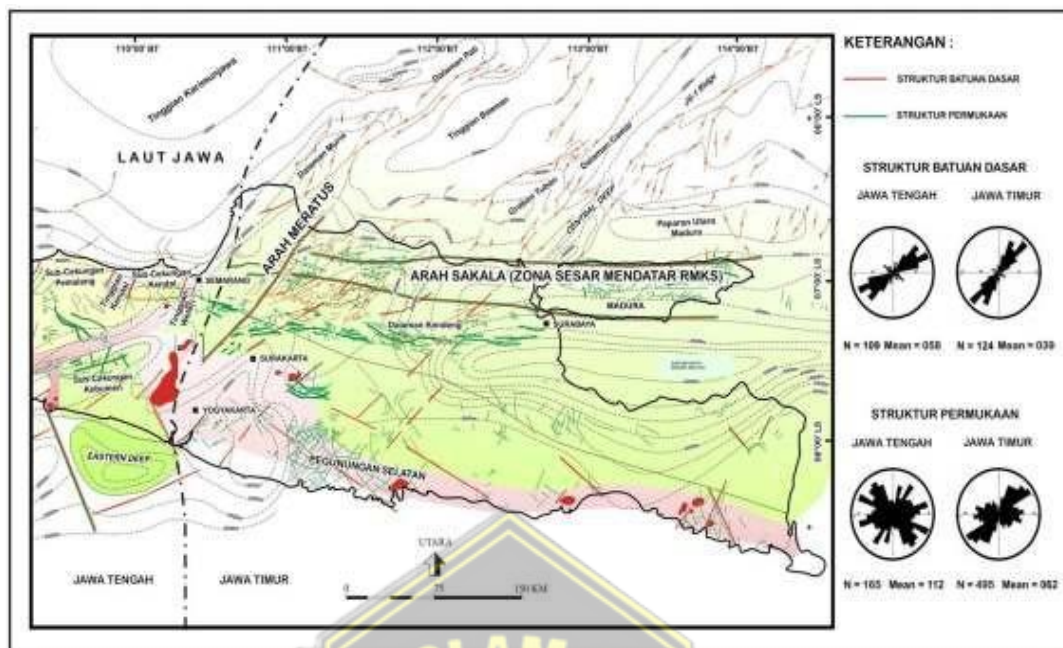
Geomorfologi regional Kabupaten Semarang dan sekitarnya menurut Verstappen (2000) sebagaimana terlihat pada Gambar 2.2 sebagian besar berupa perbukitan lipatan dan dataran pegunungan. Ketinggian tempat berkisar dari ± 60 meter dpl pada dataran sungai Jragung hingga ± 2.000 meter dpl pada puncak gunung Ungaran di bagian barat. Topografi dikontrol oleh struktur perlipatan berupa antiklinotium.



Gambar 2.2. Peta Geomorfologi Regional Pulau Jawa (Verstappen, 2000)

2.1.1.2. Struktur Geologi Regional

Struktur geologi regional yang berkembang di Kabupaten Semarang dan sekitarnya menurut Peta pola arah struktur geologi jawa 2003 (PT. Indra Karya, 2019) berupa antiklinorium dan sesar. Struktur lipatan berupa sinklin, antiklin dan sesar yang umumnya berarah relatif utara–selatan, seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Peta Pola Arah Struktur Geologi Jawa 2003 (PT. Indra Karya, 2019)

2.1.1.3. Stratigrafi Regional

Stratigrafi regional Kabupaten Semarang dan sekitarnya dari yang paling tua ke muda, dengan keterangan masing-masing formasi sebagai berikut :

a. Formasi Pelang (Tomp)

Formasi ini tersusun dari batuan napal bersisipan batugamping, berumur Miosen Awal. Bagian atas Formasi Pelang ini terendapkan secara selaras Formasi Kerek (Tmk).

b. Formasi Kerek (Tmk)

Pada bagian bawah batuan sedimen flisch, berlapis sangat baik, terdiri dari perselingan batulanau, batulempung, batupasir gampingan dan batu gamping pasir; mengandung bahan gunung api; bagian atas napal bersisipan batupasir tufaan - gampingan, batulanau tufan dan batupasir kerikilan; mengandung bahan gunung api sangat banyak, berumur Miosen Tengah.

c. Anggota dari formasi Banyak : Formasi Kalibeng (Tmkb)

Secara selaras diatas Formasi Kerek (Tmk) diendapkan Anggota dari formasi Banyak : Formasi Kalibeng (Tmkb) yang terdiri dari perselingan batupasir tufan, batulanau gampingan, batupasir dan batupasir kerikilan, berumur Miosen Akhir.

- d. Anggota damar formasi kalibeng (Tmkd)
Anggota damar formasi kalibeng (Tmkd) tersusun dari konglomerat, batupasir kerikilan, batupasir gampingan bersisipan batugamping, yang terendapkan menjemari pada Formasi Kalibeng (Tmpk) dan berumur Miosen Akhir – Pliosen.
- e. Anggota kapung formasi kalibeng (Tmkk)
Anggota kapung formasi kalibeng (Tmkk) terdiri dari batugamping pejal dibagian bawah, perselingan batugamping pasiran dan napal dibagian atas, terendapkan secara melensa pada Formasi Kalibeng (Tmpk) dan berumur Miosen Akhir – Pliosen.
- f. Anggota klitik formasi kalibeng (Tpkk)
Anggota klitik formasi kalibeng (Tpkk) terdiri dari perselingan kalkarenit, batugamping tufaan, batupasir tufaan dan napal di bagian atas; biokalkarenit di bagian bawah, yang terendapkan secara menjemari pada pengendapan akhir Formasi Kalibeng (Tmpk) dan berumur Pliosen.
- g. Formasi Kalibeng (Tmpk)
Formasi Kalibeng (Tmpk) ini tersusun dari Napal pejal dibagian atas, napal bersisipan batupasir tufan, dan bintal batugamping dibagian bawah, yang terendapkan secara selaras diatas Formasi Kerek (Tmk) dan berumur Miosen Muda – Pliosen.
- h. Formasi Pucangan (Qpp)
Formasi Pucangan (Qpp) terdiri dari bagian atas batulempung bersisipan batupasir tufaan dan tanah diatomea; breksi dibagian bawah, terendapkan tidak selaras diatas Formasi Kalibeng (Tmpk) dan Anggota klitik formasi kalibeng (Tpkk), berumur Pleistosen Awal.
- i. Formasi Kabuh (Qpk)
Secara selaras diatas Formasi Pucangan (Qpp) terendapkan Formasi Kabuh (Qpk) yang tersusun dari bagian atas perselingan konglomerat, batupasir tufaan dan tufa; dan lensa kalsirudit dibagian bawah. Berumur Pleistosen Tengah.
- j. Breksi gunung api (Qvb)
Diatas Formasi Kabuh (Qpk) secara tidak selaras terendapkan Breksi gunung

api (Qvb) yang terdiri dari breksi gunung api, konglomerat dan batupasir tufan, berumur pleistosen Akhir.

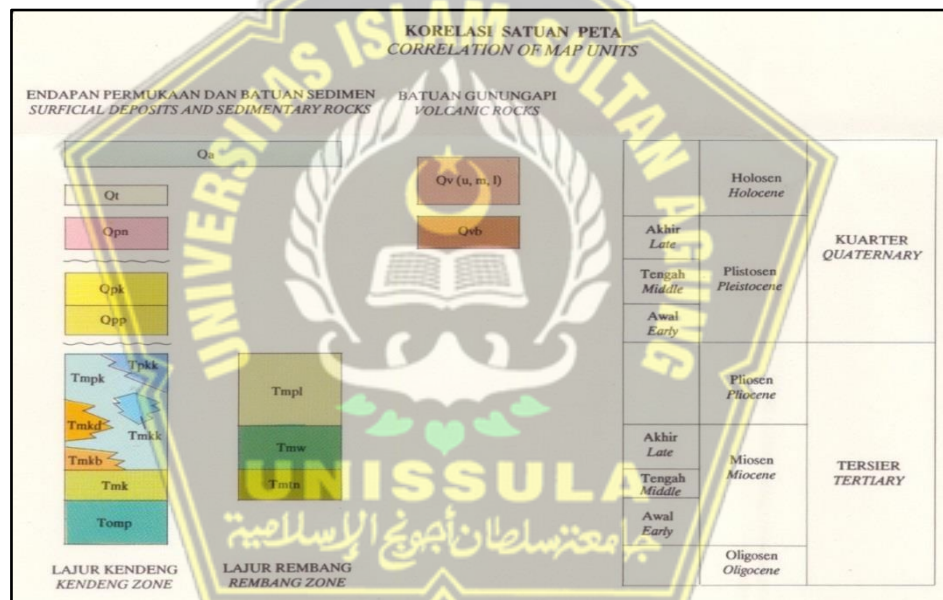
k. Batuan gunung api tak terpisahkan (Qvu)

Pada masa Holosen terendapkan Batuan gunung api tak terpisahkan (Qvu) yang terdiri dari Breksi gunung api, lava, tufa dan breksi lahar dari Gunung Ungaran.

l. Aluvium (Qa)

Aluvial merupakan endapan termuda, terdiri dari kerakal, kerikil, pasir dan lempung, berumur Holosen, terendapkan di sepanjang daerah aliran sungai Jragung.

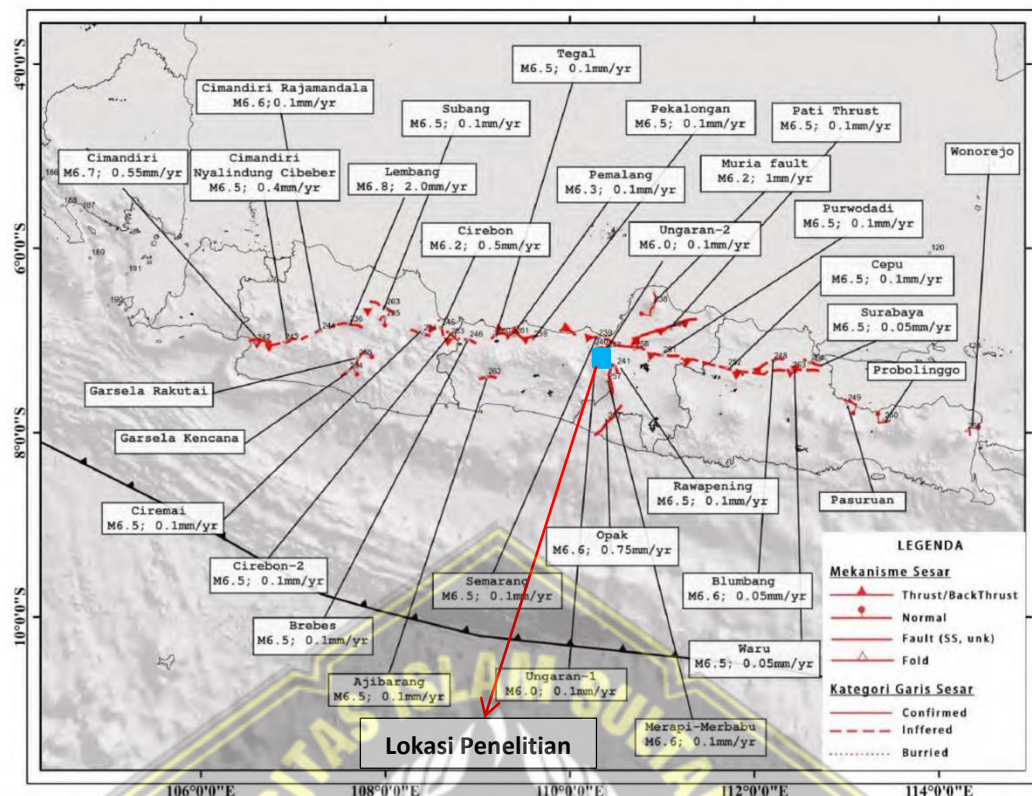
Urutan stratigrafi dapat dilihat pada kolom stratigrafi regional pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Kolom Stratigrafi Regional Lembar Salatiga, Jawa
(Sukardi dan T. Budhitisna, 1992)

2.1.1.4. Geologi Teknik Regional

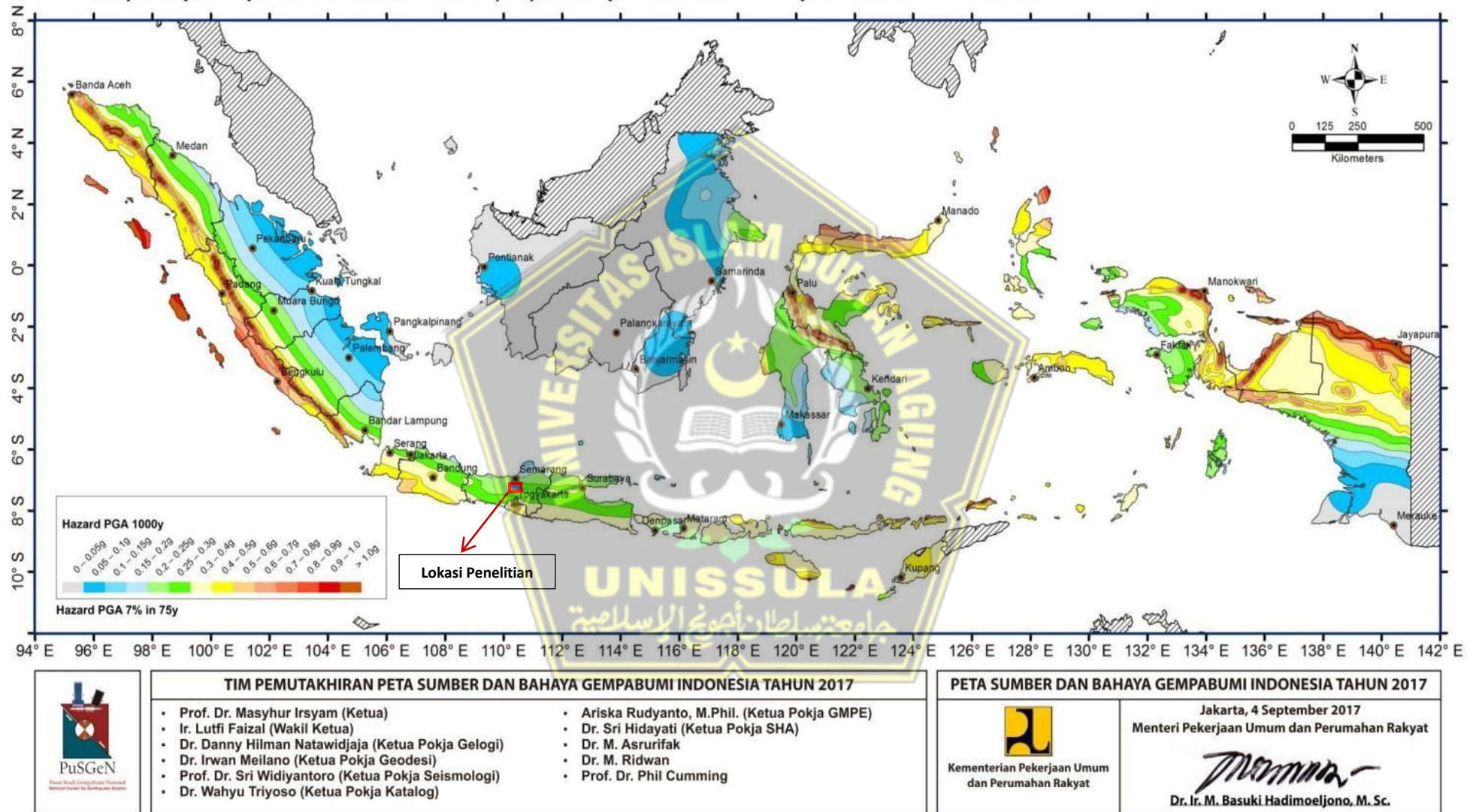
Daerah Kabupaten Semarang dan sekitarnya menurut peta Jalur Gempa dan Sesar Aktif di Pulau Jawa (Pusgen, 2017) seperti terlihat pada Gambar 2.5 menunjukkan daerah tersebut tidak dilewati oleh jalur sesar aktif. Jalur atau zona sesar aktif terdapat di sebelah utara yang berjarak sekitar 7 – 10 km dan berarah barat - timur yaitu sesar Ungaran-1 ($M 6.0 = 0,1 \text{ mm/thn}$) dan sesar Ungaran-2 ($M 6.0 = 0.1 \text{ mm/thn}$).



Gambar 2.5. Peta Jalur Gempa dan Sesar Aktif di Pulau Jawa (Pusgen, 2017)

SNI 8460:2017 tentang persyaratan perancangan geoteknik, menjelaskan bahwa koefisien seismik gempa rencana untuk lereng galian dan timbunan ditetapkan dengan kemungkinan terlewati besarnya selama umur rencana 50 tahun adalah 2% atau periode ulang 500 tahun. Namun Aldiamar (2019) menyatakan bahwa seharusnya koefisien seismik dihitung berdasarkan data gempa 10% dan umur rencana 50 tahun atau periode ulang 500 tahun. Sedangkan kriteria perancangan gempa berdasarkan peruntukan infrastruktur khususnya terowongan menggunakan umur rencana 100 tahun, angka probabilitas terlampaui sebesar 10% (periode ulang 1000 tahun). Data tersebut belum tersedia dalam katalog Peta Sumber dan Bahaya Gempabumi yang dikeluarkan oleh Pusgen (2017) sehingga memerlukan penelitian lebih lanjut. Maka untuk analisis terowongan dalam penelitian ini menggunakan probabilitas terlampaui sebesar 7% dan umur rencana 75 tahun (periode ulang 1071 tahun) seperti terlihat pada Gambar 2.6.

D7: Peta percepatan puncak di batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun

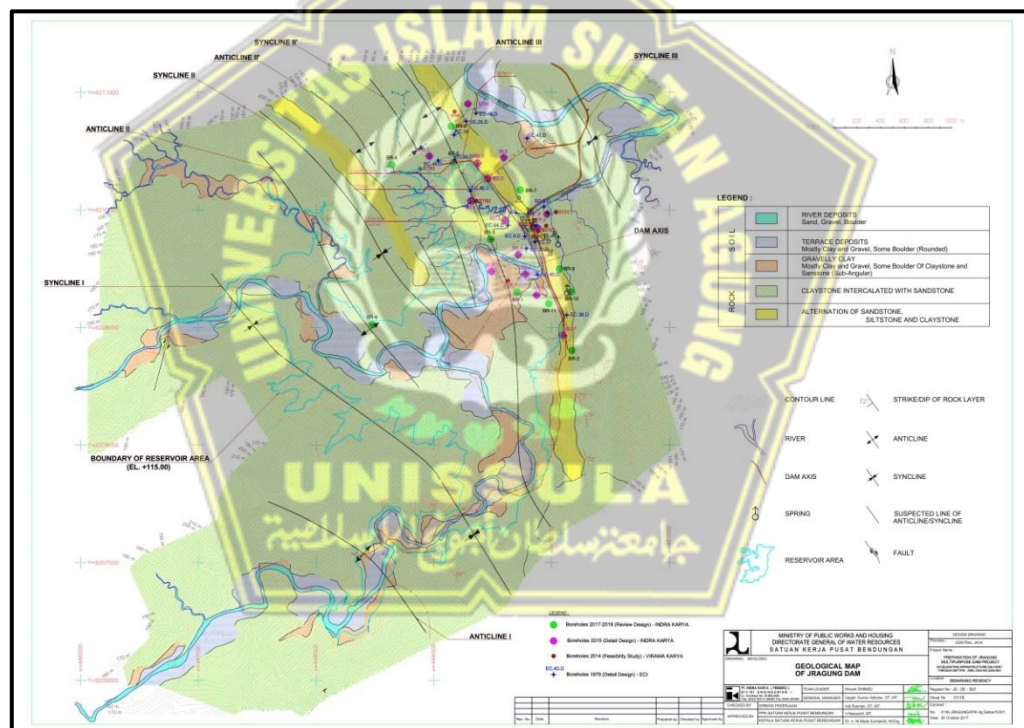


Gambar 2.6. Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Probabilitas Terlampaui 7% dalam 75 tahun (Pusgen, 2017)

2.1.2. Geologi dan Geologi Teknik Daerah Penelitian

Menurut *Detail Engineering Desain* PT. Indra Karya (2019), lithologi di daerah penelitian Bendungan Jragung dan sekitarnya di dominasi oleh perselingan batu lempung dan batu pasir serta perselingan batupasir, batulanau, dan batulempung. Satuan batuan yang dijumpai berupa : Endapan sungai, Endapan teras sungai, Endapan koluvial, Perselingan batulempung dan batupasir serta Perselingan batupasir, batulanau dan batulempung.

Kondisi batuan pondasi pada as bendungan dan terowongan tersusun atas perselingan batulempung dan batupasir dengan kemiringan lapisan kearah hilir dengan kondisi diskontinuitas rapat dan banyak *crack* atau retakan. Penyebaran batuan yang terdapat di daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Peta Geologi Daerah Penelitian (PT. Indra Karya, 2019)

2.1.2.1. Geomorfologi Daerah Penelitian

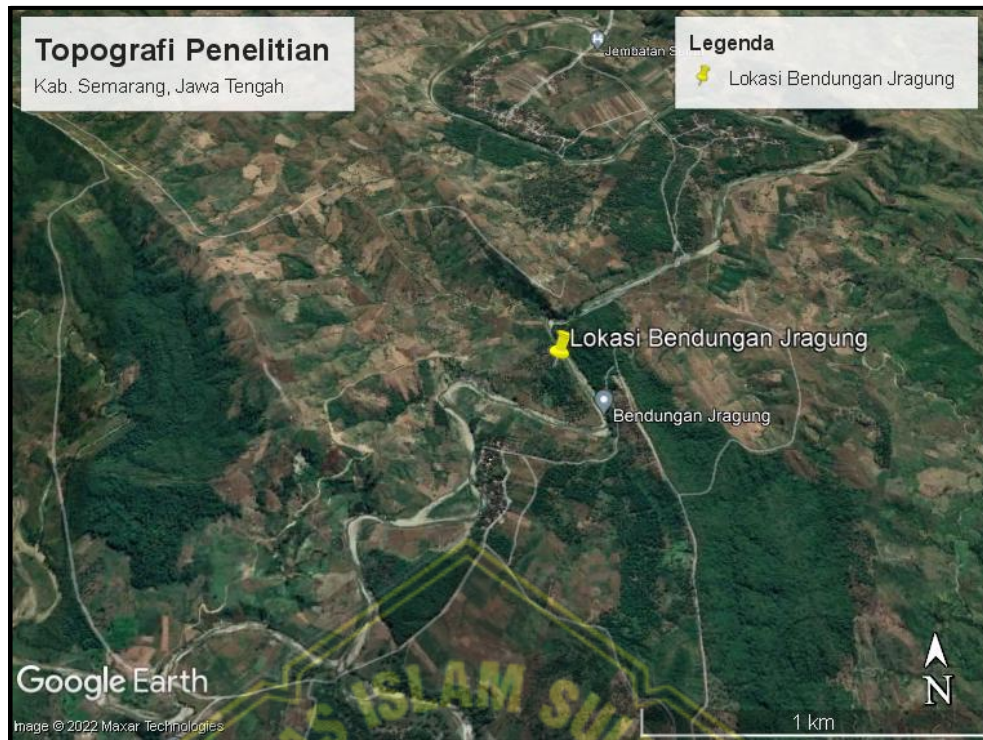
Satuan bentuk lahan dibedakan berdasarkan geomorfologi (Verstappen, 1977) serta mengacu pada klasifikasi bentuk lahan (Van Zuidam, 1985). Geomorfologi daerah penelitian dapat dibedakan menjadi 2 satuan geomorfologi sebagai berikut :

a. Satuan Bentuk Lahan Perbukitan Struktural

Satuan bentuk lahan perbukitan struktural menempati 60% luasan peta. Satuan ini memiliki bentuk perbukitan pada bagian barat, tengah dan timur daerah penelitian yang memanjang relatif utara - selatan oleh lembah-lembah hasil erosi. Satuan ini memiliki elevasi lebih dari 100 meter dpl, dengan pola pengaliran paralel dan bentuk lembah 'V-U' dengan kelerengan curam hingga sangat curam (30-140%). Satuan ini dipengaruhi oleh perlapisan tegak dengan kedudukan hampir relatif barat laut - tenggara, dengan litologi dominan berupa perselingan batulempung dan batupasir dengan struktur aktif berupa sesar, kekar dan lipatan. Lahan memiliki kemiringan lereng yang curam sampai terjal, rawan erosi dan longsor, sering terjadi erosi dan gerakan tanah dengan kecepatan yang perlahan – lahan serta sering ditemukan singkapan batuan.

b. Satuan Bentuk Lahan Dataran Banjir

Satuan bentuk lahan dataran banjir menempati 40% luasan peta. Satuan ini terletak pada bagian tengah daerah penelitian yang terbentuk oleh hasil erosi dari perbukitan sekitar. Satuan ini memiliki elevasi antara 60-100 meter dpl, dengan pola pengaliran contorted dan bentuk lembah 'U' dengan kelerengan landai - miring (2-15%). Satuan ini dipengaruhi oleh perlapisan tegak dengan kedudukan hampir relatif barat laut - tenggara, dengan litologi dominan berupa perselingan batulempung dan batupasir dengan struktur aktif berupa sesar, kekar dan lipatan. Lahan memiliki kemiringan lereng landai hingga curam, sangat rawan terhadap erosi, apabila terjadi longsor akanbergerak dengan kecepatan rendah.



Gambar 2.8. Kondisi Topografi Daerah Penelitian
(Sumber : Google Earth, 2022)

2.1.2.2. Struktur Daerah Penelitian

Struktur geologi yang terdapat disekitar Bendungan Jragung berupa perlapisan batuan, kekar, antiklin dan sesar. Sayap antiklin dengan kemiringan perlapisan batuan relatif tegak kearah hilir dan dijumpai adanya sesar-sesar minor. Struktur yang berkembang di daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.7.

2.1.2.3. Stratigrafi Daerah Penelitian

Daerah penelitian Bendungan Jragung menurut PT. Indra Karya (2019) dipengaruhi oleh beberapa Satuan batuan. Urutan pengendapan satuan batuan dari paling tua ke muda adalah sebagai berikut :

a. Batupasir

Batupasir berselingan dengan batulanau dan batulempung dengan resistensi lebih tinggi dan membentuk igir bukit memanjang arah barat laut – tenggara. Batupasir ini selaras dengan batulempung membentuk sudut 70° - 80° kearah hilir. Batupasir miring kearah hulu pada hulu sumbu antiklinal.

b. Batulempung

Pada batulempung yang relatif lebih lunak terdapat diantara lapisan batupasir yang lebih kompak, oleh gaya tektonik/ kompresi yang menghasilkan bidang geser pada semua jenis batuan.

c. Endapan Koluvial

Endapan berupa campuran dari berbagai macam batuan induk yakni batupasir serta batulempung yang telah lapuk dan terletak di lereng/kaki bukit. Endapan koluvial lazim disebut sebagai slump.

d. Endapan Teras Sungai

Terdiri dari bongkah batu hingga lempung, telah mengalami kompaksi maupun bercampur dengan endapan lereng bukit (endapan koluvial).

e. Endapan Sungai

Terdiri dari butiran kerakal, kerikil, pasir, lanau dan lempung, bersifat urai, dengan komposisi terdiri dari bongkah batu andesit, batupasir maupun batulempung, dan memiliki ketebalan bervariasi.

2.1.2.4. Geologi Teknik Daerah Penelitian

Menurut PT. Indra Karya (2019), berdasarkan dari CRIEPI (*Central Research Institute of Electric Power Industry*) seperti Tabel 2.1, klasifikasi batuan pada daerah penelitian Bendungan Jragung terdiri dari kelas D, CL, CL-CM dan CM. Ketebalan kelas D : 2-6 m, CL: 0,5-8 m. Rencana pondasi bendungan utama dan terowongan saluran pengelak diletakkan pada batuan kelas CL-CM. Profil geoteknik saluran pengelak dapat dilihat pada Gambar 2.10.

PT. Virama Karya (2014) melaporkan *Compressive Strength* hasil pengujian 90 sampel batulempung rata-rata 24,75 kg/cm² dan dari 17 sampel batupasir rata-rata 46,39 kg/cm². Pada *Detail Desain* PT. Indra Karya (2015) dilakukan pengujian terhadap batulempung dan batupasir masing-masing 10 sampel, di dapatkan nilai *Compressive Strength* untuk batulempung 58.03 kg/cm² dan untuk batupasir 90.71 kg/cm². Rata-rata *Compressive Strength* dari batulempung dan batupasir adalah 74.37 kg/cm². Hasil dari uji *Unconfined Compressive Strength* didapatkan 40.5 – 90 kg/cm². Berdasarkan dari *The Engineering Geology Group* (1972), klasifikasi batuan tersebut termasuk dalam

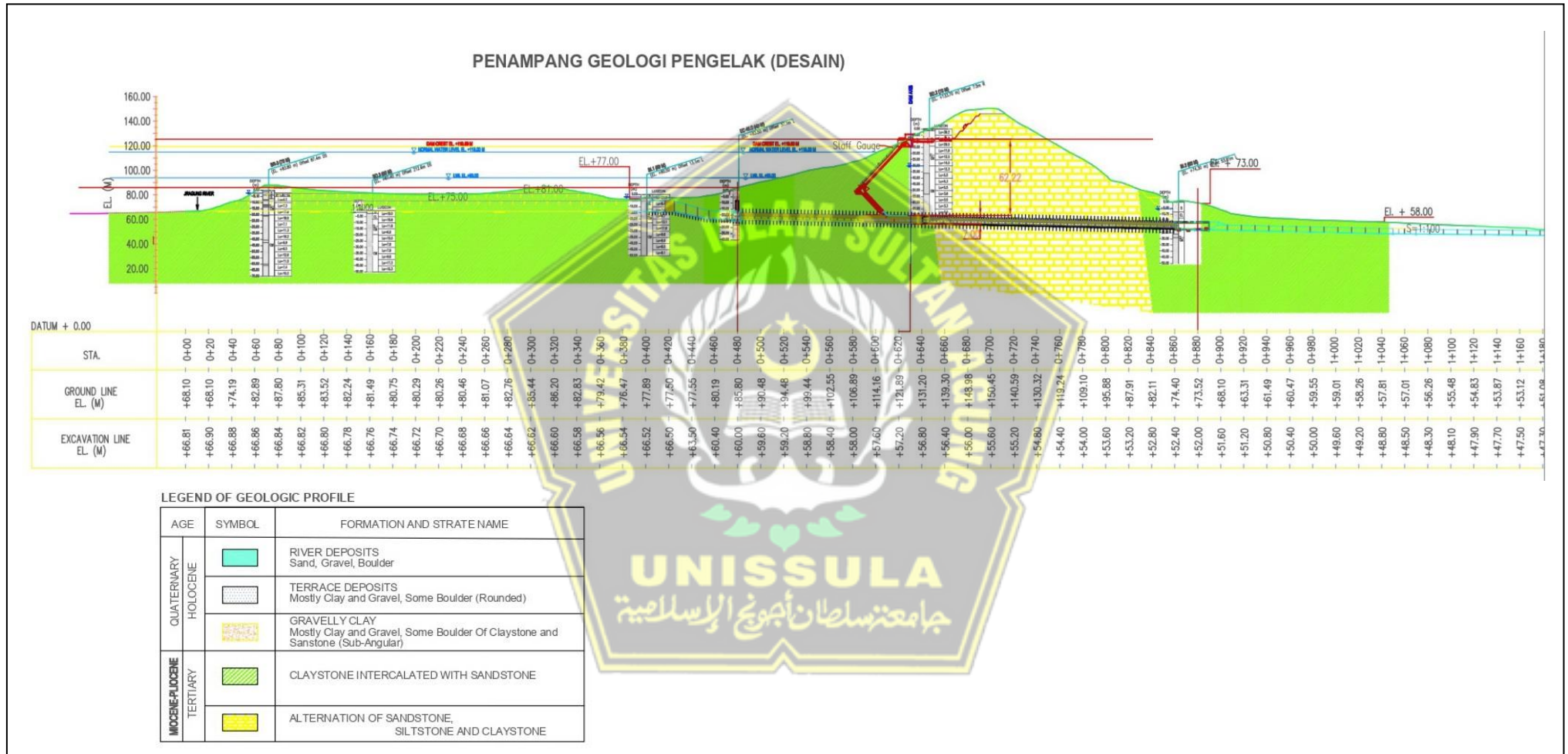
pondasi batuan lunak (*soft rock foundation*). Dan pada DED (*Detail Engineering Desain*) PT. Indra Karya (2018) telah melakukan pengujian *Compressive Strength* terhadap 4 sampel inti batuan, dari *Uniaxial Compressive Strength* didapatkan $2.887 - 15.86 \text{ kg/cm}^2$.

Klasifikasi batuan berdasarkan *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) ini menurut ISRM (1981) termasuk dalam batuan sangat lemah – lemah (*very weak – weak*) dan menurut Bieniawski (1973) termasuk sangat rendah (*very low*).

Tabel 2.1. Klasifikasi Batuan dari CRIEPI

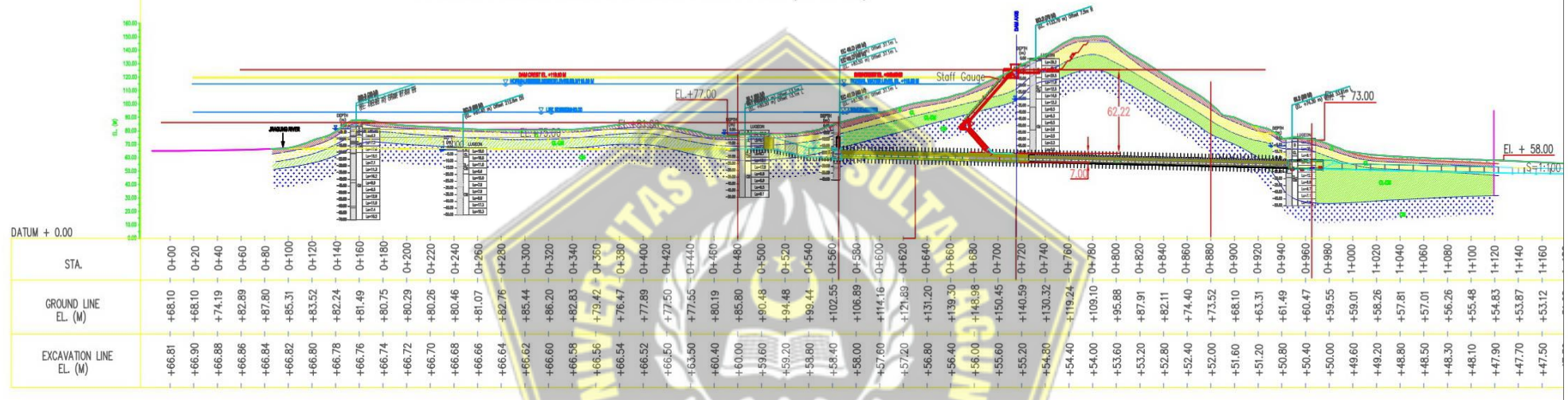
Grade		Description
A		The rock mass is very fresh, and the rock forming minerals and grains undergo neither weathering nor alteration. Joints are extremely tight and Sound by hammer blow is clear.
B		The rock mass is solid. There is no opening joint and crack (even of 1mm). But rock forming minerals and grains undergo a little weathering and alteration in partly. Sound by hammer blow is clear.
C	CH	The rock mass is relatively solid. The rock forming minerals and grains undergo weathering except for quarts. the rock is contaminated by limonite, etc. The cohesion of Joint and cracks is slightly decreased and rock blocks are separated by firm hammer blow along joints. Clay materials remain on the separation surface. Sound by hammer blow is a little dim.
	CM	The rock mass is somewhat soft. The rock forming minerals and grains are somewhat softened by weathering, except for quarts. The cohesion of Joints and cracks is somewhat decreased and rock block are separated by ordinary hammer blow along the joints. Clay materials remain on the separation surface. Sound by hammer blow is somewhat dim.
	CL	The rock mass is soft. Weathering softens the rock forming minerals and grains. The cohesion of Joints and cracks is decreased and rock blocks are separated by soft hammer blow along the joints. Clay materials remain on the separation surface. Sound by hammer blow is dim.
D		The rock mass is remarkably soft. Weathering softens the rock forming minerals and grains. The cohesion of Joints and cracks is almost absent. The rock mass collapses by light hammer blow. Clay materials remain on the separation surface. Sound by hammer blow is remarkably.

*Central Research Institute of Electric Power Industry



Gambar 2.9. Profil Geologi Memanjang Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019)

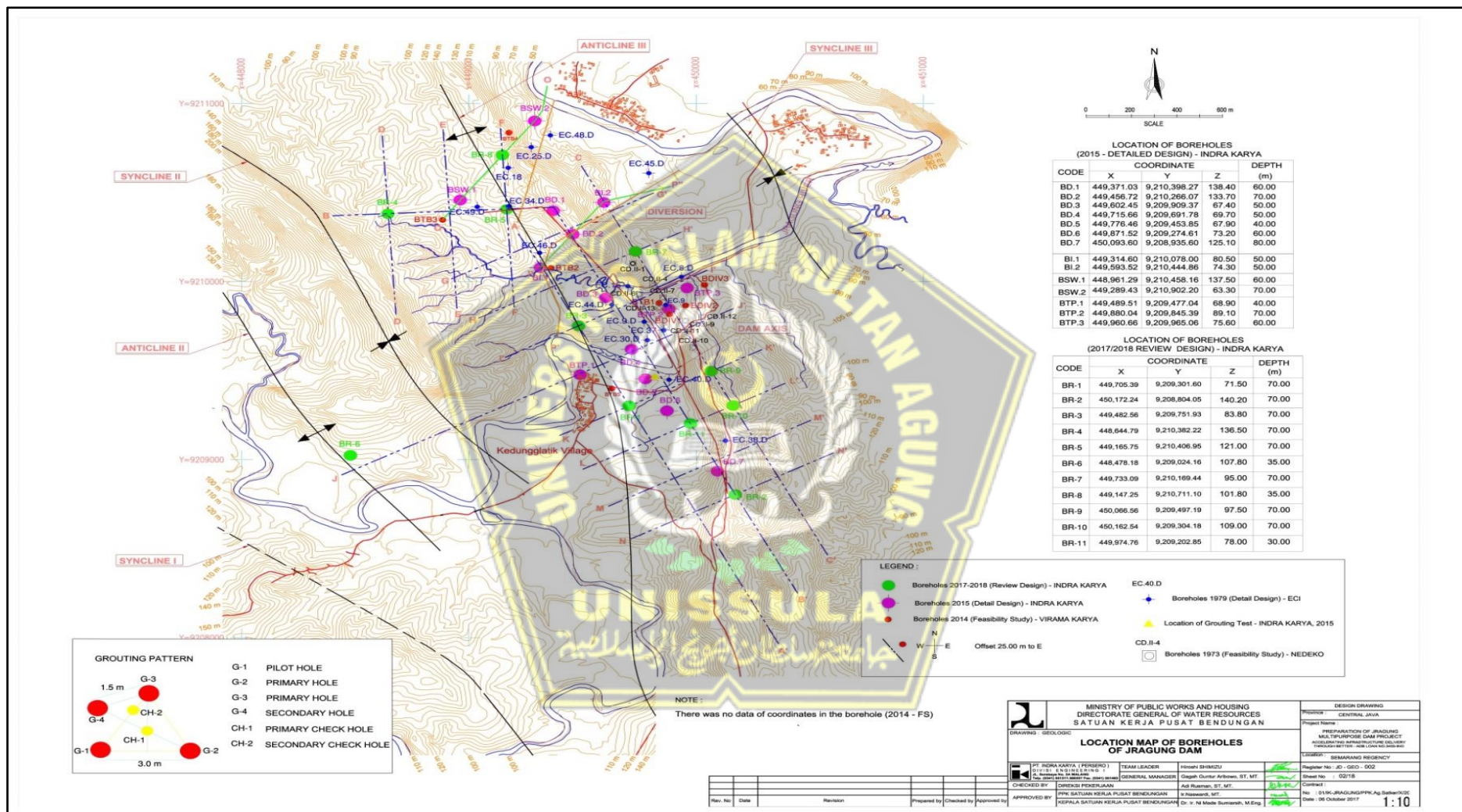
PENAMPANG GEOLOGI TEKNIK PENGELAK (DESAIN)



LEGEND OF ROCK GRADE PROFILE

ROCK GRADE	PROPERTY
CL	Completely weathered rock to a reddish soil without remaining mother-rock texture. Very low cementation parts are observed in the boring core, which is like sand and gravel. Core recovery ratio ranges from 0 % to 90 %.
CL	Moderately to highly weathered rock to a brown soil although remaining mother-rock texture. The mineral grains are not decomposed. Low cementation parts, which are like sand and gravel are observed in a boring core. Core recovery ratio is more than 70 %.
CL-CM	Slightly weathered to fresh rocks, which consist of mainly claystone and sandstone. Middle-high permeability. Including moderately-much joints. Mainly joints are opened and weathered along the joint plane. This class with degree of cementation contains the fresh part and relatively weathered part, but they have almost same hardness. Core length - mainly under than 10 cm, but not breccias.
CM	Slightly weathered to fresh rock, which consists of mainly claystone and sandstone. Strong rock. Low-high permeability. Including moderately joints. Little joint open and weathered along the joint plane. This class with high degree of cementation contains the fresh part and the relatively weathered part, but they have almost same hardness. Core length is mainly 10 - 30 cm.

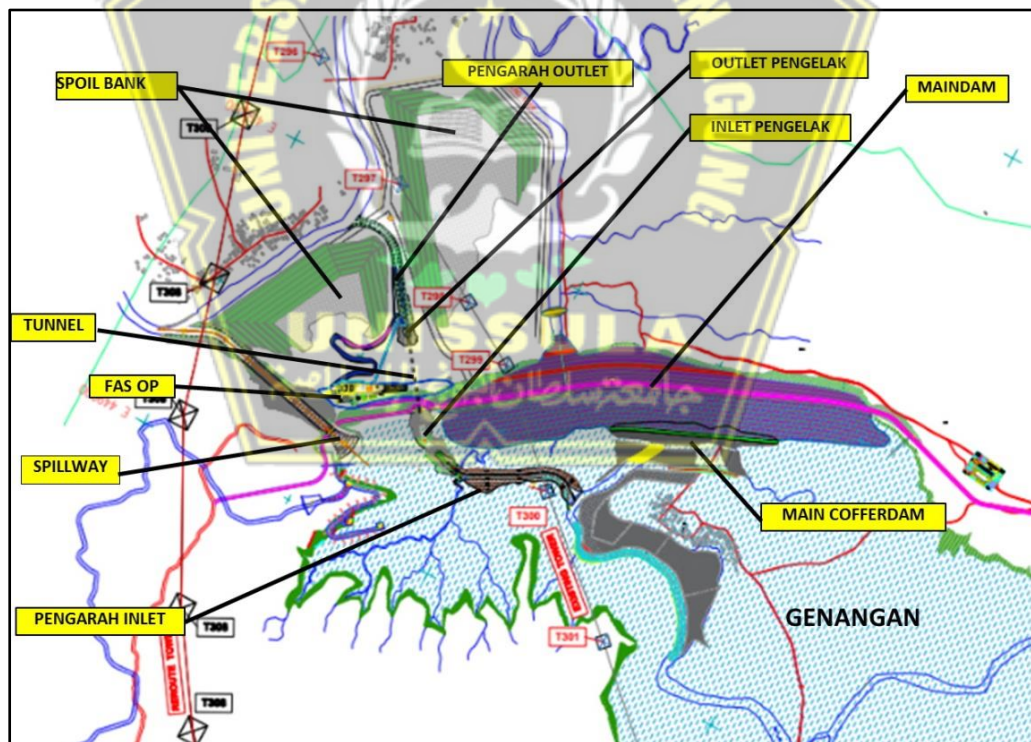
Gambar 2.10. Profil Geologi Teknik Memanjang Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019)



Gambar 2.11. Lokasi Titik Pemboran Bendungan Jragung (PT. Indra Karya, 2019)

2.1.3. Perencanaan Terowongan Pengelak

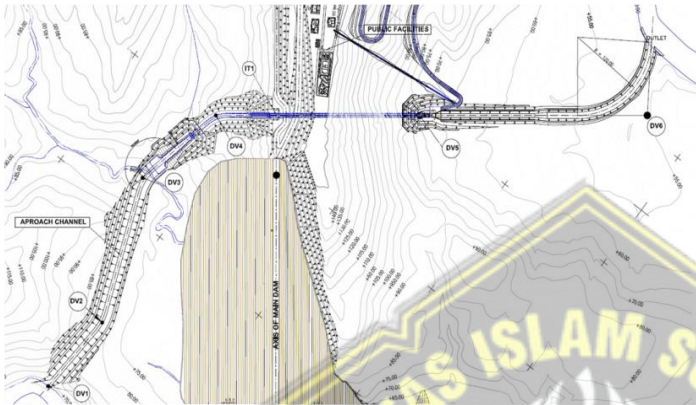
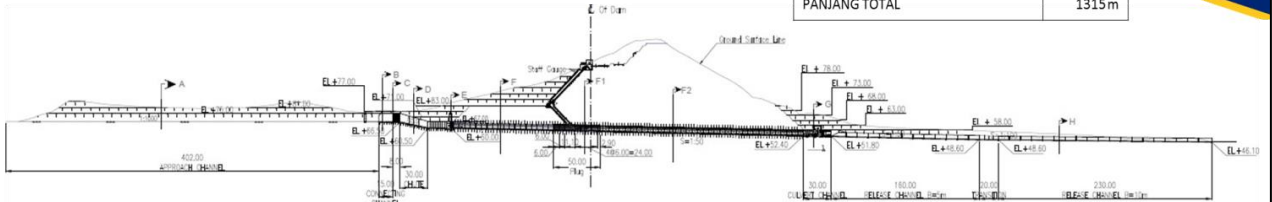
Terowongan saluran pengelak Bendungan Jragung direncanakan oleh konsultan perencana PT. Indra Karya (persero) sepanjang ± 400 m, dengan diameter dalam 5,3 m, dan dimensi pintu air berukuran 5,4 m x 5,4 m, yang terletak pada lereng sisi kiri (barat laut) sungai Jragung seperti pada Gambar 2.12. Dasar terowongan saluran pengelak pada bagian hulu direncanakan pada elevasi +060.00 m dan bagian hilir terowongan pada elevasi +052.40 m. Debit banjir rancangan untuk terowongan saluran pengelak direncanakan dengan periode ulang 50 tahun (Q50), sehingga kapasitas debit yang akan melewati saluran pengelak sebesar $280 \text{ m}^3/\text{det}$. Denah dan potongan memanjang terowongan saluran pengelak Bendungan Jragung dapat dilihat pada Gambar 2.13. Tipikal dan bentuk geometri penampang melintang dari saluran pengelak direncanakan berbentuk tapal kuda, seperti pada Gambar 2.14 dan Gambar 2.15.



Gambar 2.12. Denah dan Tata Letak Bendungan Jragung
(PT. Indra Karya, 2019)

BANGUNAN PENGELAK (DIVERSION)

PANJANG SALURAN TERBUKA (INLET)	465 m
PANJANG TEROWONGAN (TUNNEL)	380 m
PANJANG SALURAN TERBUKA (OUTLET)	470 m
PANJANG TOTAL	1315 m



❖ Bangunan Pengelak

- Kapasitas debit : 280 m³/det
- Metode pengalihan : Terowongan

❖ Saluran Inlet

- Bentuk trapesium dengan lebar bawah 7 m dan lebar atas 23,92 m kemiringan 1/1000 (El inlet 67.0 dan outlet 60.0)

❖ Terowongan pengelak

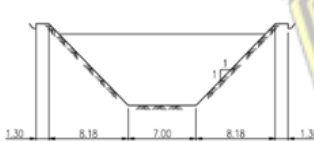
- Panjang terowongan : 380 m
- Diameter terowongan : 5,3 m (Tapal kuda tipe (2R))
- Kemiringan Terowongan : 1/50 (inlet El.60,0 outlet 52,4 m)

❖ Saluran outlet

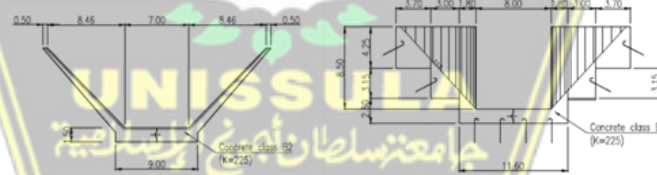
- Bentuk trapesium dengan lebar bawah 10 m dan lebar atas 17 m kemiringan 1/100 (El inlet 52,4 m dan outlet 46,1 m)

Gambar 2.13. Denah dan Potongan Memanjang Bangunan Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019)

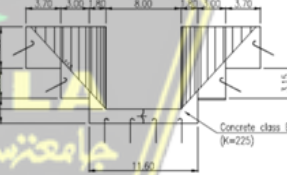
TIPIKAL SALURAN PENGELAK (DIVERSION)



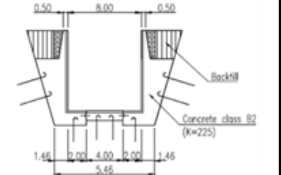
SECTION (A)
SCALE B



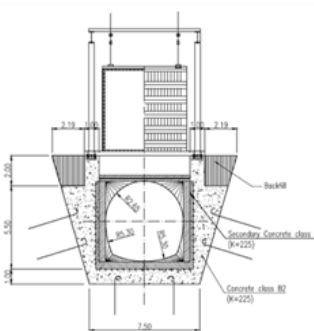
SECTION (B)
SCALE B



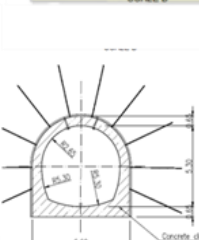
SECTION (C)
SCALE B



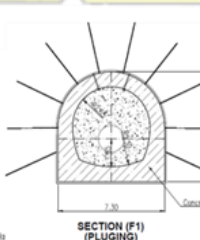
SECTION (D)
SCALE B



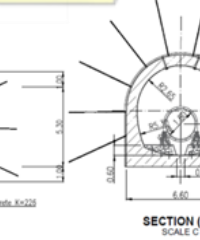
SECTION (E)
SCALE C



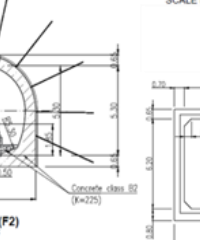
SECTION (F)
SCALE C



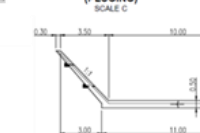
SECTION (F1)
SCALE C



SECTION (F2)
SCALE C

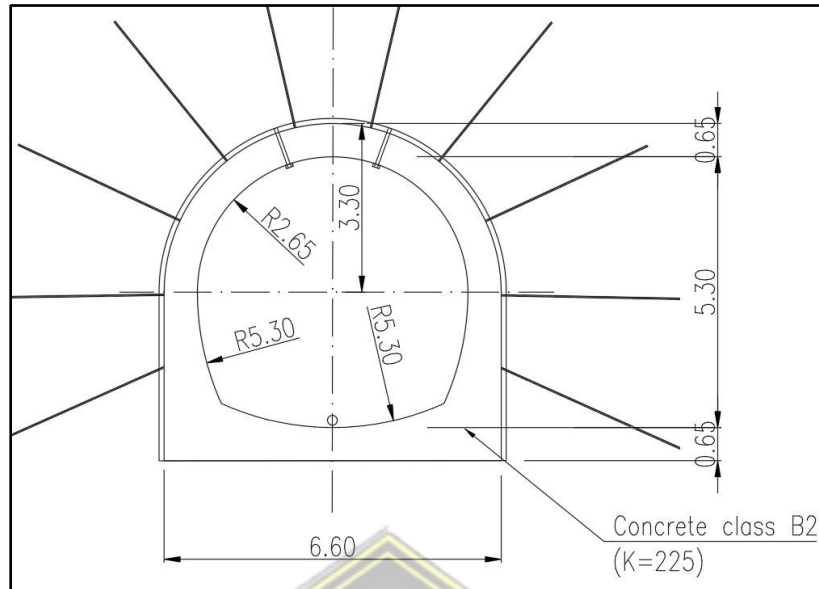


SECTION (G)
SCALE C



SECTION (H)
SCALE C

Gambar 2.14. Tipikal Penampang Melintang Saluran Pengelak (PT. Indra Karya, 2019)



Gambar 2.15. Geometri Penampang Melintang Saluran Pengelak
(PT. Indra Karya, 2019)

Terowongan saluran pengelak terletak disebelah lereng kiri sungai Jragung (menembus bukit tumpuan kiri), yang di dominasi oleh batuan perselingan batulempung dan batupasir. Dari hasil pemetaan geologi permukaan dibagian *inlet* dan *outlet* serta sepanjang saluran pengelak, juga dikorelasi dengan lubang pemboran yang berada disekitarnya, dijumpai perselingan batulempung dan batupasir klas D - CM (CRIEPI). Profil geologi dan geologi teknik memanjang saluran pengelak digambarkan pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10. Pemboran untuk investigasi geologi di lokasi Bendungan Jragung telah dilaksanakan oleh beberapa konsultan terdahulu. Lokasi titik - titik pemboran dapat dilihat pada Gambar 2.11.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Pengertian Terowongan

Terowongan merupakan struktur bawah tanah yang mempunyai panjang lebih dari lebar penampang galiannya dan mempunyai gradient memanjang kurang dari 15% serta penggaliannya menggunakan cara tertentu tanpa mengganggu permukaan tanah di atasnya (Rori et al., 2017). Penggalian terowongan yang dilakukan akan menyebabkan terjadinya perubahan tegangan dimana pada saat sebelum penggalian kondisi tegangan massa batuan atau tanah

berada pada keseimbangan dalam medan gravitasi. Perubahan kondisi inilah yang pada akhirnya menyebabkan deformasi pada suatu terowongan. Pemilihan bentuk dan tipe penampang disesuaikan dengan kebutuhan yang ada dalam perencanaan suatu terowongan.

2.2.2. Pemetaan Geologi dan Geologi Teknik

Tujuan dari geologi teknik adalah menyediakan informasi dasar untuk perencanaan penggunaan lahan, perencanaan, desain, konstruksi, dan pemeliharaan pada suatu pekerjaan konstruksi. Informasi tersebut diperlukan untuk menilai kelayakan penggunaan lahan yang diusulkan atau melakukan rekayasa dan dapat juga digunakan untuk membantu dalam pemilihan jenis dan metode konstruksi yang paling tepat, untuk memastikan stabilitas struktur dalam pengaturan alamnya, dan untuk membantu kinerja pemeliharaan yang diperlukan. Penelitian dan pemetaan geologi teknik terutama diarahkan untuk memahami hubungan timbal balik antara lingkungan geologis dan situasi teknik, sifat dan hubungan masing – masing komponen geologi, proses geodinamik aktif dan prognosis proses yang mungkin dihasilkan dari perubahan yang dilakukan (Dearman, 1991).

Penyelidikan geologi teknik secara garis besar terdiri dari tiga tahap, yaitu studi pustakaterkait kondisi geologinya, pekerjaan pendahuluan terhadap kondisi lapangan dan eksplorasi atau menjelajahi kondisi lapangan secara detail. Tetapi tahapan – tahapan yang ada bersifat fleksibel tergantung dari kondisi masing – masing daerah penyelidikan (Bell, 2007).

Pemetaan karakteristik geologi teknik menurut de Vallejo and Ferrer (2011) dibagi menjadi 3 (tiga) skala peta yaitu 1 : 25.000 s.d 1 : 50.000 untuk pemetaan karakteristik secara umum, 1 : 5.000 s.d 1 : 25.000 untuk pekerjaan konstruksi termasuk di dalamnya lereng, penggalian dan material konstruksinya dan 1 : 100 s.d 1 : 5.000 untuk pemetaan geologi teknik secara detail dengan tujuan yang spesifik. Dengan beberapa pertimbangan tersebut dan ketersediaan peta topografi (data sekunder) pemetaan geologi teknik ini digunakan skala 1 : 4.000. Beberapa aspek identifikasi dalam pemetaan geologi teknik meliputi: aspek geomorfologi, aspek batuan dan tanah, aspek struktur geologi, aspek hidrogeologi

(Dearman, 1991). Pengamatan yang dilakukan dalam pemetaan geologi teknik adalah sebagai berikut :

a. Geomorfologi

Identifikasi morfologi diperlukan untuk mengelompokkan bentuk bentang alam mulai dari kategori datar, curam sampai dengan terjal berdasarkan rentang nilai kemiringan lereng yang diperoleh. Kemudian dari pengelompokan tersebut dideskripsikan tingkat kelongsoran tanah yang akan terjadi. Faktor pengontrol suatu kemiringan lereng erat kaitannya dengan kondisi batuan, hidrogeologi, proses geodinamik dan proses permukaan suatu daerah (Dearman, 1991). Klasifikasi kemiringan lereng oleh van Zuidam (1983) pada Tabel 2.2. digunakan dalam penilaian tingkat kelerengan daerah penelitian.

Tabel 2.2. Klasifikasi Kemiringan Lereng (van Zuidam, 1983)

Kelas Lereng	Proses, Karakteristik dan Kondisi Lahan	Kategori
0° - 2° (0 - 2 %)	Lahan datar atau hampir datar, tidak terdapat erosi yang luas, dapat diolah dengan mudah dalam kondisi kering.	Datar
2° - 4° (2 - 7 %)	Lahan memiliki kemiringan lereng landai, apabila terjadi longsor akan bergerak dengan kecepatan rendah, pengikisan dan erosi akan meninggalkan bekas yang sangat dalam.	Landai
4° - 8° (7 - 15 %)	Lahan memiliki kemiringan lereng landai hingga curam, sangat rawan terhadap erosi, apabila terjadi longsor akan bergerak dengan kecepatan rendah.	Miring
8° - 16° (15 - 30 %)	Lahan memiliki kemiringan lereng yang curam, rawan terhadap bahaya longsor, erosi permukaan dan erosi alur.	Agak Curam
16° - 35° (30 - 70 %)	Lahan memiliki kemiringan lereng yang curam sampai terjal, rawan erosi dan longsor, sering terjadi erosi dan gerakan tanah dengan kecepatan yang perlahan - lahan.	Curam
35° - 55° (70 - 140 %)	Lahan memiliki kemiringan lereng yang terjal, rawan terhadap erosi, sering ditemukan singkapan batuan.	Sangat Curam
> 55° (> 140 %)	Lahan memiliki kemiringan lereng yang terjal, rawan terhadap longsor batuan, singkapan batuan muncul di permukaan.	Curam Ekstrim

b. Batuan dan Tanah

Identifikasi batuan dan tanah dilakukan dengan mencari singkapan sesuai dengan rencana stasiun pengamatan yang sudah ditentukan guna mendapatkan data- data yang diperlukan dalam penelitian. Dari singkapan tersebut didapatkan data berupa jenis batuan serta kualitas batuan seperti : tingkat pelapukan, kekerasan batuan, komposisi mineral. Untuk menilai tingkat pelapukan massa batuan di lapangan dengan mengacu pada *International Society for Rock Mechanics (ISRM)*, seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Tingkat Pelapukan Batuan (ISRM, 1978)

Kondisi	Deskripsi	Tingkat Pelapukan
Segar (<i>fresh</i>)	Tidak terlihat tanda adanya material hasil lapukan batuan. Perubahan warna sangat rendah pada permukaan diskontinuitas	I
Lapuk rendah (<i>slightly weathered</i>)	Adanya indikasi perubahan warna pada batuan dan permukaan diskontinuitas. Perubahan warna terjadi pada seluruh material batuan	II
Lapuk sedang (<i>moderately weathered</i>)	Material batuan hancur atau berubah menjadi tanah kurang dari setengah bagian	III
Lapuk tinggi (<i>highly weathered</i>)	Material batuan hancur atau berubah menjadi tanah lebih dari setengah bagian	IV
Lapuk sangat tinggi (<i>completely weathered</i>)	Keseluruh material batuan hancur dan berubah menjaditanah namun masih terlihat struktur massa batuan	V
Tanah residu (<i>residual soil</i>)	Keseluruh material batuan telah berubah menjadi tanah, struktur massa batuan dan kemas telah terlapukkan. Tanah hasil lapukan belum mengalami transportasi secara signifikan.	VI

Untuk memperkirakan kekuatan massa batuan di lapangan mengacu pada estimasi nilai *Uniaxial Compressive Strength (UCS)* untuk batuan utuh (Hoek and Brown, 1998), seperti pada Tabel 2.4. Untuk kondisi batuan lapuk tinggi atau tanah, nilai UCS didapatkan dari pengujian kuat tekan bebas tanah. Batuan lapuk tinggi atau tanah memiliki nilai *Point Load* nol karena untuk mendapatkan nilai *Point Load*, sampel pengujian harus berupa batuan.

Tabel 2.4. Estimasi Nilai *Uniaxial Compressive Strength (UCS)* di Lapangan untuk Batuan Utuh (Hoek and Brown, 1998)

Tingkat	Klasifikasi	UCS (MPa)	Point Load	Identifikasi Lapangan	Contoh
R6	Kuat Ekstrim	> 250	> 10	Sampel hanya dapat diambil dengan menggunakan palu geologi (sampel ekstrim)	basalt segar, rijang, diabase, gneis, granit, kuarsit
R5	Sangat Kuat	100 – 250	4 – 10	Sampel membutuhkan banyak pukulan palu geologi	amfibolit, batupasir, basalt, gabbro, gneis
R4	Kuat	50 – 100	2 – 4	Sampel membutuhkan lebih dari satu pukulan palu geologi	batugamping, marmer, batupasir, sekis
R3	Kuat Sedang	25 – 50	1 – 2	Tidak dapat digores dengan pisau, sampel bisa dipecah dengan palu geologi	filit, sekis, batulanau
R2	Lemah	5 – 25	0	Sulit digores pisau	batukapur, batulempung, batulanau, serpih, batugaram
R1	Sangat Lemah	1 – 5	0	Dapat digores menggunakan pisau	batuan lapuk tinggi atau batuan alterasi
R0	Lemah Ekstrim	< 1	0	Mudah digores dengan kuku jari	tanah

Pengambilan data tidak hanya dilakukan pada singkapan batuan, tetapi juga pada tanah yang berada di permukaan. Pengambilan data tanah di permukaan dilakukan untuk mengetahui sifat indeks dan sifat keteknikan tanah. Data yang diambil berupa sampel tanah terganggu (*disturbed sample*) dan sampel tanah tidak terganggu (*undisturbed sample*).

c. Struktur Geologi

Pengukuran struktur geologi dilakukan untuk mengidentifikasi adanya kekar, sesar dan perlipatan. Pengukuran dilakukan dengan melakukan observasi dan pengamatan terhadap bukti-bukti adanya struktur geologi di lapangan dengan sebelumnya melakukan deliniasi terhadap kelurusan menggunakan peta *Digital Elevation Model (DEM)*. Menurut Dearman (1991), struktur geologi berupa adanya ketidakmenerusan lapisan batuan, pembentukan teras-teras sungai, kekar, sesar dan kelurusan.

d. Kondisi Air Tanah

Pengukuran air dilakukan untuk mendapatkan kedalaman air tanah khususnya di lokasi terowongan, sehingga dapat ditentukan jenis material yang jenuh air. Penentuan kedalaman air tanah dan jenis material jenuh air tersebut digunakan sebagai penunjang dalam permodelan terowongan kestabilan lereng dan kestabilan terowongan, sehingga diharapkan dapat diketahui pengaruh air tanah terhadap kestabilan lereng dan terowongan tersebut.

2.2.3. Pengujian Sifat Indeks dan Keteknikan Tanah atau Batuan di Laboratorium

Setelah penyelidikan geologi teknik di lapangan yang didalamnya termasuk kegiatan pengambilan sampel tanah atau batuan, kemudian dilakukan pengujian sampel di laboratorium. Hasil pengujian di laboratorium dapat digunakan untuk parameter proses perancangan sehingga didapat suatu model perancangan yang sesuai (ISRM, 2015). Pengujian laboratorium terkait penyelidikan geoteknik terdiri dari pengujian sampel untuk mendapatkan sifat indeks dan sifat keteknikan tanah dan batuan.

2.2.3.1. Sifat Indeks Tanah dan Batuan

a. Kadar Air

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui besarnya kadar air (w) yang terdapat dalam tanah atau batuan. Pengujian kadar air dapat dilakukan dengan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 1965 (2008) tentang cara uji penentuan kadar air untuk tanah dan batuan di laboratorium dan *American Society for Testing and Materials ASTM D 4859-07 (2000) Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Direct Heating Method*, 495 serta *ASTM D 2216-98 (1998) Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*.

b. Berat Isi

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat isi tanah kondisi asli atau tanah yang relatif tidak terganggu (*undisturbed*) dengan cara menusukkan cincin cetakan ke dalam tabung sampel. Berat isi tanah merupakan perbandingan antara

berat tanah dengan volume aslinya di lapangan. Pengujian berat isi mengacu pada SNI-03-3637 (1994) tentang metode pengujian berat isi tanah berbutir halus dengan cetakan benda uji.

c. Berat Jenis

Pengujian berat jenis bertujuan untuk mengukur berat jenis butiran tanah. Berat jenis merupakan angka perbandingan antara berat isi butir tanah dan berat isi air suling pada temperatur dan volume yang sama. Pengujian berat isi mengacu pada SNI-1964 (2008) tentang cara uji berat jenis tanah atau ASTM D 854-14 (2021) *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*.

d. Pengujian Sifat Indeks

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui sifat indeks tanah dan batuan. Sifat indeks tanah dan batuan yang penting dalam penelitian geoteknik adalah : kadar air, densitas *bulk*, densitas kering, densitas *solid*, *specific gravity*, rasio pori, porositas, dan saturasi. Semua parameter tersebut memiliki rumus sebagai berikut (Price, 2009) :

$$\text{Density } (\rho) \quad \rho = \frac{\text{Mass } (M)}{\text{Volume } (V)} \quad (2.1)$$

$$\text{Unit weight } (\gamma) \quad \gamma = \frac{\text{Weight } (W)}{\text{Volume } (V)} \quad (2.2)$$

$$\text{Spesific Garvity } (G) \quad G = \frac{W_s}{V_s \gamma_w} \quad (2.3)$$

$$\text{Void ratio } (e) \quad e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.4)$$

$$\text{Moisture content } (m) \quad m = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

$$\text{Degree of saturation } (s) \quad s = \frac{V_w}{V_v} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

$$\text{Bulk unit weight } (\gamma_b) \quad \gamma_b = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} \quad (2.7)$$

$$\text{Saturated unit weight } (\gamma_{\text{sat}}) \quad \gamma_{\text{sat}} = \frac{S_w}{V} \quad (2.8)$$

$$\text{Dry unit weight } (\gamma_d) \quad \gamma_d = \frac{D_w}{V} \quad (2.9)$$

Dimana :

V	= Volume	W _w	= Berat isi air
V _s	= Volume tanah	γ _w	= Berat jenis air
V _v	= Volume pori	S _w	= Berat jenis jenuh
V _w	= Volume air	D _w	= Berat jenis kering
W _s	= Berat isi tanah		

2.2.3.2. Sifat Keteknikan Tanah dan Batuan

Sifat keteknikan tanah dan batuan pada penelitian ini akan dilakukan dengan uji kuat geser langsung (*direct shear strength*) untuk tanah, sedangkan untuk batuan dilakukan dengan uji *point load* atau *Uniaxial Compressive Strength* (UCS). Uji kuat geser langsung (*direct shear strength*) di laboratorium menghasilkan parameter kuat geser tanah berupa nilai kohesi (c), dan sudut gesek dalam (φ). Sedangkan uji *point load* (*point load indeks*) digunakan untuk memprediksi nilai UCS suatu batuan secara tidak langsung di lapangan. Parameter-parameter yang diperoleh dari hasil uji tersebut digunakan untuk analisis kestabilan lereng dan perencanaan kestabilan terowongan yang akan diteliti.

a. Uji Kuat Geser (*Direct Shear Strength*)

Menurut Hardiyatmo (2006), kuat geser tanah merupakan suatu gaya perlawanan yang dilakukan oleh butiran tanah terhadap suatu tarikan / desakan. Salah satu cara untuk menentukan parameter kuat geser tanah yaitu sudut gesek dalam (φ) dan kohesi tanah (c) adalah dengan cara melakukan uji geser langsung (*Direct Shear Test*).

Pengujian kuat geser dilakukan dengan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) 3420-2016 untuk uji kuat geser langsung tanah tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase (UU) dan SNI-2813 (2008) untuk uji kuat geser langsung tanah terkonsolidasi dan terdrainase (CD).

b. Uji Point Load (*Point Load Test*)

Pengujian ini digunakan untuk memprediksi nilai UCS suatu batuan secara tidak langsung di lapangan. Pengujian ini sering digunakan karena memiliki prosedur pengujian yang sederhana, preparasi mudah, dapat dilakukan di lapangan dan peralatan cukup ringan untuk dibawa. Dimensi sampel pengujian yang dilakukan mengacu pada ASTM D 5731 (2002) *Standard Test Method for Determination of Point Load Strength Index of Rock* seperti terlihat pada Gambar 2.16 di bawah.

Menurut Broch and Franklin (1972), indeks point load (I_s) suatu sampel batuan dapat dihitung dengan persamaan 2.10 berikut :

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (2.10)$$

Faktor koreksi diperlukan terhadap persamaan di atas apabila sampel batuan tidak berdiameter 50 mm. Faktor koreksi tersebut diturunkan oleh Greminger (1982) sehingga persamaannya menjadi seperti persamaan 2.11 berikut:

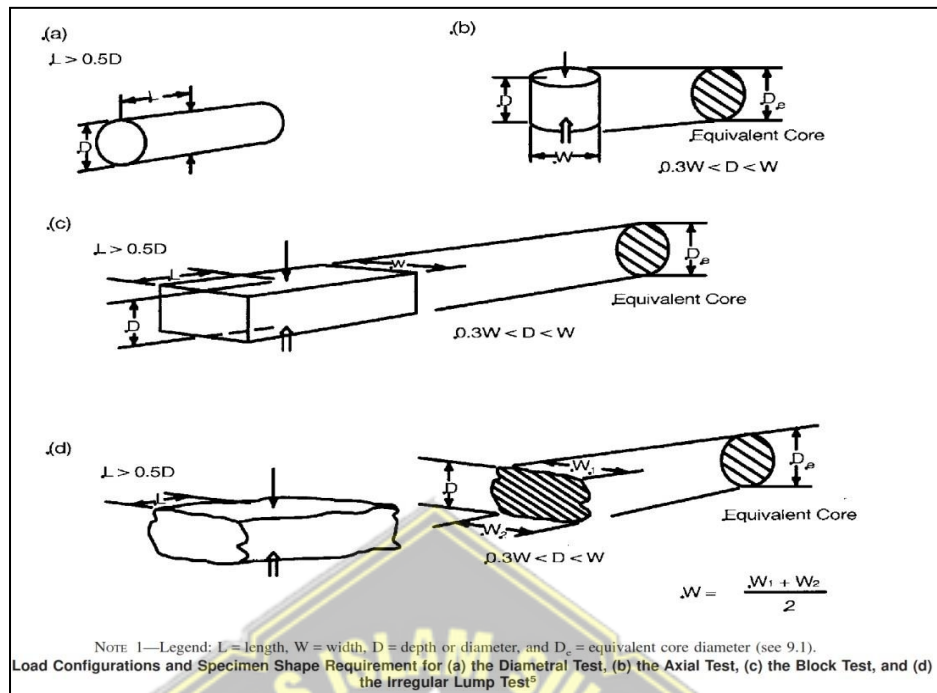
$$I_{s(50)} = \left(\frac{d}{50}\right)^{0.45} \frac{P}{D^2} \quad (2.11)$$

di mana : $I_{s(50)}$: *Pont load index* diameter 50 mm (MPa)
P : Beban maksimum contoh pecah (N)
d : Jarak antar konus penekan (mm)
D : Diameter contoh (mm)

Jika $I_s = 1$ MPa, indeks tersebut tidak memiliki arti sehingga penentuan kekuatan harus berdasarkan uji UCS. Jika diameter contoh batuan 50 mm maka UCS dapat ditentukan melalui persamaan 2.12 (Bieniawski, 1975) dalam Das et al. (2013) :

$$\sigma_c = 24I_{s(50)} \quad (2.12)$$

di mana : I_s : *Point load index*;
 σ_c : Kuat tekan (MPa)



Gambar 2.16. Dimensi Sampel untuk Uji *Index Point Load* (ASTM D 5731-02)

c. Uji *Uniaxial Compressive Strength* (UCS)

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui atau mengukur kekuatan *uniaxial*/kuat tekan, *modulus young*, dan *poisson ratio* dari sebuah contoh batuan. Bahan contoh uji harus dibentuk dengan persyaratan L/D bervariasi antara 2 – 2.5. Kemudian dilakukan penekanan terhadap benda uji sehingga benda uji mengalami pemendekan pada sisi aksial dan penggelembungan pada sisi *lateral*. Tekanan tersebut dilakukan sampai benda uji tersebut pecah. Kuat tekan aksial (σ_c) merupakan gambaran dari nilai tegangan maksimum yang dapat ditanggung sebuah contoh batuan tersebut hancur (*failure*) tanpa adanya pengaruh dari tegangan pemampatan (ISRM, 2015). Persamaan kuat tekan uniaksial yang terjadi adalah sebagai berikut :

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2.13)$$

dengan $A = 1/4\pi D^2$, sehingga rumus berubah menjadi :

$$\sigma_c = \frac{F}{1/4\pi D^2} \quad (2.14)$$

Selain nilai kuat tekan uniaksial, UCS juga dapat digunakan untuk memprediksi nilai *modulus young* atau modulus elastisitas dan *poisson ratio*. *Modulus young* yaitu kemampuan bahan untuk mempertahankan kondisi elastisitasnya. Nilai ini didapat dari hasil turunan kemiringan kurva tegangan – regangan pada bagian linear (deformasi plastis). *Poisson ratio* merupakan perbandingan mutlak dari perbandingan antara regangan *lateral* terhadap regangan *aksial*.

2.2.3.3. Klasifikasi Tanah

Pemilihan tanah ke dalam kelompok atau subkelompok yang menunjukkan sifat atau kelakuan yang sama akan sangat membantu dalam penyelesaian permasalahan teknis yang berkaitan dengan tanah dalam suatu proyek infrastruktur. Klasifikasi tanah umumnya berdasarkan atas ukuran partikel dari hasil uji analisis saringan dan plastisitas dari uji *atterberg*. Sistem klasifikasi tanah yang biasa digunakan ada dua yaitu *Unified Soil Classification System* (USCS) dan *American Association of State Highway and Transportation* (AASHTO).

Untuk penelitian ini klasifikasi tanah yang digunakan adalah sistem USCS karena sistem klasifikasi AASHTO lebih cocok untuk penentuan kualitas tanah untuk perencanaan timbunan jalan baik *subbase* maupun *subgrade* (Hardiyatmo, 2006). Secara garis besar dalam sistem klasifikasi USCS, tanah terbagi atas tanah berbutir kasar (kerikil dan pasir) jika kurang dari 50% lolos saringan nomor 200 dan tanah berbutir halus (lanau dan lempung) jika lebih dari 50% lolos saringan nomor 200. Untuk tanah berbutir kasar simbolnya dibagi ke dalam huruf awal G (G untuk *Gravel*) atau S (S untuk *Sandy* atau *Sandy Soil*). Untuk tanah berbutir halus dibagi ke dalam huruf awal M (M untuk *Inorganic Silt*), C (C untuk *Inorganic Clay*), O (O untuk *Organic Silts dan Clays*), dan Pt (Pt untuk gambut, *muck*, tanah dengan kadar organik tinggi). Selain itu ada simbol W untuk *well graded* (tanah bergradasi baik), P untuk *poorly graded* (tanah bergradasi buruk), L untuk *low plasticity, liquid limit < 50* (plastisitas rendah, $LL < 50$), dan H untuk *high plasticity, liquid limit > 50* (plastisitas tinggi, $LL > 50$). Sistem klasifikasi USCS secara lengkap disajikan dalam Tabel 2.5 berikut :

Tabel 2.5. Klasifikasi Tanah berdasarkan System USCS (Das, 1995)

Divisi Utama		Simbol Kelompok	Nama Umum		Kriteria Klasifikasi	
Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200	Pasir Lebih dari 50% fraksi kasar lolosayakan No.4	Kerikil bersih(hanya kerikil)	GW	Kerikil bergradasi baik, campuran kerikil – pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus	Klasifikasi berdasarkan persentasi butiran halus : <5% lolos ayakan No. 200 : GW, GP, SW, SP >12% lolos ayakan No. 200 : GM, GW, SM, SC 5 – 12% lolos ayakan No. 200 : klasifikasi perbatasan memerlukan simbol ganda	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} - \text{berkisar 1 sampai 3}$
			GP	Kerikil bergradasi buruk dancampuran kerikil – pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi syarat Cu maupun Cc untuk GW
		Kerikil dengan butiran halus	GM	Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau		PI < 4
			GC	Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung		PI > 7
	Kerikil 50%atau lebih dari fraksi kasar terttahan pada ayakan No. 4	Pasir bersih(hanya pasir)	SW	Pasir bergradasi baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ berkisar 1 sampai 3}$
			SP	Pasir bergradasi buruk dan campuran pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus		Tidak memenuhi syarat Cu maupun Cc untuk SW
		Pasir dengan butiran halus	SM	Pasir berlanau, campuran pasir-lanau		PI < 4
			SC	Pasir berlempung, campuran pasir-lempung		PI > 7
						Batas-batas <i>atterberg</i> yangdigambar pada daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda
						Batas-batas <i>atterberg</i> yangdigambar pada daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda

(Lanjutan)

Tanah Berbutir Halus 50% atau lebih lolos ayakan	Lanau dan Lempung dengan batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung
		CL	Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung kurus (<i>lean clays</i>)
		OL	Lanau organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah
	Lanau dan Lempung dengan batas cair lebih dari 50%	MH	Lanau anorganik atau pasir halus <i>diatome</i> , <i>ataulanau diatome</i> , lanau yang elastis
		CH	Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung gemuk (<i>fat clays</i>)
		OH	Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai tinggi
Tanah –tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	Pt	Peat (gambut, <i>muck</i> , dan tanah – tanah lain dengan kandungan organik tinggi	

Bagan Plastisitas
Untuk klasifikasi tanah berbutir-halus
dan fraksi halus dari tanah berbutir-kasar
Batas Atterberg yang digambarkan di
bawah yang diarsir merupakan klasi-
fikasi batas yang membutuhkan sim-
bol ganda

Persamaan garis A
 $PI = 0,73(LL - 20)$

Manual pengidentifikasian secara manual disajikan pada
ASTM Designation D – 2488

2.2.4. Klasifikasi Massa Batuan

Klasifikasi massa batuan sangat terkait dengan metode empiris dan bukan untuk menggantikan studi analitis, pengamatan, pengukuran atau penilaian rekayasa lapangan tetapi memiliki dasar yang sama untuk mengkategorikan ke dalam kelompok yang berbeda dan dapat saling melengkapi. Klasifikasi massa batuan bekerja berdasarkan identifikasi parameter yang mempengaruhi perilaku massa batuan tersebut kemudian membagi massa batuan tertentu ke dalam kelompok. Klasifikasi massa batuan dapat di konversikan sebagai parameter dalam analisis empirik.

Klasifikasi massa batuan memberikan pendekatan kuantitatif untuk tujuan desain sehingga penyelidikan lapangan menjadi lebih berkualitas. Selain itu penentuan desain sistem penyangga terowongan juga dapat ditentukan dengan penentuan jenis batuan dan pengklasifikasian massa batuan. Dalam penggunaannya, klasifikasi massa batuan pada terowongan dengan menggunakan satu metode tidaklah cukup karena semua terowongan terbentuk melalui berbagai macam kondisi tektonik seperti jumlah *joint*, dan lain-lain (Rahmatiet al., 2014).

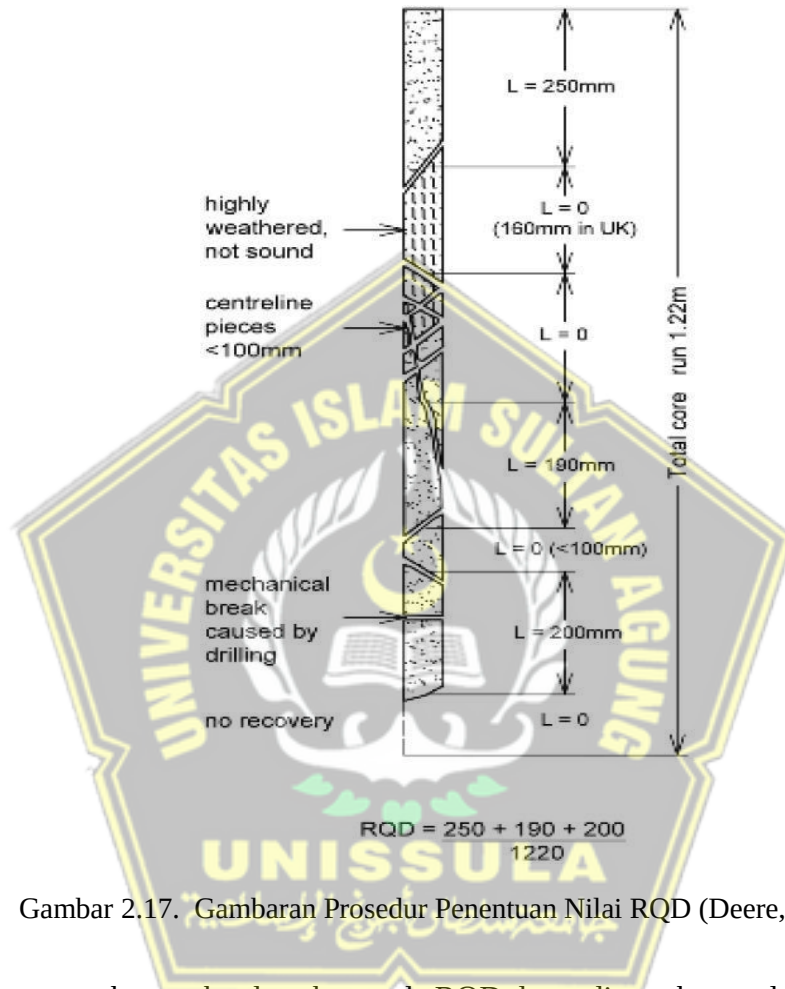
Terzaghi (1946) dalam Deere and Miller (1966) membagi faktor faktor geologi teknik yang berpengaruh terhadap konstruksi diantaranya *Intact rock*, *Stratified rock*, *Moderately jointed rock*, *Blocky and seamy rock*, *Crushed but chemically intact rock*, *Squeezing rock*, *Swelling rock*. Konsep *Rock Quality Designation (RQD)* pertama kali diperkenalkan oleh Deere pada 1964 memberikan perkiraan kuantitatif kualitas massa batuan dari bor log inti. Skema klasifikasi yang lebih luas dikembangkan terutama untuk kepentingan konstruksi terowongan, oleh Bieniawski (1973, 1989), Barton dkk. (1974) dan Hoek (1994) yang berarti bahwa ilmu mekanika batuan semakin berkembang (Toma and Jodl, 2006).

2.2.4.1. Rock Quality Designation (RQD)

Pengembangan indeks dari *Rock Quality Designation (RQD)* untuk menyediakan suatu metode sistematis untuk menggambarkan kualitas massa batuan berdasarkan dari hasil pengeboran (*drill core logs*) (Deere, 1989). RQD merupakan perbandingan antara panjang *core pieces* yang lebih dari 4 inchi (10

centimeter) terhadap total panjang dari *core* seperti terdapat dalam Gambar 2.17 dan persamaan 2.15 sebagai berikut :

$$RQD = \frac{\sum \text{Length of core pieces} > 10 \text{ cm length}}{\text{Total length of core run}} \times 100\% \quad (2.15)$$



Gambar 2.17. Gambaran Prosedur Penentuan Nilai RQD (Deere, 1989)

Kualitas massa batuan berdasarkan pada RQD dapat ditentukan melalui Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Kualitas Massa Batuan berdasarkan RQD (Deere, 1989)

Rock Mass Quality	RQD (%)
<i>Very poor</i>	0 – 25
<i>Poor</i>	25 – 50
<i>Fair</i>	50 – 75
<i>Good</i>	75 – 90
<i>excellent</i>	90 – 100

Konsep diatas berkembang sesuai dengan penerapannya di lapangan sehingga beberapa ahli kemudian mengemukakan pendapatnya seperti Priest and Hudson (1976), nilai RQD dapat diestimasi dari banyaknya rekahan yang ada pada singkapan di lapangan atau pada core. Rumusan RQD pada persamaan 2.16 sebagai berikut :

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \quad (2.16)$$

Dimana λ merupakan 1 dibagi dengan rata-rata spasi dari diskontinuitas, dengan persamaan 2.17 sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{1}{\text{average spacing of discontinuity (m)}} \quad (2.17)$$

2.2.4.2. Rock Mass Rating (RMR)

Klasifikasi massa batuan dari metode RMR menggunakan enam parameter (Bieniawski, 1989). Parameter tersebut di dapat dengan melakukan pengukuran di lapangan maupun interpretasi dari data lubang pemboran. Penilaian harus dibagi menjadi region yang memiliki karakter sama terutama dilihat dari karakteristik strukturnya baik kualitas maupun kuantitas. Enam parameter dalam menentukan penilaian RMR antara lain :

a. Uniaxial Compressive Strength (UCS) material batuan utuh

Batuan utuh (*intact rock material*) sangat penting dalam penilaian RMR. Kuat tekan uniaksial (UCS) dari material batuan utuh ditentukan melalui pengujian secara tidak langsung (*indirect test*) di lapangan menggunakan *Schmidt hammer* atau uji yang dilakukan di laboratorium. Uji di laboratorium untuk batuan utuh sebelumnya. Pada uji langsung persamaan yang dapat digunakan dalam penentuan kuat tekan uniaksial adalah (Singh and Goel, 2011) sebagai berikut :

$$UCS = 2HR \quad (2.18)$$

Dimana, HR merupakan nilai *hardness reborn* dari *Schmidt hammer*.

b. Rock Quality Designation (RQD)

Nilai RQD sangat menentukan nilai RMR, nilai RQD dapat dihitung tidak hanya ketika ada core, namun juga dapat dihitung di lapangan. Pembahasan lengkap mengenai RQD ada di Sub Bab 2.2.4.1.

c. Spasi bidang diskontinuitas

Spasi bidang diskontinuitas merupakan jarak antara bidang diskontinuitas dengan arah relatif tegak lurus terhadap bidang lemah tersebut. Beberapa jenis bidang diskontinuitas antara lain kekar, zona *shear*, patahan minor atau permukaan bidang lemah lainnya.

d. Kondisi bidang diskontinuitas

Salah satu parameter yang paling menentukan dalam menentukan nilai RMR adalah kondisi diskontinuitas. Kondisi diskontinuitas meliputi kekasaran permukaan diskontinuitas, *persistence*, kemenerusan, pelapukan batuan dan bidang lemah tersebut serta material pengisi (Tabel 2.7).

e. Kondisi air tanah

Air tanah merupakan parameter yang penting. Dalam penentuan RMR kondisi air tanah pada lokasi penelitian harus diperhatikan. Secara umum kondisi air tanah yang dijumpai pada batuan antara lain kering, lembab, basah, menetes, dan mengalir. Kemudian keadaan tersebut diberi peringkat.

f. Orientasi diskontinuitas

Orientasi diskontinuitas merupakan arah jurus dan kemiringan dari diskontinuitas batuan yang akan lebih mudah diamati di singkapan batuan langsung dibandingkan dari hasil pemboran inti, juga untuk meminimalkan faktor kesalahan. Orientasi bidang diskontinuitas sangat penting, hal ini karena orientasi diskontinuitas dalam kaitannya dengan aspek keselamatan akan sangat tergantung dengan metode penggalian yang dilakukan (Singh dan Goel, 2011). Orientasi diskontinuitas yang melibatkan *strike* dan *dip* ini dapat diaplikasikan dalam *tunnel drivage*, *slope face orientation*, atau *foundation alignment* (Singh and Goel, 2011).

Masing-masing parameter tersebut diberikan bobot yang berbeda sesuai dengan hasil pengamatan massa batuan di lapangan. Nilai dari RMR dapat diketahui dengan menjumlahkan masing-masing nilai dari setiap parameter tersebut (Tabel 2.7).

Tabel 2.7. Penilaian masing-masing Parameter RMR (Bieniawski, 1989)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS								
Parameter			Range of values					
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred	
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%	
	Rating		20	17	13	8	3	
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm	
	Rating		20	15	10	8	5	
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous	
	Rating		30	25	20	10	0	
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing	
	Rating		15	10	7	4	0	
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)								
Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes	0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS								
Rating		100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Class number		I	II	III	IV	V		
Description		Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES								
Class number		I	II	III	IV	V		
Average stand-up time		20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)		> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)		> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions								
Discontinuity length (persistence)		< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating		6	4	2	1	0		
Separation (aperture)		None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating		6	5	4	1	0		
Roughness		Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating		6	5	3	1	0		
Infilling (gouge)		None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm		
Rating		6	4	2	2	0		
Weathering		Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Ratings		6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**								
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 - 90°		Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable		Favourable		Very favourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45-90°		Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°				
Fair		Unfavourable		Fair				

* Some conditions are mutually exclusive . For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.

** Modified after Wickham et al (1972).

Berdasarkan nilai RMR yang diperoleh pada perhitungan parameter-parameter diatas, maka dibuat klasifikasi massa batuan menjadi 5 (lima) kelas seperti yang ditunjukkan Tabel 2.8. sebagai berikut :

Tabel 2.8. Kualitas Massa Batuan (Bieniawski, 1989)

Nilai RMR	81 – 100	61 – 80	41 – 60	21 – 40	< 20
Kualitas massa batuan	Sangat baik (<i>very good</i>)	Baik (<i>good</i>)	Sedang (<i>fair</i>)	Buruk (<i>poor</i>)	Sangat buruk (<i>very poor</i>)

Bieniawski (1989) menyediakan panduan dalam menentukan metode pendukung penggalian dan sistem penyangga terowongan berdasarkan nilai *Rock Mass Rating* (RMR) yang dapat dilihat pada Tabel 2.9. Panduan ini dapat diterapkan dengan metode penggalian *ripping*, *digging*, *hammer*, maupun *blasting*.

Tabel 2.9. Panduan Penggalian dan Sistem Penyangga Terowongan dengan Sistem RMR (Bieniawski, 1989)

Rock mass class	Excavation	Rock bolts (20 mm diameter, fully grouted)	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 in crown.	50–100 mm in crown and 30 mm in sides.	None.
IV Poor rock RMR: 21–40	Top heading and bench, 1.0–1.5 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 drifts 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.
Horseshoe-shaped tunnels, maximum width 10 m, maximum vertical stress 250 kP/cm ² .				

2.2.4.3. Geological Strength Index (GSI)

Geological strength Index (GSI) pertama kali diperkenalkan oleh Hoek pada 1994. Metode ini cocok digunakan untuk menentukan kualitas batuan berkondisi buruk dengan pelapukan yang tinggi. Menurut Marinos et al. (2005), GSI tidak boleh diterapkan untuk batuan tanpa diskontinuitas, serta batuan yang didominasi struktur orientasi (*highly anisotropic*). Menurut Marinos et al. (2007), GSI batuan di bawah permukaan dapat ditentukan melalui investigasi pada lubang pemboran. Banyaknya jumlah lubang pemboran dengan pengeboran miring akan membantu interpretasi kondisi massa batuan. GSI sulit diterapkan untuk metode penggalian menggunakan blasting karena tidak mudah membedakan permukaan batuan yang tidak terpengaruh oleh ledakan dan permukaan yang mengalami kerusakan akibat sisa ledakan. Menurut Marinos and Hoek (2000), penilaian GSI dapat dilakukan dengan mengamati kondisi singkapan batuan terhadap 2 parameter utama, yaitu kondisi struktur (*structure*) dan kondisi permukaannya (*surface condition*) yang dijelaskan pada Gambar 2.18.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)		SURFACE CONDITIONS				
From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70	60		
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70	60	50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60	50	40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50	40	30		
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	40	30	20		
		30	20	10		
		N/A	N/A			

Gambar 2.18. Chart Estimasi Nilai GSI untuk Batuan Terkekarkan (Hoek et al., 2007)

Sebelum dilakukan pengujian di laboratorium, sebaiknya dilakukan pengukuran GSI batuan permukaan secara langsung di lapangan dengan mempertimbangkan standar pengukuran kekuatan batuan di lapangan untuk mengestimasi kekuatan massa batuan. Klasifikasi kekuatan massa batuan di lapangan dapat dilihat pada Tabel 2.4, Estimasi nilai *Uniaxial Compressive Strength (UCS)* di lapangan untuk batuan utuh (Hoek and Brown, 1998). Dan penilaian tingkat pelapukan pada massa batuan di lapangan berdasarkan *International Society for Rock Mechanics (ISRM)*, sesuai Tabel 2.3.

Menurut Das et al. (2013), dalam menentukan GSI batuan bawah permukaan, penentuan kondisi kekar mengacu pada klasifikasi penilaian *joint condition* berdasarkan Bieniawski (1989), Tabel 2.10 untuk kondisi kekar tanpa *infilling* sedangkan Tabel 2.11 untuk kondisi kekar dengan *infilling*. Kemudian perhitungan GSI untuk batuan bawah permukaan dapat menggunakan persamaan 2.19 (Hoek et al., 2013) sebagai berikut :

$$GSI = 1,5JCond_{89} + RQD/2 \quad (2.19)$$

Dimana : GSI = *Geological Strength Index*;
JCond = *Joint Condition*;
RQD = *Rock Quality Designation*

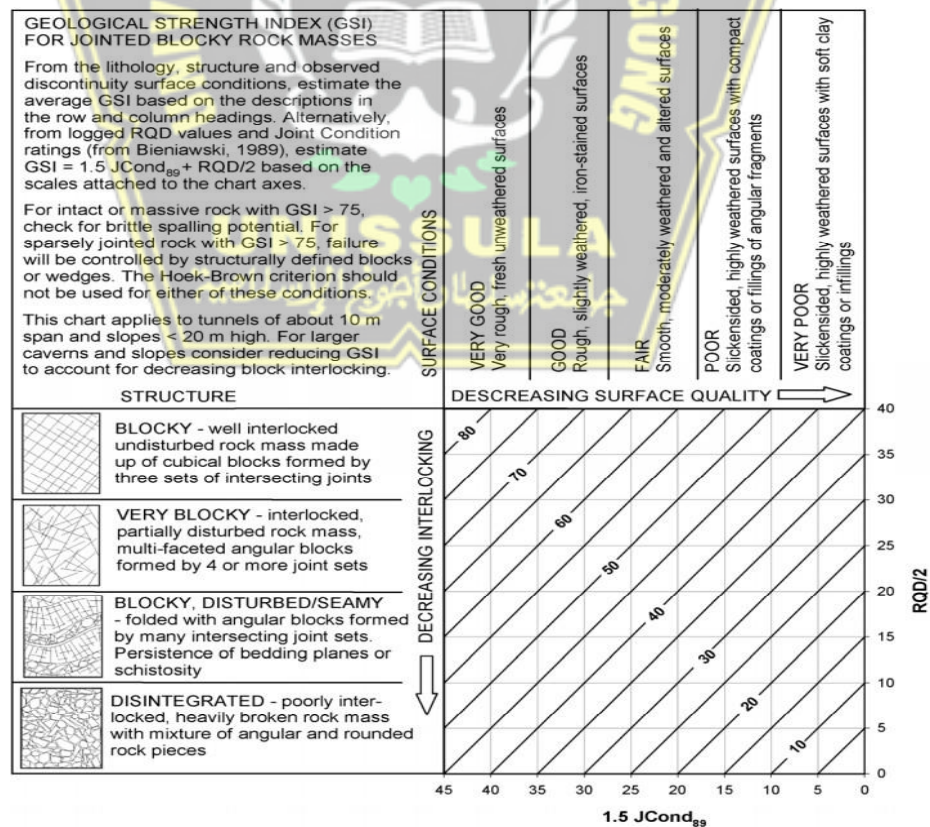
Diagram GSI yang dipadukan dengan pendekatan kuantitatif tergantung dari nilai bidang diskontinuitas/ *Joint condition* dan nilai *RQD/2* dapat dilihat pada Gambar 2.19.

Tabel 2.10. Penentuan Kondisi Kekar (*joint condition*) Tanpa *Infilling*
 (Das et al., 2013)

Kondisi diskontinuitas	Permukaan sangat kasar,Tidak menerus, Tidak ada retakan, Batuan keras tidak terlapukkan	Permukaan cukup kasar Retakan < 1 mm, Pelapukan ringan	Permukaan cukup kasar Retakan < 1 mm, Pelapukan tinggi	Permukaan licin atau Pengisi < 5mm atau retakan 1-5 mm menerus	Pengisi lunak > 5 mm atau retakan > 5 mm menerus
Skala	30	25	20	10	0

Tabel 2.11. Penentuan Kondisi Kekar (*joint condition*) jika Terdapat *Infilling* (Das et al., 2013)

Kondisi diskontinuitas	Permukaan sangat kasar, Tidak menerus, Tidak ada retakan, Batuan keras tidak terlapukkan	Permukaan cukup kasar Retakan < 1 mm, Pelapukan ringan	Permukaan cukup kasar Retakan < 1 mm, Pelapukan tinggi	Permukaan licin atau Pengisi < 5mm atau retakan 1-5 mm menerus	Pengisi lunak > 5 mm atau retakan > 5 mm menerus
Panjang diskontinuitas Skala	< 1 m 6	1 – 3 m 4	3 – 10 m 2	10 – 20 m 1	> 20 m 0
Retakan Skala	Tidak 6	< 0,1 mm 5	0,1 – 1 mm 4	1 – 5 m 1	> 5 mm 0
Kekasaran Skala	Sangat kasar 6	Kasar 5	Agak kasar 3	Halus 1	Licin 0
Pengisi retakan Skala	Tidak 6	Keras < 5 mm 4	Keras > 5 mm 2	Lunak < 5 mm 2	Lunak > 5mm 0
Pelapukan Skala	Tidak terlapukkan 6	Pelapukan ringan 5	Pelapukan sedang 3	Pelapukan tinggi 1	Pelapukan sempurna 0



Gambar 2.19. Kondisi GSI dipadukan dengan Analisis Kuantitatif (Hoek dkk., 2013)

Adapun menurut Das et al. (2013), massa batuan dapat diklasifikasikan menjadi 5 (lima) kelas utama sesuai Tabel 2.12. Sistem klasifikasi GSI memiliki kemampuan baik untuk diterapkan pada massa batuan berondisi buruk akibat deformasi, dan juga pada litologi khusus tertentu.

Tabel 2.12. Kualitas GSI Massa Batuan (Das et al., 2013)

Nilai GSI	95 - 76	75 - 56	55 - 36	35 - 21	< 20
Kualitas massa batuan	Sangat baik (<i>very good</i>)	Baik (<i>good</i>)	Sedang (<i>fair</i>)	Jelek (<i>poor</i>)	Sangat jelek (<i>very poor</i>)

2.2.4.4. Hubungan RMR terhadap GSI

Klasifikasi massa batuan dengan sistem GSI merupakan pengembangan dari klasifikasi massa batuan sistem RMR. (Hoek and Karzulovic, 2000) menjelaskan bahwa massa batuan dengan $GSI > 25$, nilai GSI dapat dihitung dengan persamaan 2.20 oleh Hoek and Brown (1997) berikut :

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (2.20)$$

Nilai RMR_{89} adalah nilai RMR dasar (Bieniawski, 1989) dengan memberikan nilai air tanah dengan bobot nilai 15 (kondisi kering) dan nilai *joint orientation* dengan bobot 0 (nol). Persamaan di atas seharusnya tidak digunakan untuk massa batuan dengan kondisi sangat jelek (*very poor quality*) atau massa batuan yang memiliki nilai $GSI < 25$. Pada massa batuan dengan kondisi sangat jelek, nilai GSI lebih tepat dihitung dengan nilai Q.

2.2.5. Kestabilan Lereng Portal Terowongan

Salah satu faktor yang mempengaruhi stabilitas lereng pada batuan insitu adalah kondisi tektonik regionalnya. Pada beberapa pekerjaan konstruksi yang membutuhkan galian, tegangan-tegangan yang terjadi pada batuan jauh lebih kecil daripada kekuatan massa batuannya, sehingga kemungkinan kecil kegagalan akan terjadi pada batuan utuh. Oleh karena itu pada desain kemiringan lereng umumnya berkaitan dengan stabilitas blok batuan yang dibentuk oleh diskontinuitas (Wyllie and Mah, 2004).

Dalam analisis kestabilan lereng, parameter yang diperlukan untuk input data pada pemodelan numerik berupa ;

- a) Data penampang pada area inlet dan outlet terowongan pengelak (geometri lereng);
- b) Data laboratorium berupa nilai kohesi, density, sudut geser dalam, modulus young, UCS, dan poisson ratio;
- c) Data klasifikasi massa batuan berupa RMR dan GSI;
- d) Data kedalaman muka air tanah; dan
- e) Data jenis safety proteksi yang akan digunakan.

Dua metode yang digunakan dalam perencanaan kemiringan lereng batuan adalah *LimitEquilibrium Method (LEM)* dan *Finite Element Method (FEM)*. Pada *Finite Element Method (FEM)*, analisis numeris menghadirkan alternatif pendekatan yang akurat, serbaguna, dan membutuhkan sedikit asumsi, terutama yang berhubungan dengan mekanisme kegagalan. Kegagalan lereng pada *finite element method* terjadi secara alami melalui zona dimana kekuatan geser tanah tidak mampu menahan tegangan geser yang terjadi (Griffiths and Lane, 1999).

Pada pendekatan empiris, tipe kegagalan lereng harus ditentukan terlebih dahulu sebelum melakukan analisis kestabilan lereng. Adapun kegagalan lereng dibagi menjadi beberapa tipe, yaitu (Wyllie and Mah, 2004) :

1. Plane Failure

Tipe keruntuhan planar biasanya jarang terjadi pada lereng batuan karena pada tipe keruntuhan ini sepenuhnya disebabkan oleh kondisi geometris yang mampu menyebabkan kegagalan pada lereng. Namun tipe kegagalan ini perlu diperhatikan terkait dengan perubahan kekuatan geser dan kondisi air tanah yang mungkin terjadi.

2. Circular Failure

Pada batuan dengan tingkat pelapukan yang tinggi, pola struktur diskontinuitas tidak lagi mengontrol bidang gelincir. Permukaan bidang gelincir dapat dengan bebas terjadi dimana terdapat tahanan yang paling kecil pada lereng. Tipe kegagalan ini dapat ditentukan dengan menggunakan *Circular Failure Chart (CFC)*.

3. Wedge Failure

Tipe keruntuhan ini terjadi pada lereng dengan pertemuan dua diskontinuitas yang menghadap muka lereng sehingga gaya geser terjadi di sepanjang garis perpotongan kedua bidang tersebut. Umumnya terjadi pada skala geologi dan geometris yang lebih besar dibandingkan keruntuhan planar.

4. Toppling Failure

Tipe keruntuhan ini melibatkan rotasi kolom-kolom blok batuan pada permukaan yang menjepit. Ketika blok batuan yang menjepit di permukaan lereng meghilang, kolom blok batuan tertinggi patah karena pusat gravitasi pada blok tersebut menjatuhkannya ke arah luar.

2.2.6. Metode Penggalian dan Sistem Penyangga Terowongan dengan NATM

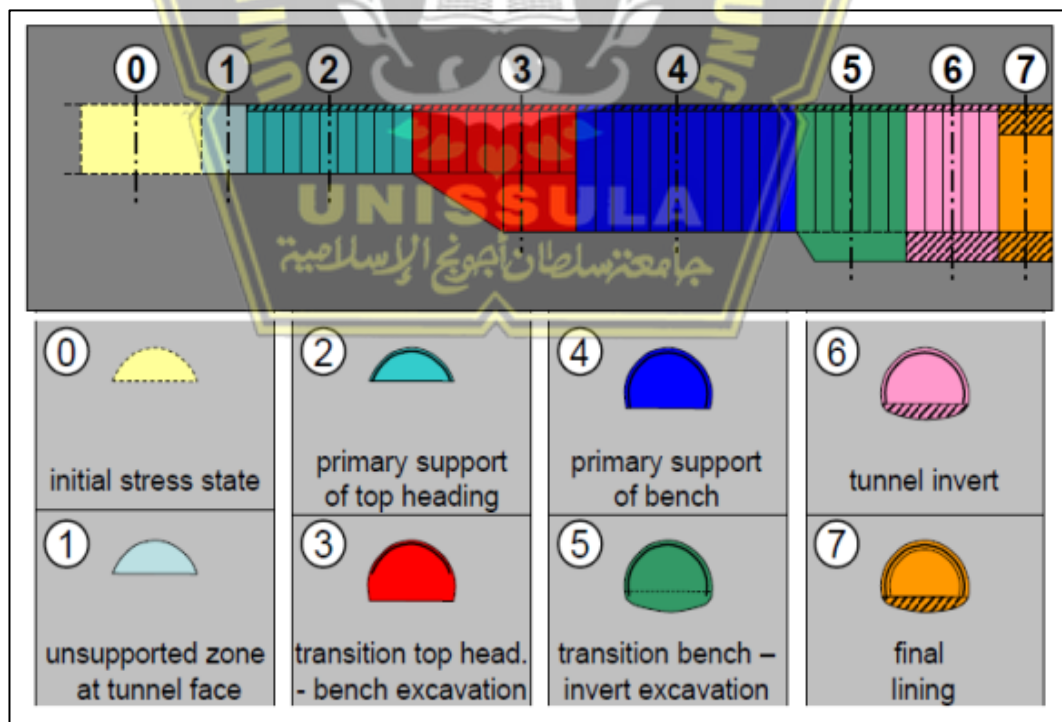
Menurut Apriyono and Sumiyanto (2010), sistem penyangga merupakan salah satu hal yang harus diperhatikan dalam pelaksanaan konstruksi suatu terowongan. Sistem penyangga ini merupakan kekuatan utama terowongan untuk menahan beban yang bekerja pada suatu terowongan. Kegagalan dari sistem penyangga terowongan dapat menyebabkan terjadinya keruntuhan pada terowongan. Sehingga analisis terhadap sistem penyangga penting dilakukan untuk mendapatkan suatu sistem penyangga terowongan yang tepat untuk menghindari keruntuhan serta efisien dari segi ekonomi.

Secara umum, batuan pondasi Bendungan Jragung termasuk dalam klasifikasi batuan lunak (*soft rock*), sehingga pada pelaksanaan konstruksi terowongan saluran pengelak menggunakan metode *New Austrian Tunneling Method* (NATM). Metode NATM mengintegrasikan prinsip-prinsip perilaku massa batuan di bawah beban dan memantau kinerja konstruksi bawah tanah selama konstruksi, serta digunakan untuk penggalian tanah lunak dan pembuatan terowongan di sedimen berpori. Teknologi ini juga memungkinkan penyesuaian langsung serta penggalian di bawah tanah dalam detail konstruksi.

NATM dikembangkan di Austria diantara tahun 1957 sampai tahun 1965 dan diberi nama NATM di Salzburg tahun 1962 untuk membedakan dari pendekatan penerowongan Austria yang lama dan tradisional. Kontributor utama

dari pengembangan NATM adalah Ladislaus von Rabcewicz, Leopold Muller dan Franz Pacher. Pada prinsipnya NATM adalah suatu pendekatan scientific empiris, yang melibatkan pengalaman praktek yang disebut empirical dimensioning (Rabcewicz, 1964). Ini merupakan dasar teoritis yang melibatkan hubungan antara tegangan dan deformasi di sekeliling terowongan (lebih dikenal dengan konsep kurva *ground-reaction*). Pada awalnya hal ini merupakan dasar teoritis yang diberikan oleh dua orang Austria, yaitu Fenner dan Kastner.

New Austrian Tunneling Method (NATM) menonjolkan sistem klasifikasi batuan secara kualitatif yang diperhitungkan di dalam konteks secara keseluruhan. NATM adalah pendekatan atau filosofi yang memadukan prinsip perilaku massa batuan yang mengalami beban dan pemantauan (monitoring) proses penggalian di bawah tanah pada pelaksanaan konstruksi. NATM mengkombinasikan dari berbagai cara yang ada untuk penggalian dan penerowongan, tetapi perbedaannya adalah pemantauan yang terus menerus dari gerakan batuan dan revisi penyangga untuk memperoleh lining yang paling stabil dan ekonomis. Ilustrasi penggalian terowongan dengan metode NATM dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20. Ilustrasi Metode Penggalian Terowongan Sistem NATM (Schweiger, H.F., 1974)

Menurut Hardjomuljadi (2010), *New Austrian Tunneling Method* adalah suatu pendekatan berupa idea yang didasari oleh sifat-sifat massa batuan dan pemantauan dari kelakuan galian bawah tanah selama pelaksanaan. *Method* disini merupakan suatu konsep dasar pendekatan empiris dengan dasar teori hubungan antara tegangan (*stress*) dan deformasi (*deformation*) di sekeliling terowongan yang digali.

Penyangga beban yang utama dari suatu terowongan adalah massabatuan disekeliling terowongan itu sendiri. Penyangga awal terutama sekali dimaksudkan agar batuan tersebut dapat menyangga dirinya sendiri. Penyangga awal yang diberikan harus mempunyai karakteristik hubungan beban dan deformasi yang sesuai dan dipasang pada waktu yang tepat (Hardjomuljadi, 2010).

Dalam NATM, penyangga yang dipakai adalah penyangga yang *flexible*, bukan penyangga yang kaku (*rigid*). Jadi penggunaan kombinasi *rockbolt*, *wire mesh* dan *shotcrete* lebih sesuai daripada penggunaan beton yang tebal. Penyangga awal sebenarnya adalah penyangga total dan penyangga kedua (*secondary support*) nantinya akan lebih tergantung kepada hasil pemantauan.

Sesudah penggalian terowongan perlu dipasang penyangga awal, untuk mencegah terjadinya *rock loosening*, karena jika batuan mengalami *loosening* maka keruntuhan akan sulit untuk dicegah lagi. Oleh sebab itu perlu dipasang penyangga awal yang disesuaikan dengan *stand up time* dari masing- masing jenis batuan.

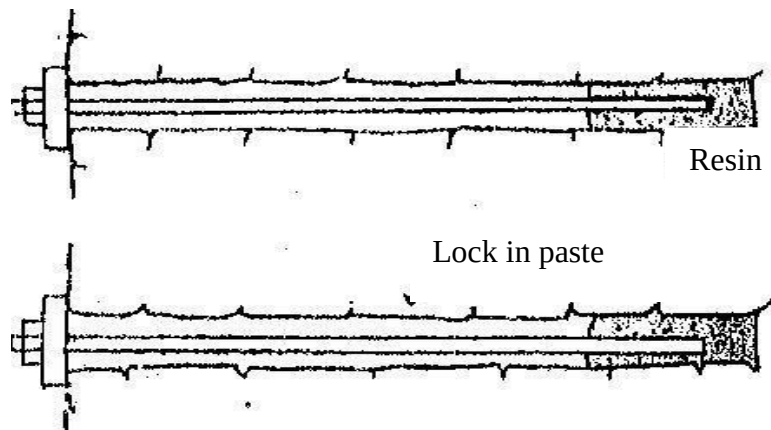
Berikut ini adalah material penyangga awal (*primary support*) dan penyangga kedua (*secondary support*) (Hardjomuljadi, 2010) :

1. Baut Batuan (*Rockbolt*)

Rockbolt adalah penyangga awal yang sangat penting karena disamping fungsi utamanya untuk mencegah terjadinya *loosening* dari batuan disekeliling terowongan, juga sebagai perkuatan dinding terowongan. Berdasarkan cara kerjanya, *rockbolt* dibedakan menjadi :

a. *Tension Bolt* (Baut Tarik Batuan)

Rockbolt ini merupakan baut batuan aktif, karena setelah pemasangan diberi pra-tegangan.



Gambar 2.21. Tipe *Tension Bolt* (Baut Tarik Batuan)
(Hardjomuljadi, 2010)

b. Full Column Adhesive bolt (Baut Geser)

Rockbolt ini merupakan baut batuan pasif, karena baut batuan ini akan berfungsi (geser), setelah terjadinya deformasi batuan (dalam hal terowongan, deformasi radial).



Gambar 2.22. Tipe *Full Column Adhesive bolt* (Baut Geser)
(Hardjomuljadi, 2010)

Bahan pengikat dan pengisi *rockbolt* dibedakan menjadi :

- *Resin*

Resin merupakan bahan kimia yang ditempatkan dalam kemasan (*tube*) berbentuk kapsul. Material ini dipakai pada kondisi batuan yang selalu basah atau lembab (*moist*).

- *In-organic Motar*

Lock in paste yaitu bahan an-organik yang mempunyai sifat merekat dan memperkeras, dicampur dengan semen dan ditempatkan dalam kemasan kantung. Material ini digunakan pada kondisi batuan yang kering dan banyak retakannya.

2. Beton Semprot (*Shotcrete*)

Beton semprot (*shotcrete*) adalah campuran beton yang pemasangannya dilakukan dengan menyemprotkan campuran tersebut ke dinding batuan yang akan disangga atau dilindungi. Dalam *tunneling*, *shotcrete* diterapkan untuk menutup permukaan yang terbuka akibat pengeboran dan untuk mendukung rongga. *Shotcrete* berfungsi sebagai kombinasi dengan unsur penyangga awal, seperti *wire mesh* dan *steel support* adalah sebagai penyangga fleksibel untuk mencegah keruntuhan batuan setelah penggalian atau peledakan.

Karakteristik *shotcrete* hampir sama dengan beton biasa, namun modulus young agak lebih rendah daripada beton konvensional. Sampai usia 28 hari kekakuan dan kekuatan *shotcrete* berkembang seperti pada beton cor. Dengan kelembaban yang cukup kekuatannya meningkat karena pasca hidrasi. Berdasarkan cara pemasangannya, *shotcrete* dibedakan menjadi dua macam :

a. *Wet Shotcrete*

Wet shotcrete digunakan sebagai perkuatan tebing terbuka (*open work*) pada portal terowongan. *Wet shotcrete* merupakan agregat semen dan air yang dicampurkan menjadi satu dalam suatu tabung dan kemudian disemprotkan. Keuntungan penggunaan *wet shotcrete* yakni pada pelaksanaannya dicampur di tempat (*insitu mixing*), mengingat jarak dari *batching plant* ke lokasi sangat jauh dan membutuhkan waktu cukup lama untuk pengangkutan ke lokasi, sehingga resiko pengerasan *shotcrete* dalam *transit mixer* sangat besar. Selain itu kemungkinan material yang terbuang akan lebih sedikit.

b. *Dry Shotcrete*

Material dicampur dalam keadaan kering, kemudian dialirkan melalui pipa alat pencampur air. Perbandingan antara bahan dan air diatur sedemikian rupa dengan perbandingan tertentu. Cara ini dipakai pada pekerjaan *shotcrete* di dalam terowongan yang dinginnya relatif lembab (*moist*). Alasan utama penggunaan *shotcrete* jenis ini pada terowongan adalah :

- Dinding terowongan mengeluarkan air atau lembab, sehingga diharapkan tidak terjadi kelebihan kadar air pada campuran.
- Dari segi pelaksanaan, karena ruang gerak didalam terowongan yang terbatas sedang daerah portal terowongan relatif sempit, maka *in-situ mixing* tidak

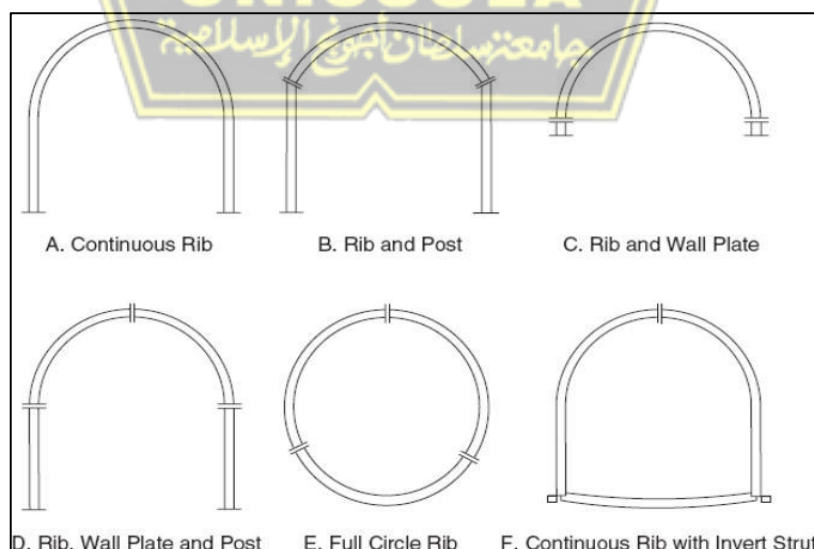
mungkin dilakukan. Dalam hal ini *dry shotcrete* yang dicampur di *batching plant* adalah praktis dan ekonomis, karena material sudah tercampur kering dalam *transit mixer* tidak akan rusak/membatu dan tidak akan terpengaruh lamanya waktu penggunaan.

3. Wiremesh

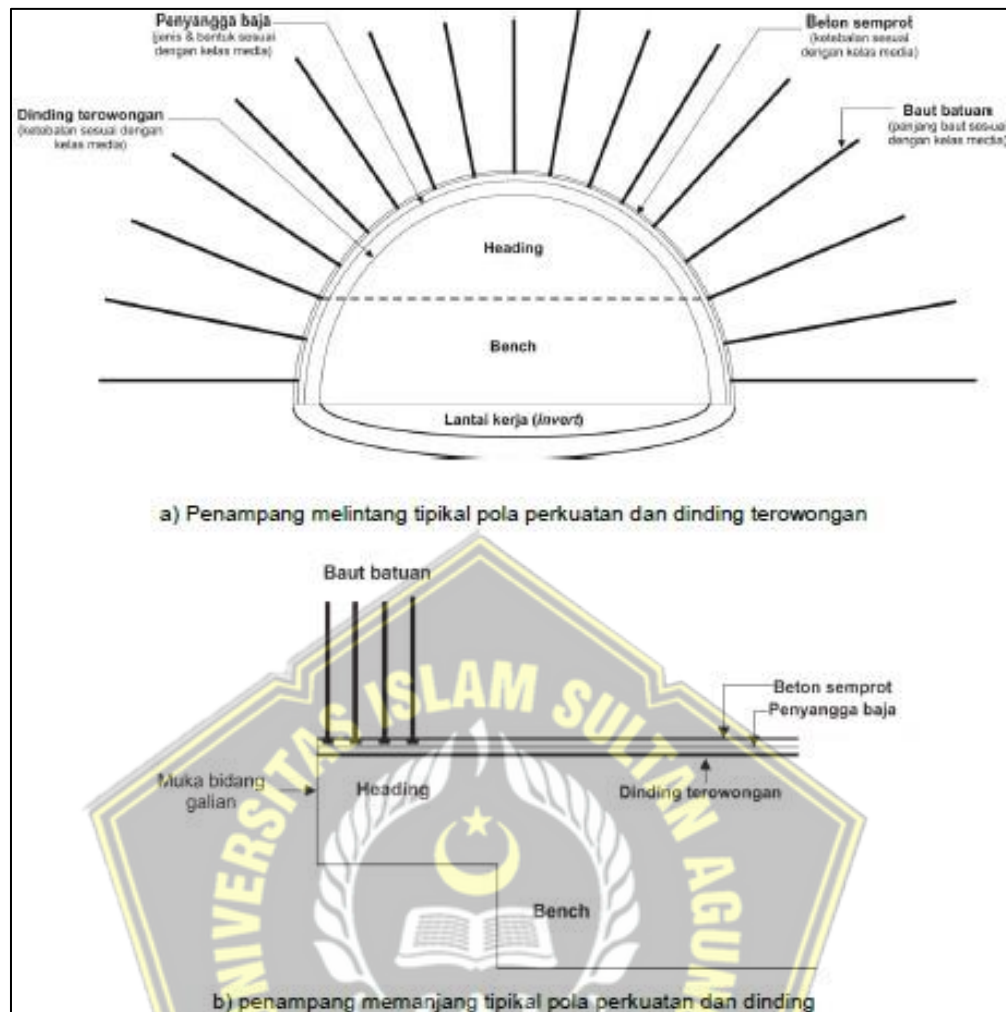
Wiremesh yang sering digunakan adalah *chailink mesh* dan *weld mesh*. *Chailink mesh* digunakan pada permukaan karena kuat dan fleksibel, sedangkan *weld mesh* terdiri atas kawat baja yang diatur dengan pola segiempat dan disambung dengan cara dipatri pada titik-titik perpotongannya serta memperkuat *shotcrete* dan lebih kaku. Wiremesh yang digunakan pada terowongan pengelak Bendungan Jragung adalah jenis *weld mesh*. Hal ini disebabkan untuk memperkuat *shotcrete* agar lebih kaku, selain itu untuk mengikat material batuan yang kecil dan menahannya agar tidak jatuh.

4. Penyangga Baja (Steel Support)

Steel support berupa baja profil dengan dimensi tertentu. *Steel support* ini dipergunakan pada tempat-tempat dimana kondisi batuan rapuh (kondisi mudah runtuh). Pemasangan *steel support* ini berpengaruh pada kestabilan terowongan dengan dipasangkan pengaku lateral (rod) antara *steel support* yang satu dan lainnya.



Gambar 2.23. Tipe *Steel Rib* (Singh dan Rajnish, 2006)



Gambar 2.24. (a) Penampang Melintang dan (b) Penampang Memanjang Tipikal Pola Perkuatan dan Dinding Terowongan (PUPR, 2015)

5. Dinding Beton (*Concrete Lining*)

Berdasarkan struktural, *lining* berfungsi untuk menanggung tegangan batuan dan mencegah erosi. Dalam pembuatan *concrete lining* untuk terowongan, syarat utama yang harus dipenuhi adalah *concrete lining* tidak rusak akibat pembebanan. Beban-beban yang mempengaruhi dan merupakan parameter desain *concrete lining* adalah tegangan dari luar, dalam keadaan kosong. Dalam hal ini tegangan air tanah merupakan tegangan tekan sehingga tidak terlalu menentukan. Tegangan akibat beban batuan hampir seluruhnya telah disangga oleh penyangga awal (*primary support*) segera setelah penggalian terowongan dilaksanakan.

6. *Grouting*

Grouting adalah salah satu aspek penting dalam pelaksanaan konstruksi bangunan air pada umumnya, terlebih pada pekerjaan pembangunan terowongan. *Grouting* atau pekerjaan injeksi pada batuan bertujuan meningkatkan sifat-sifat fisik (*physical properties*) pada *consolidation grouting* dan mengurangi permeabilitas atau menghilangkan rembesan (*seepage*) akibat air batuan pada *curtain grouting*.

Material *grout* adalah cairan, baik berupa senyawa kimia (*chemical compound*) maupun material suspensi yang diinjeksikan ke dalam batuan atau material yang belum terkonsolidasi (*unconsolidated material*) melalui lubang khusus yang dibuat (*drilled hole*).

Menurut Hardjomuljadi (2010) pada konstruksi terowongan, berdasarkan material penyusun yang dipakai, *grouting* dibedakan menjadi :

a. *Portland Cement Slurry*

Material ini paling banyak dipakai dalam pekerjaan *grouting*, berupa *cement milk* dengan tambahan material berupa pasir dan *bentonite* serta tambahan senyawa kimia (*additive*) untuk menambah atau mengurangi *setting time*.

b. *Chemical Grouting*

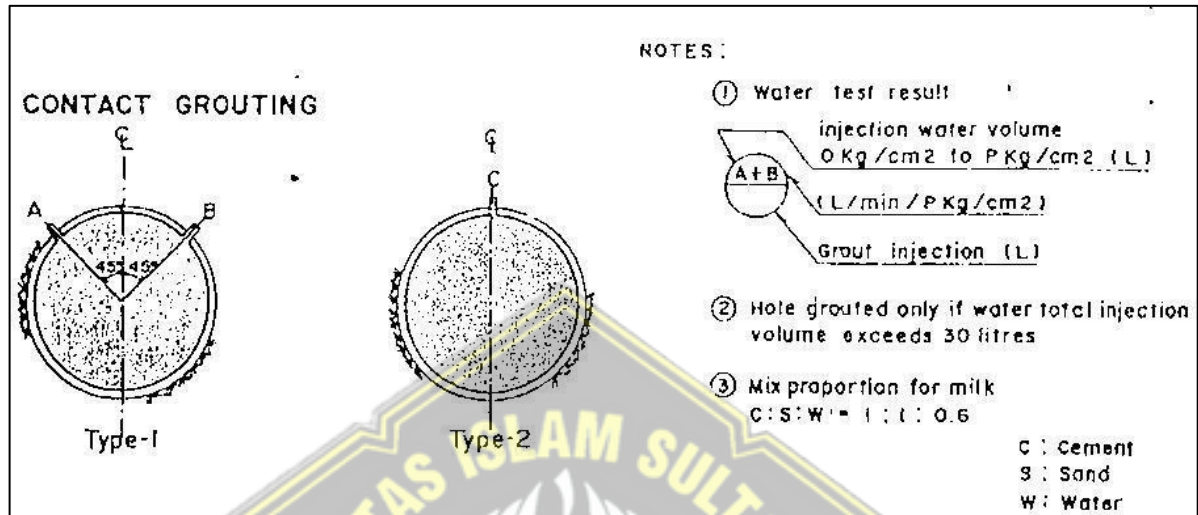
Senyawa kimia yang dicampur dengan air, terutama digunakam dalam hal rekahan (*crack*) pada batuan yang terlalu kecil, atau pada batuan dengan tingkat pelapukan yang tinggi (*very weathered rocks*), dimana batuan mempunyai banyak pori-pori kecil, sehingga partikel suspensi tidak dapat masuk. *Chemical grouting* yang sering digunakan adalah *sodium silicate* (*Na-silicate*).

c. *Organic Resins*

Dalam hal ini termasuk *epoxy resin*. Mengingat harganya yang cukup tinggi, maka *grouting* jenis ini sangat jarang dipergunakan.

Pada pelaksanaan konstruksi terowongan, berdasarkan fungsinya terdapat tiga macam *grouting*, yaitu (Hardjomuljadi, 2010) :

a. *Contact Grouting*

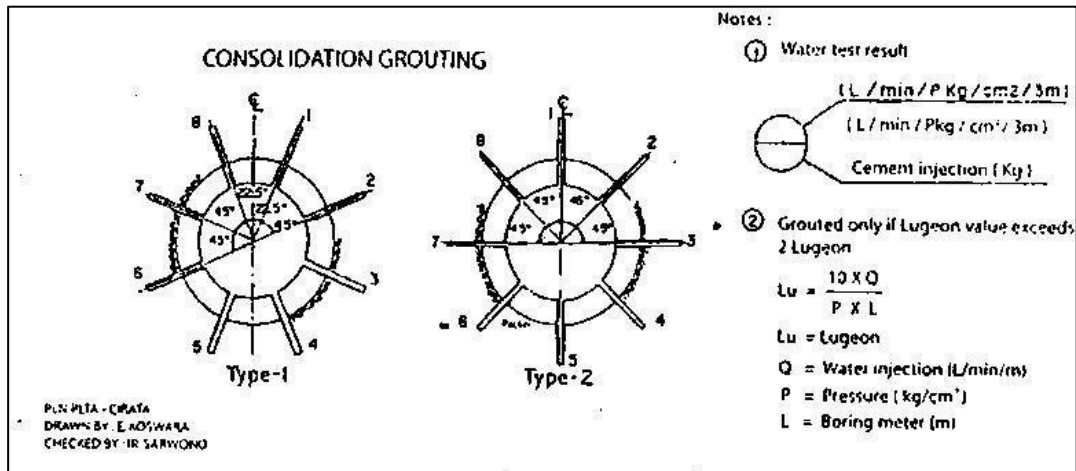


Gambar 2.25. Pelaksanaan *Contact Grouting* (Hardjomuljadi, 2010)

Tujuan dari *Contact grouting* ini adalah untuk menyatukan *lining concrete* terowongan dengan batuan sekelilingnya, dengan cara penginjeksian mortar pada rongga diantara *lining* terowongan dan permukaan *shotcrete* atau massa batuan. Bagian *invert*/ lantai dan dinding sisi terowongan pada umumnya dapat terisi penuh oleh beton akibat berat sendiri beton (*gravity*) atau getaran yang diberikan dengan alat penggetar (*vibrator*).

Pada puncak penampang galian (*crown*), diantara *lining* beton yang sudah dicor dan dinding/ permukaan galian massa batuan tetap akan terdapat rongga, meskipun pelaksanaan pengecoran dilaksanakan dengan teliti. Rongga ini akan bertambah besar akibat pengerasan dan penyusutan beton. Oleh sebab itu pelaksanaan *contact grouting* harus dilaksanakan pada jangka waktu tertentu setelah pengecoran, pada saat beton telah mengeras.

b. Consolidation Grouting

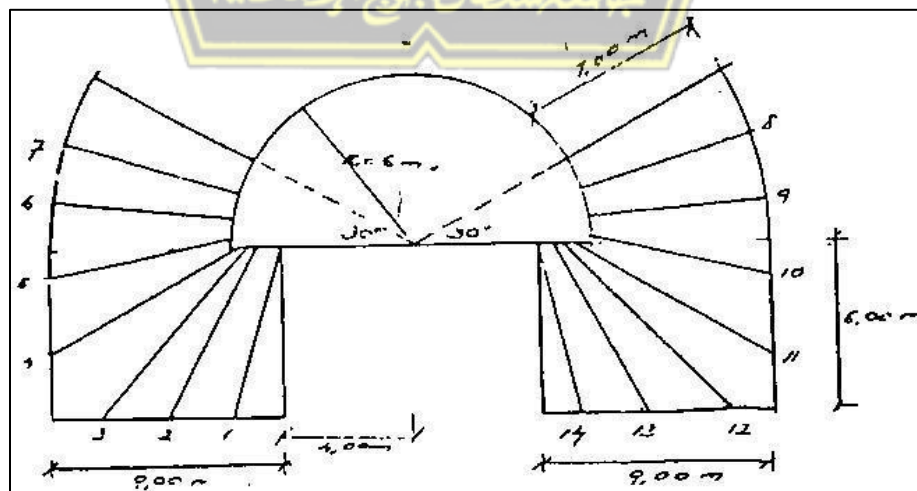


Gambar 2.26. Pelaksanaan *Consolidation Grouting* (Hardjomuljadi, 2010)

Consolidation grouting bertujuan untuk meningkatkan karakteristik batuan dalam hal kemungkinan deformasi dan kebocoran, dengan cara menginjeksikan pasta semen atau mortar ke dalam rekahan pada massa batuan di sekeliling penampang galian terowongan.

c. Curtain Grouting

Curtain grouting ditujukan untuk meningkatkan kededapan batuan dengan membentuk bidang kedap air tegak lurus terhadap sumbu terowongan guna memperpanjang aliran air (*subsurface groundwater seepage*).



Gambar 2.27. *Curtain grouting upper half* (Hardjomuljadi, 2010)

2.2.7. Perangkat Lunak

Metode numerik (antara lain *Finite Element Method*) memberikan alternatif pendekatan yang sangat baik untuk analisis kestabilan lereng, karena lebih efisien, multiguna dan membutuhkan asumsi yang lebih sedikit daripada metode empiris (Griffiths and Lane, 1999). Salah satu perangkat lunak yang sering digunakan untuk analisis kestabilan lereng metode numerik adalah *Slide* dan *Phase2*. Seperti perangkat lunak geomekanik yang lain, terdapat dua tipe kriteria keruntuhan yang umum digunakan dalam analisisnya, yaitu kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb dan Generalised Hoek-Brown. Kriteria keruntuhan Hoek-Brown digunakan untuk menggambarkan hubungan non-linear dari material batuan isotropis, dengan membandingkan nilai kekuatan massa batuan ketika diberikan tekanan tertentu. Persamaan 2.23 berikut merupakan persamaan umum untuk kriteria keruntuhan Hoek-Brown (Das et al., 2013) :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m C_o \sigma_3 + s C_o^2} \quad (2.23)$$

Dengan:

σ_1 : Major principal stress

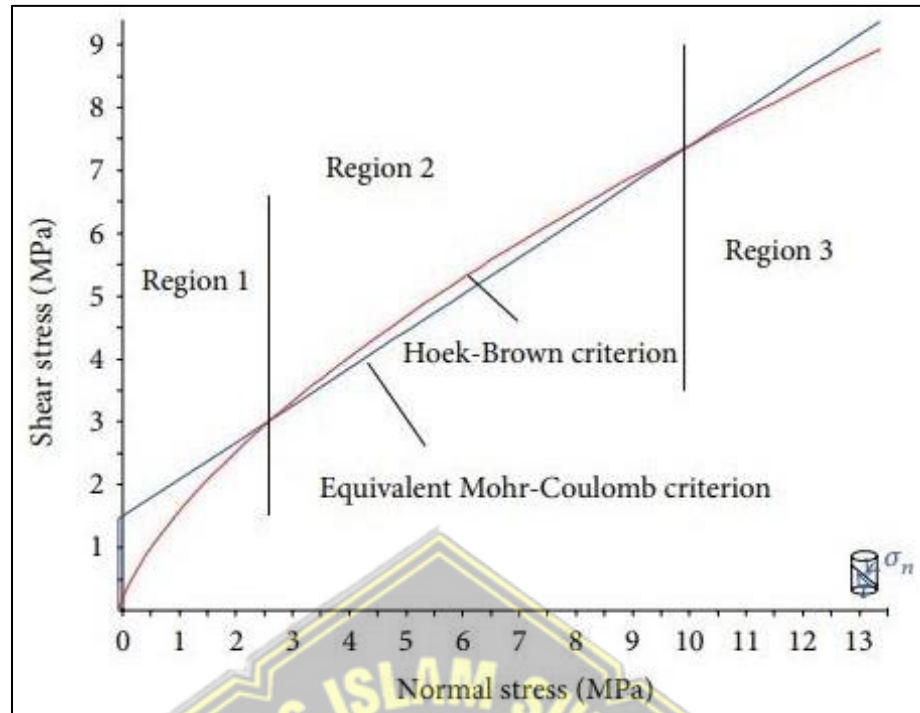
σ_3 : Minor principal stress

m : Material constant of Hoek-Brown

C_o : Uniaxial Compressive

s : Material constant of Hoek-Brown

Perbedaan utama antara kriteria keruntuhan Hoek-Brown dan Mohr-Coulomb adalah pada kurva keruntuhannya yang digambarkan pada Gambar 2.21 (Das et al., 2013). Biasanya kriteria keruntuhan Hoek-Brown digunakan pada pemodelan material batuan dan Mohr-Coulomb pada pemodelan material tanah.



Gambar 2.28. Perbandingan antara Kriteria Keruntuhan Mohr-Coulomb dan Hoek-Brown (Das et al., 2013)

2.2.8. Hipotesis

Berdasarkan bahasan tinjauan pustaka dan pembahasan sub bab diatas dapat dirumuskan hipotesis sebagai berikut :

1. Daerah penelitian memiliki kelas kemiringan lereng curam hingga sangat curam ($20^{\circ} - 55^{\circ}$), elevasi muka air tanah berada diatas trase jalur terowongan artinya kondisi jenuh air pada terowongan dan kerentanan bencana geologi yang dapat terjadi adalah gempa bumi (percepatan puncak batuan dasar = $0,2 - 0,25g$). Berdasarkan data desain lereng portal yang diperoleh, akan diberikan perbaikan geometri lereng pada lereng portal terowongan saluran pengelak Bendungan Jragung sehingga analisis kestabilan lereng didapatkan nilai *safety factor* $> 1,5$ (SNI 8460-2017).
2. Lithologi daerah penelitian didominasi oleh perselingan batulempung - batupasir dan perselingan batupasir, batulanau dan batulempung serta aluvial sungai. Sedangkan sifat keteknikan diperoleh dari hasil pengujian laboratorium berdasarkan data sekunder, nilai kuat tekan batuan dari uji UCS (σ_c) berkisar antara $2,5 - 9,1$ Mpa. Menurut ISRM (1981) termasuk dalam batuan sangat lemah – lemah (*very weak – weak*) dan menurut Bieniawski (1973) termasuk

sangat rendah (*very low*). Hal ini yang mendasari metode penggalian terowongan menggunakan sistem *Top heading and bench*.

3. Dengan kondisi massa batuan sangat lemah (*very poor rock*) sampai dengan lemah (*poor rock*) dan metode penggalian tersebut diatas, maka diperlukan pemberian sistem penyangga berupa *steel rib*, *rockbolts*, *shotcrete*, *lining concrete*, *grouting* atau kombinasi semuanya.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Pengertian Umum

Menurut Wiliam N. Dunn (1981), metodologi diartikan sebagai studi sistematis kualitatif atau kuantitatif dengan berbagai metode dengan teknik analisis. Beberapa analisis ilmiah dapat diterapkan melalui analisis kualitatif dan dapat pula menggunakan analisis kuantitatif. Kedua analisis tersebut dapat digunakan untuk saling melengkapi dan saling mengoreksi sejauh mana ketepatan analisisnya.

Pada penelitian tesis ini dilakukan pengumpulan data sekunder dan primer. Untuk data sekunder diambil dari literatur penelitian sebelumnya dan data primer berupa pengambilan data langsung di lapangan dan kemudian dilakukan pengujian di laboratorium, sebagai input untuk analisis data.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian di lapangan antara lain : Peta topografis skala 1 : 2.000, Peta geologi regional lembar Salatiga, Jawa Tengah skala 1 : 100.000, kompas geologi, *global positioning system (GPS)*, palu geologi, *loupe*, meteran, alat tulis untuk mencatat data yang didapat di lapangan, kamera, plastik sampel, peralatan untuk pengambilan sampel tanah seperti *shelby tube*, alat untuk mengeluarkan sampel tanah (*extruder*), *plastic wrap*, *aluminium foil* dan peralatan lain yang mendukung, seperti APD (Alat Pelindung Diri) di lokasi proyek.

Untuk analisis data beberapa alat dan bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini antara lain : komputer dan printer, kertas HVS A4, modem / jaringan data internet, perangkat lunak *Slide*, *ArcGis*, *Global Mapper*, *Auto Cad*, *Corel Draw*, *Google Earth Pro*, dan bahan-bahan sampel batuan dan tanah untuk analisis di laboratorium.

3.3. Tahapan Penelitian

Secara garis besar tahapan penelitian terdiri dari tahap pendahuluan, pengumpulan data sekunder dan primer, analisis data dan laboratorium, evaluasi hasil dan terakhir adalah tahap pelaporan sebagaimana terdapat pada Gambar 3.1. Adapun secara rinci tahapan penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut :

3.3.1. Tahapan Pendahuluan

Pada tahap pendahuluan ini dilakukan pengumpulan informasi mengenai lokasi yang akan dilakukan penelitian, kemudian dilakukan analisis terhadap lokasi tersebut. Adapun yang dilakukan pada pekerjaan pendahuluan ini adalah :

- a. Menentukan topik penelitian terkait dengan permasalahan geologi teknik dan analisis kestabilan terowongan.
- b. Melakukan studi pustaka terkait dengan topik penelitian dan lokasi penelitian, dengan tujuan untuk mengetahui gambaran kondisi geologi daerah penelitian dengan cara mempelajari geomorfologi regional, stratigrafi regional, geologi teknik regional, dan potensi kerentanan tanah.
- c. Penyusunan dasar teori dan metode yang digunakan dalam penelitian konstruksi terowongan seperti klasifikasi tanah, klasifikasi massa batuan, kestabilan lereng, metode penggalian terowongan, kestabilan sistem penyangga dan aplikasinya pada perangkat lunak.
- d. Penyusunan hipotesis penelitian mengenai kondisi geologi teknik, kestabilan lereng portal terowongan, metode penggalian bukaan terowongan, dan kestabilan sistem penyangga terowongan.
- e. Persiapan bahan dan peralatan untuk melakukan penelitian di lapangan.

3.3.2. Tahapan Pengumpulan Data

3.3.2.1. Pengumpulan Data Primer

Pengumpulan data primer yang dilakukan/ diambil secara langsung di lokasi penelitian antara lain :

1. Pengamatan kondisi geologi permukaan

Pada pengamatan geologi permukaan dilakukan pengamatan singkapan batuan yang ditemukan di lokasi penelitian secara langsung. Pengamatan

morfologi dilakukan dengan memperhitungkan sudut kemiringan lereng yang didasarkan pada peta topografi. Peta geologi regional digunakan sebagai acuan dalam pemetaan geologi detail area penelitian. Kemudian pengamatan dan deskripsi terhadap litologi batuan untuk mengetahui satuan batuan pada daerah penelitian serta pengamatan terhadap struktur geologi untuk mengetahui adanya sesar atau kekar pada diskontinuitas massa batuan.

2. Pengambilan sampel batuan dan tanah

Pengambilan sampel pada titik pengamatan terpilih dilakukan sesuai dengan lintasan yang telah ditentukan sebelumnya dengan mempertimbangkan keterwakilan setiap litologi. Pengambilan sampel dilakukan dengan melakukan pencatatan tanggal pengambilan sampel, koordinat, orientasi arah pengambilan sampel, serta dokumentasi. Sampel-sampel tersebut selanjutnya digunakan untuk melakukan deskripsi batuan dan pengujian di laboratorium.

3. Pengukuran *Geological Strength Index* (GSI) batuan permukaan

Pengukuran GSI dilakukan pada setiap titik pengamatan di lokasi penelitian. Pengukuran yang dilakukan pada penyelidikan ini terdiri dari dua parameter yaitu struktur dan kondisi permukaan batuan, dengan cara :

- Menentukan estimasi tingkat kekuatan batuan di lapangan (Gambar 2.18) untuk mengetahui kekuatan batuan secara kualitatif, sebagai gambaran untuk pengambilan sampel. Selanjutnya tetap dilakukan uji kuat tekan batuan menggunakan *Unconfined Compressive Strength* (UCS) di Laboratorium Balai Hidrolika dan Geoteknik Keairan – PUPR dan STE (Soil Testing and Equipment) Bandung.
- Menentukan tingkat derajat pelapukan berdasarkan *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 1978).

4. Analisis sampel *core* (bor inti)

Analisis sampel *core* akan dilakukan terhadap beberapa titik pemboran yang terdapat pada lokasi trase terowongan. Dengan analisis ini didapatkan nilai GSI batuan bawah permukaan untuk menentukan klasifikasi massa batuan sebagai salah satu parameter untuk perancangan terowongan.

Pengukuran GSI bawah permukaan dilakukan terhadap sampel bor inti dengan memperhatikan aspek berikut :

- Penentuan jenis litologi batuan bawah permukaan (*core*) di setiap titik pemboran dilengkapi dengan data kedalamannya.
- Penilaian *Rating Joint Condition* berdasarkan Bieniawski (1989) dalam Das et al. (2013). Penilaian dilakukan tiap 1 m kedalaman tiap titik pemboran, pada batuan dengan kondisi dengan *infilling* dan tanpa *infilling*.
- Perhitungan *Rock Quality Designation* (RQD) untuk tiap 1 m kedalaman pada titik pemboran yang dilakukan.
- Penentuan nilai kualitas massa batuan dalam angka GSI.

3.3.2.2. Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder dalam penelitian ini didapatkan dari desain perencanaan terowongan Bendungan Jragung yang telah dilakukan sebelumnya oleh BBWS Pemali Juana. Data tersebut digunakan sebagai data pelengkap dalam analisis kestabilan lereng portal terowongan, metode penggalian, dan kestabilan sistem penyangga terowongan. Data sekunder yang perlu dikumpulkan antara lain :

a. Peta Topografi

Data peta topografi yang diperoleh dari hasil pengukuran langsung di lapangan yang dilakukan oleh konsultan perencana dengan skala 1 : 2.000. Peta ini dijadikan sebagai peta dasar dalam pemetaan geologi.

b. Hasil laboratorium batuan bawah permukaan (sampel pemboran inti)

Data hasil laboratorium sampel pemboran inti yang dilakukan oleh konsultan perencana berupa data *Index Properties* tanah dan batuan, *Unconfine Compressive Strength* (UCS), *Direct Shear* dan *Triaxial*.

c. Hasil pengamatan pemboran inti

Dari hasil pengamatan pemboran inti ini didapatkan deskripsi batuan, kedalaman air tanah dan indeks permeabilitas.

d. Geometri terowongan

Data geometri terowongan berupa gambar desain terowongan mulai dari trase terowongan dan kedalaman terowongan seperti pada Gambar 2.13, dan geometri penampang melintang terowongan saluran pengelak seperti pada Gambar 2.15.

3.3.3. Tahapan Analisis

3.3.3.1. Analisis Laboratorium

Kegiatan laboratorium yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain adalah pengujian *index properties* tanah dan batuan, uji *uniaxial compressive strength* (UCS) pada batuan, uji *triaxial* pada batuan, serta uji petrografi batuan.

1. *Index Properties* Tanah dan Batuan

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan sifat indeks pada tanah dan batuan yang akan digunakan sebagai parameter desain dan analisis data. Pengujian sifat indeks dilakukan untuk mendapatkan parameter densitas, kadar air, *specific gravity*, indeks plastisitas, rasio pori, saturasi, porositas, batas cair dan batas plastis.

Prosedur pengujian yang dilakukan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) dan standar lain seperti *American Society for Testing and Materials* (ASTM) sebagaimana dijelaskan pada sub bab 2.2.3.1.

2. Uji Kuat Tekan Bebas (*Uniaxial Compressive Strength, UCS*)

Uji ini dilakukan untuk mengetahui kuat tekan karakteristik batuan. Pengujian dilakukan pada *intact rock* dengan memberikan tegangan dalam satu arah sampai dengan batas tertentu. Standar yang digunakan untuk pengujian kuat tekan batuan adalah SNI 2825 (2008).

3. Uji Triaxial

Serupa dengan uji triaxial pada tanah, pada uji triaxial batuan digunakan sample uji silinder yang diberikan tekanan dengan batas berbeda-beda serta pembebanan axial hingga mengalami kegagalan. Perbedaanannya hanya terdapat pada beban dan tekanan yang diberikan pada batuan jauh lebih besar dari pada tanah. Prosedur pengujian yang direkomendasikan oleh ISRM (1983) tidak mempertimbangkan tekanan air pori atau pengaruh drainasi. Hal ini serupa dengan uji triaksial UU (*Unconsolidated Undrained*) pada sample uji tanah. Prosedur tes untuk berbagai macam tipe keruntuhan, serupa dengan tes bertahap dan tes tipe keruntuhan berlanjut, dijelaskan dalam ISRM (1983) (Das et al., 2013).

4. Uji Petrografi

Uji petrografi dilakukan untuk mendapatkan deskripsi batuan dan memastikan klasifikasi/ penamaan batuan berdasarkan pengamatan sayatan tipis/ petrografis. Deskripsi ini menggunakan bantuan alat mikroskop polarisasi dengan sinar transmisi. Menurut (Setiawan et al., 2016) sayatan tipis adalah potongan batuan atau material yang dilekatkan pada kaca preparat mikroskop menggunakan media khusus atau *mounting agent* (lem epoxy atau canada balsam) kemudian ditipiskan hingga mencapai ketebalan ± 0.03 mm. Tujuan dari pengamatan ini untuk mengetahui komposisi mineral, tekstur batuan, sifat optis mineral dan informasi mikroskopis lainnya. Tahapan dalam menganalisa sayatan tipis yaitu :

- a. Memotong batuan (membuat *slab*), yaitu lempengan batuan dengan ketebalan 2-3 cm.
- b. Membuat *chip*, yaitu orientasi potongan dari *slab*.
- c. *Impregnation Chip* (khusus batuan berpori, lunak dan material lepaslepas), teknik ini pada dasarnya adalah merendam batuan ke dalam *epoxy* agar pori terisi *epoxy* dan material lepas terikat oleh *epoxy*.
- d. Menghaluskan permukaan *chip*, penghalusan ini dilakukan manual dengan gerinda.
- e. Mengeringkan *chip* dan menempelkan pada kaca preparat.
- f. Memotong sisa *chip* yang menempel pada preparat.
- g. Menghaluskan sayatan tipis.
- h. Menempelkan kaca penutup.
- i. Menghaluskan sayatan dengan *diamond paste*.

3.3.3.2. Analisis Data

Berdasarkan data yang diperoleh baik data primer maupun data sekunder serta hasil analisis laboratorium, selanjutnya dilakukan analisis untuk merencanakan kestabilan lereng, metode penggalan massa batuan dan terowongan, serta sistem penyangga terowongan. Tahapan analisis data dalam penelitian ini, meliputi beberapa hal sebagai berikut :

3.3.3.2.1. Pembuatan Peta Geomorfologi

Peta geomorfologi dibuat dengan skala 1 : 1.000 dengan memberikan informasi satuan geomorfologi pada daerah penelitian. Analisis geomorfologi terdiri dari kemiringan lereng daerah studi dengan pendekatan klasifikasi kelas lereng menurut van Zuidam (1983), serta pola pengaliran yang dapat memberikan gambaran tentang bagaimana bentuk lahan, proses fluvial, litologi dan struktur geologi terbentuk.

3.3.3.2.2. Pembuatan Peta Geologi

Peta geologi dibuat berdasarkan hasil pengamatan litologi, struktur geologi di lapangan dikorelasikan dengan hasil petrografi, paleo umur relatif dan stratigrafi bawah permukaan. Peta geologi daerah penelitian dibuat dalam skala lokal penelitian 1 : 1.000 dengan dilengkapi informasi mengenai satuan batuan, struktur geologi dan stratigrafi batuan daerah penelitian.

3.3.3.2.3. Pembuatan Peta GSI

Peta GSI menggambarkan kondisi geologi teknik di permukaan. Penampang geologi teknik berisi informasi terkait karakteristik geologi teknik bawah permukaan di sepanjang trase terowongan. Pembuatan penampang geologi teknik berdasarkan peta geologi detail, peta GSI permukaan, sifat fisik tanah dan batuan serta sifat keteknikan tanah dan batuan berdasarkan klasifikasi kekuatan massa batuan dengan menggunakan GSI yang dikorelasikan dengan kondisi tingkat pelapukan batuan.

3.3.3.2.4. Analisis Parameter Kekuatan Massa Batuan

Analisis parameter kekuatan massa batuan dilakukan berdasarkan hasil pengujian laboratorium terkait sifat indeks dan keteknikan (data primer dan sekunder) dan analisis kualitas massa batuan dengan GSI dan RMR dari *bore log* hasil pengeboran.

3.3.3.2.5. Evaluasi Kualitas Massa Batuan Bawah Permukaan

Evaluasi kualitas massa batuan bawah permukaan dilakukan untuk mendapatkan nilai yang dihasilkan dari batuan bawah permukaan yang digunakan untuk analisis metode penggalian dan kestabilan sistem penyangga terowongan. Evaluasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran nilai RMR dan nilai GSI yang telah dikorelasikan dengan RMR.

3.3.3.2.6. Penentuan Parameter Pelaksanaan Terowongan

Beberapa parameter pelaksanaan terowongan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.3.3.2.6.1. Geometri Terowongan

Geometri terowongan diperoleh dari data primer dan data sekunder hasil desain dari BBWS Pemali Juana sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2.15.

3.3.3.2.6.2. Sistem Penyangga

Pemilihan sistem penyangga yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode *New Austrian Tunneling Method* (NATM) dan skema berdasarkan RMR (Tabel 2.9) dengan menggunakan GSI sebagai acuan.

3.3.3.2.6.3. Kemiringan Lereng Portal

Kemiringan lereng portal terowongan diperoleh dari data primer dan data sekunder berupa hasil desain potongan memanjang dan melintang terowongan.

3.3.3.2.6.4. Material Properties

Material properties diperoleh dari hasil analisis parameter kekuatan massa batuan bawah permukaan sebagaimana terdapat pada sub bab 3.3.3.2.4.

3.3.3.2.7. Analisis Kestabilan Lereng pada Portal Terowongan

Analisis kestabilan lereng portal dilakukan menggunakan metode empiris *Circular Failure Chart (CFC)* serta metode numerik dengan software *Slide* dan *Phase2*. Dalam analisis kestabilan lereng ini diperlukan data material properties tanah, batuan dan material rockbolt, nilai GSI, *disturbance factor* (D), konstanta material batuan utuh (m_i), konstanta massa batuan (s & m_b), kuat tekan, data geometri lereng, dan data kedalaman muka air tanah. Hasil dari analisis ini didapatkan angka aman kemiringan lereng portal terowongan yang paling efisien dan aman.

3.3.3.2.8. Analisis Metode Penggalian Terowongan

Analisis ini bertujuan untuk mendapatkan metode penggalian massa batuan dan penggalian bukaan terowongan yang sesuai kondisi geologi dan geologi teknik massa batuan bukaan terowongan. Dalam penelitian ini, analisis metode penggalian terowongan dilakukan dengan menggunakan metode RMR dan NATM.

3.3.3.2.9. Analisis Sistem Penyangga Terowongan

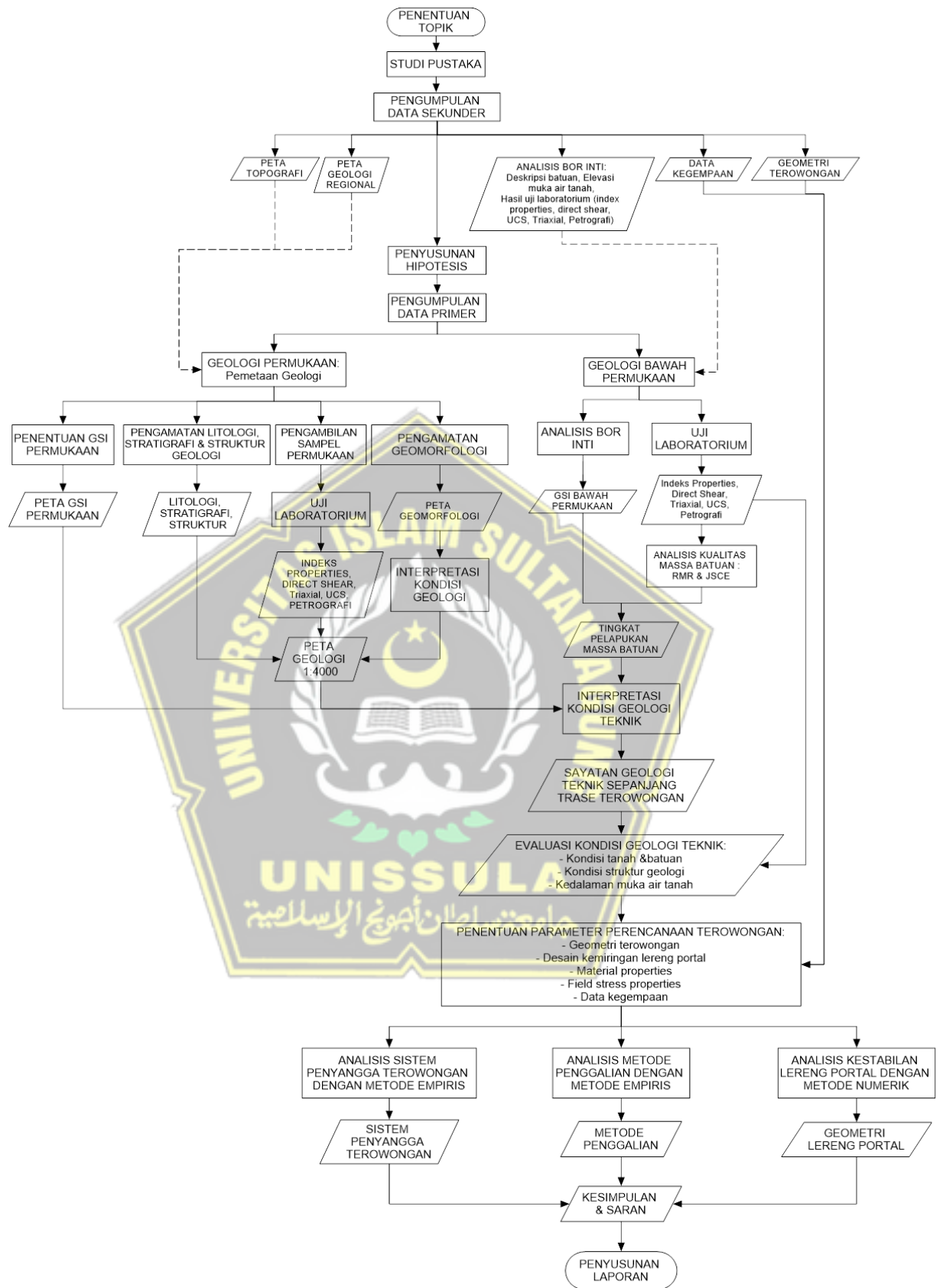
Untuk analisis sistem penyangga terowongan dilakukan dengan metode empiris yaitu RMR dan NATM. Analisis ini ditujukan untuk mendapatkan sistem penyangga yang cocok dengan kondisi batuan terowongan sehingga terowongan lebih stabil dan aman.

3.3.4. Tahapan Evaluasi Hasil

Evaluasi hasil dalam penelitian ini dilakukan terhadap tiga aspek utama yaitu geometri lereng portal, metode penggalian dan sistem penyangga terowongan. Geometri lereng pada portal terowongan yang aman terhadap longsor didapat dengan melakukan tinjauan berdasarkan persyaratan nilai faktor keamanan. Selain itu dari tahapan analisis metode penggalian dan sistem penyangga terowongan diharapkan mendapatkan metode penggalian yang efektif dan sistem penyangga terowongan yang tepat.

3.3.5. Tahapan Pelaporan

Tahapan akhir dari pelaksanaan penelitian ini adalah pelaporan yang berisi semua tahapan yang dilakukan dengan mengacu pada standar penulisan tesis dari Buku Pedoman Penyusunan dan Penulisan Tesis, Magister Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung. Tahapan penelitian ini dapat dilihat secara ringkas pada diagram alir seperti terdapat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian Tesis

3.4 Jadwal Pelaksanaan Penelitian Tesis

Pelaksanaan penelitian Tesis “Evaluasi Geologi Teknik pada Pelaksanaan Konstruksi Terowongan Saluran Pengelak Bendungan Jragung, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah” ini direncanakan dapat diselesaikan dalam waktu 5 (lima) bulan. Adapun *bar chart* jadwal pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1. Jadwal Pelaksanaan Penelitian

No.	Kegiatan	Oktober 2022				November 2022				Desember 2022				Januari 2023				Februari 2023			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Pengajuan Pembimbing Tesis																				
2	Pembuatan Proposal Tesis																				
3	Penjilidan Proposal Tesis																				
4	Sidang Proposal Tesis																				
5	Revisi Setelah Seminar																				
6	Penulisan Artikel Ilmiah dan Publikasi																				
7	Analisa Data dan Pembuatan Tesis																				
8	Sidang Tesis																				
9	Revisi Tesis																				
10	Penjilidan Tesis																				

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penelitian

Pada sub bab ini menyajikan hasil penelitian tentang karakteristik geologi dan geologi teknik, kemiringan lereng portal terowongan, metode penggalian dan penentuan sistem penyangga terowongan.

4.1.1. Karakteristik Geologi dan Geologi Teknik

Penjelasan tentang karakteristik geologi termasuk didalamnya geomorfologi, litologi, stratigrafi, struktur geologi, air tanah, kegempaan, geologi teknik dan kualitas massa batuan. Sehingga dihasilkan peta geomorfologi, peta geologi dan peta geologi teknik daerah penelitian.

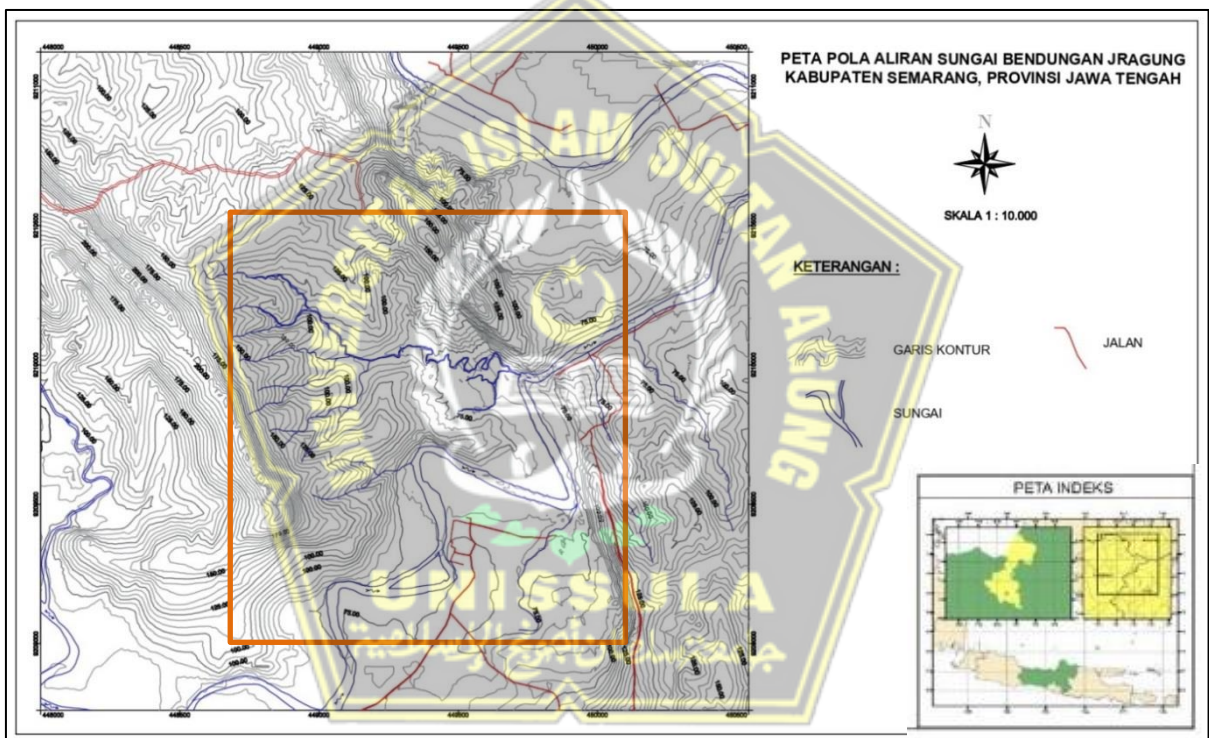
4.1.1.1. Geomorfologi

Berdasarkan klasifikasi kemiringan lereng oleh Van Zuidam (1983), di daerah penelitian dijumpai morfologi dengan kemiringan lereng, yaitu : agak curam - curam, kelerengan 15 – 70% (a), landai - miring, kelerengan 2 – 15% (b), dan datar - landai, kelerengan 0 – 7% (c), seperti ditunjukkan dalam dokumentasi lapangan pada Gambar 4.1.



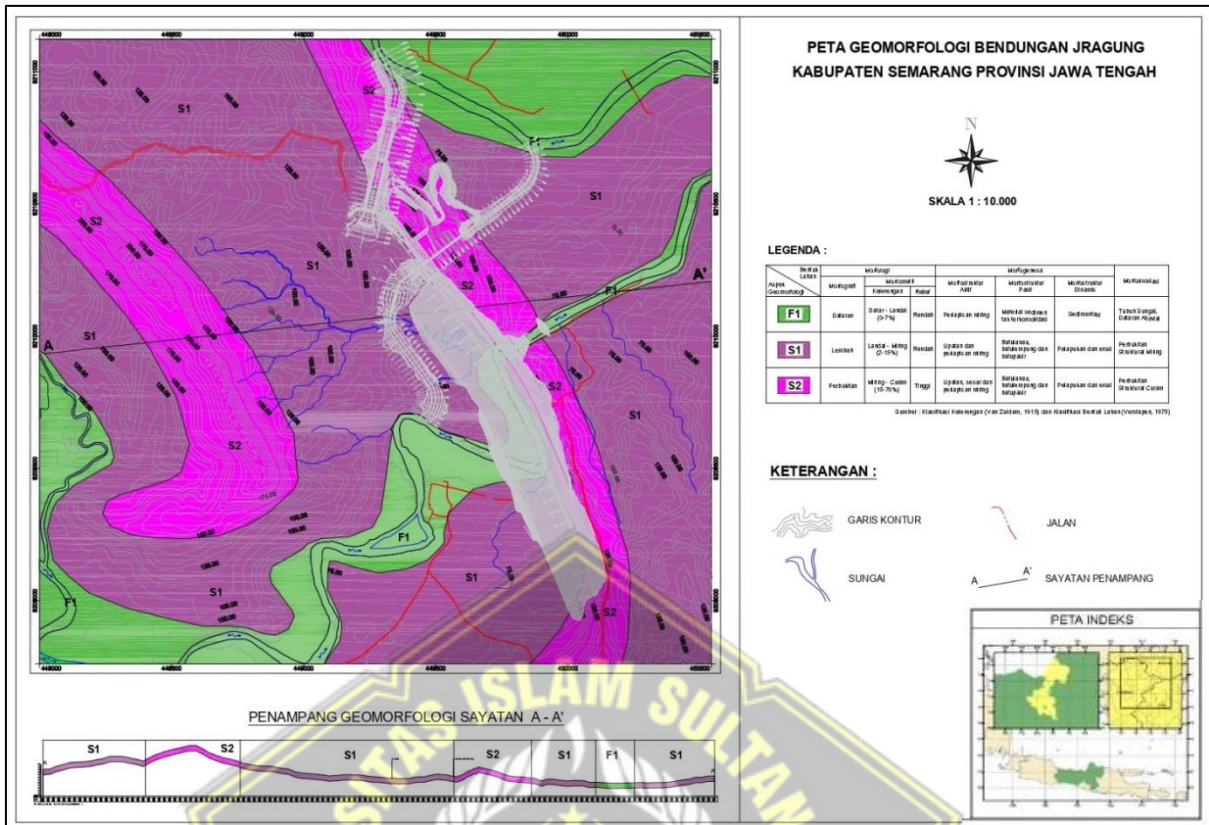
Gambar 4.1. Kenampakan Geomorfologi Daerah Penelitian
(a) Morfologi Agak Curam - Curam; (b) Morfologi Landai - Miring;
(c) Morfologi Datar – Landai

Selain ditinjau dari aspek kemiringan lereng, geomorfologi daerah penelitian juga ditinjau dari pola pengaliran. Dari hasil analisis pola pengaliran menghasilkan peta pola aliran sungai seperti pada Gambar 4.2, yang menunjukkan lokasi penelitian memiliki pola pengaliran trellis, yaitu pola aliran sungai yang berbentuk pagar (*trellis*) dan dikendalikan oleh struktur geologi berupa pelipatan siklin dan antiklin. Pola aliran trellis dicirikan oleh pola saluran-saluran air yang sejajar, mengalir searah kemiringan lereng dan tegak lurus dengan saluran utamanya yang berarah searah dengan sumbu lipatan (Howard, 1967).



Gambar 4.2. Peta Pola Aliran Sungai Daerah Penelitian

Berdasarkan pengamatan terhadap kemiringan lereng dan pola pengaliran diatas, penentuan satuan morfologi daerah penelitian dibagi menjadi tiga (3), yaitu: satuan perbukitan struktural curam (S2), satuan perbukitan struktural miring (S1), dan satuan dataran sungai (F1) seperti digambarkan pada peta geomorfologi Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Peta Geomorfologi Daerah Penelitian

a. Satuan Perbukitan Struktural Curam

Satuan morfologi ini terletak pada kemiringan antara 15 - 70%, menurut klasifikasi kemiringan lereng van Zuidam (1983) tergolong ke dalam kemiringan agak curam – curam. Relief dari satuan morfologi ini memiliki beda tinggi 72 m dengan titik tertinggi 213 m diatas permukaan laut dan titik terendah 141 m diatas permukaan laut. Proses endogen yang membentuk morfologi ini berupa lipatan, sesar dan perlapisan miring, sedangkan faktor eksogen yang berpengaruh antara lain pelapukan, erosi, serta transportasi material sedimen. Litologi penyusun satuan morfologi ini adalah satuan batulempung dan satuan batupasir dengan tingkat pelapukan sedang – segar. Hampir sebagian besar wilayah tertutup oleh vegetasi semak belukar, sebagian lainnya terdapat perkebunan warga, serta jalan setapak. Wilayah ini rawan terhadap bahaya longsor. Gambar 4.4. berikut ini merupakan kenampakan dari satuan morfologi perbukitanstruktural curam.



Gambar 4.4. Kenampakan Satuan Morfologi Perbukitan Struktural Curam

b. Satuan Perbukitan Struktural Miring

Satuan morfologi ini terletak pada kemiringan antara 2 - 15%, yang mana tergolong ke dalam kemiringan landai - miring menurut klasifikasi kemiringan lereng van Zuidam (1983). Relief dari satuan morfologi ini memiliki beda tinggi 65 m dengan titik tertinggi 141 m diatas permukaan laut dan titik terendah 76 m diatas permukaan laut. Proses endogen yang membentuk morfologi ini berupa lipatan dan perlapisan miring, sedangkan faktor eksogen yang berpengaruh antara lain pelapukan, erosi dan gerakan tanah dengan kecepatan yang perlahan - lahan. Litologi penyusun satuan morfologi ini adalah satuan batulempung dan satuan batupasir dengan tingkat pelapukan sedang – segar. Hampir sebagian besar wilayah tertutup oleh vegetasi semak belukar, perkebunan warga dan sebagian lainnya terdapat jalan setapak. Wilayah ini rawan terhadap bahaya longsor dan erosi. Gambar 4.5. berikut ini merupakan kenampakan satuan morfologi perbukitan struktural miring.



Gambar 4.5. Kenampakan Satuan Morfologi Perbukitan Struktural Miring

c. Satuan Dataran Sungai

Satuan morfologi ini terletak pada kemiringan antara 0% - 7%, menurut klasifikasi kemiringan lereng Van Zuidam (1983) tergolong ke dalam kemiringan datar – landai. Relief dari satuan morfologi ini memiliki beda tinggi 17 m dengan titik tertinggi 76 m diatas permukaan laut dan titik terendah 59 m diatas permukaan laut. Proses endogen yang membentuk morfologi ini berupa perlapisan miring dan sesar, sedangkan faktor eksogen yang berpengaruh antara lain pelapukan, erosi, transportasi dan sedimentasi. Litologi penyusun satuan ini adalah material sedimen tak terkonsolidasi berupa endapan koluvial dan endapan alluvial sungai. Wilayah ini rawan terhadap bencana banjir. Gambar 4.6. berikut ini merupakan kenampakan dari satuan morfologi dataran sungai.



Gambar 4.6. Kenampakan Satuan Morfologi Dataran Sungai

4.1.1.2. Litologi

Penentuan litologi dilakukan dengan melakukan pemetaan geologi, pengamatan megaskopis terhadap singkapan batuan yang ada di lapangan, analisis terhadap hasil pemboran inti dan pengamatan mikroskopis di laboratorium. Pemetaan dilakukan pada area seluas kurang lebih $1 \times 1 \text{ km}^2$ dan pengamatan megaskopis dilakukan terhadap singkapan batuan dengan tingkat pelapukan yang bervariasi yang ditemukan di lokasi daerah penelitian.

Pembagian satuan batuan berdasarkan pada kesamaan ciri-ciri kenampakan fisik dan komposisi material penyusun batuan baik secara megaskopis maupun mikroskopis. Hasil pengamatan megaskopis di lapangan menunjukkan lokasi penelitian dapat dibagi menjadi tiga satuan batuan yaitu: satuan alluvial, satuan batupasir dan satuan batulempung.

a. Satuan Alluvial

Satuan Alluvial ini terdiri dari material hasil rombakan dari batupasir, batulempung dan batulanau dengan ukuran butir dari lempung sampai bongkah berupa material lepas, dengan nilai permeabilitas tinggi dan kohesi rendah. Satuan alluvial ini meliputi sekitar 20% area penelitian, umumnya terdapat pada area alur sungai.



Gambar 4.7. Singkapan Alluvial pada Alur Sungai Sta. 1+140

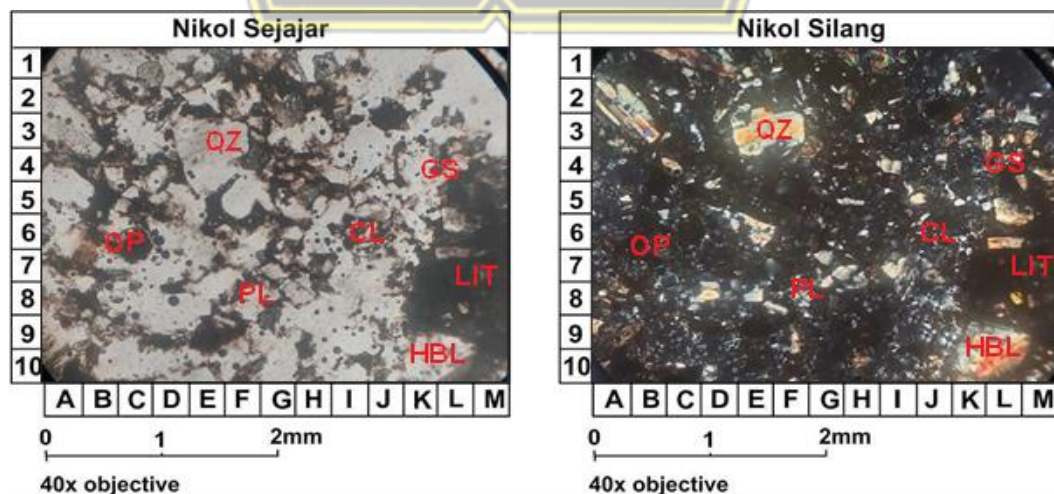
b. Satuan Batupasir

Satuan batupasir juga termasuk kedalam anggota Banyak Formasi Kalibeng yang terbentuk pada kisaran kala Miosen Akhir sampai Pliosen. Satuan batupasir ini

terdiri dari lapisan batupasir perselingan batulempung dan batulanau dengan ketebalan lapisan 30 – 80 cm. Satuan batuan ini didominasi oleh peralapisan batupasir. Satuan batupasir meliputi sekitar 35% area penelitian. Batupasir dapat dideskripsikan dengan ciri batuan berwarna abu – abu gelap kecoklatan, tekstur klastika halus – kasar dengan ukuran butir 0,004 – 2 mm dan kebundaran menyudut hingga menyudut tanggung. Matrix supported, terpilah baik, dimana terlihat fragmen mengambang pada matriks dengan kemas terbuka, yang tersusun oleh Opaque Material, Kuarsa, Plagioklas, Glash Shard, Hornblende, kontak yang dijumpai yaitu point contact dimana kontak antara butir sangat minim. Singkapan batupasir dapat dilihat pada Gambar 4.8. dan kenampakan batupasir hasil uji petrografi dapat dilihat pada Gambar 4.9. Adapun deskripsi lengkap batupasir berdasarkan hasil uji petrografi dapat dilihat pada Lampiran 7.



Gambar 4.8. Singkapan Batupasir Perselingan Batulempung dan Batulanau pada Sta. 0+960 (strike/dip= N 341° E/ 83°)



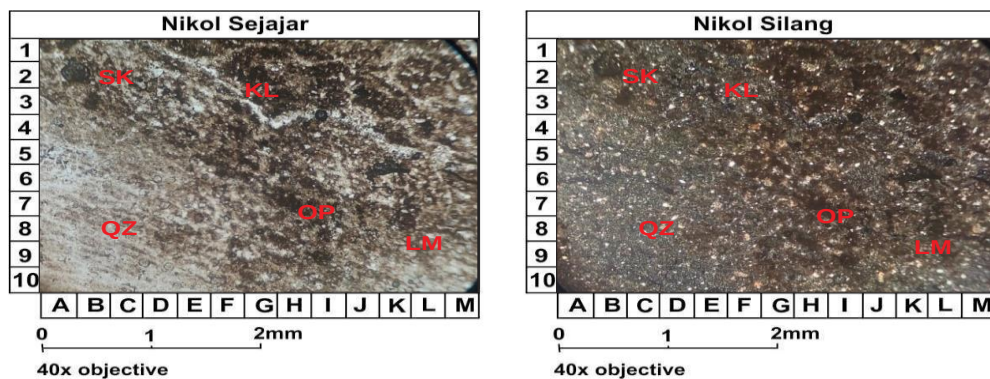
Gambar 4.9. Foto Hasil Uji Petrografi Batupasir

c. Satuan Batulempung

Satuan batulempung termasuk kedalam anggota Banyak Formasi Kalibeng yang terbentuk pada kisaran kala Miosen Akhir sampai Pliosen. Satuan batulempung ini terdiri dari lapisan batulempung sisipan batupasir dan batulanau dengan ketebalan lapisan 10 – 90 cm. Satuan ini meliputi sekitar 45% area penelitian. Batulempung dapat dideskripsikan dengan ciri batuan berwarna abu kecoklatan, dengan kondisi sedikit lapuk - fresh. Tekstur yang ditunjukkan memiliki ukuran klastika halus dengan ukuran butir $< 0,004 - 1,4$ mm dengan kebundaran membundar tanggung. Matrix supported, terpilah buruk, kontak yang dijumpai yaitu *floating contact*, *concave convex* dimana terlihat fragmen mengambang pada matriks yang tersusun oleh Opaque Material, Kuarsa, Skeletal, Limemud, Kalsit. Singkapan batulempung dapat dilihat pada Gambar 4.10. dan kenampakan batulempung hasil uji petrografi dapat dilihat pada Gambar 4.11. Adapun deskripsi lengkap batulempung berdasarkan hasil uji petrografi dapat dilihat pada Lampiran 7.

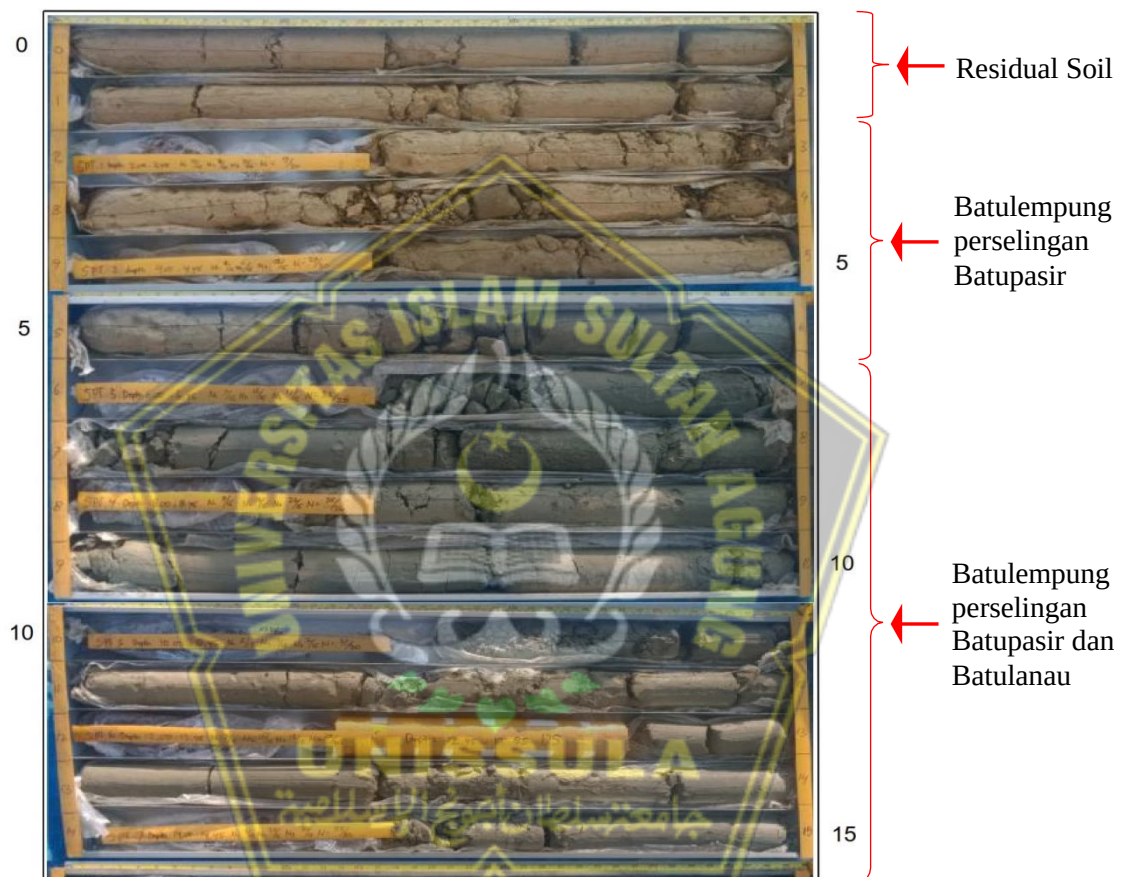


Gambar 4.10. Singkapan Batulempung Sisipan Batupasir dan Batulanau di Sta. 0+760 (strike/dip= N 353°E/ 81°)



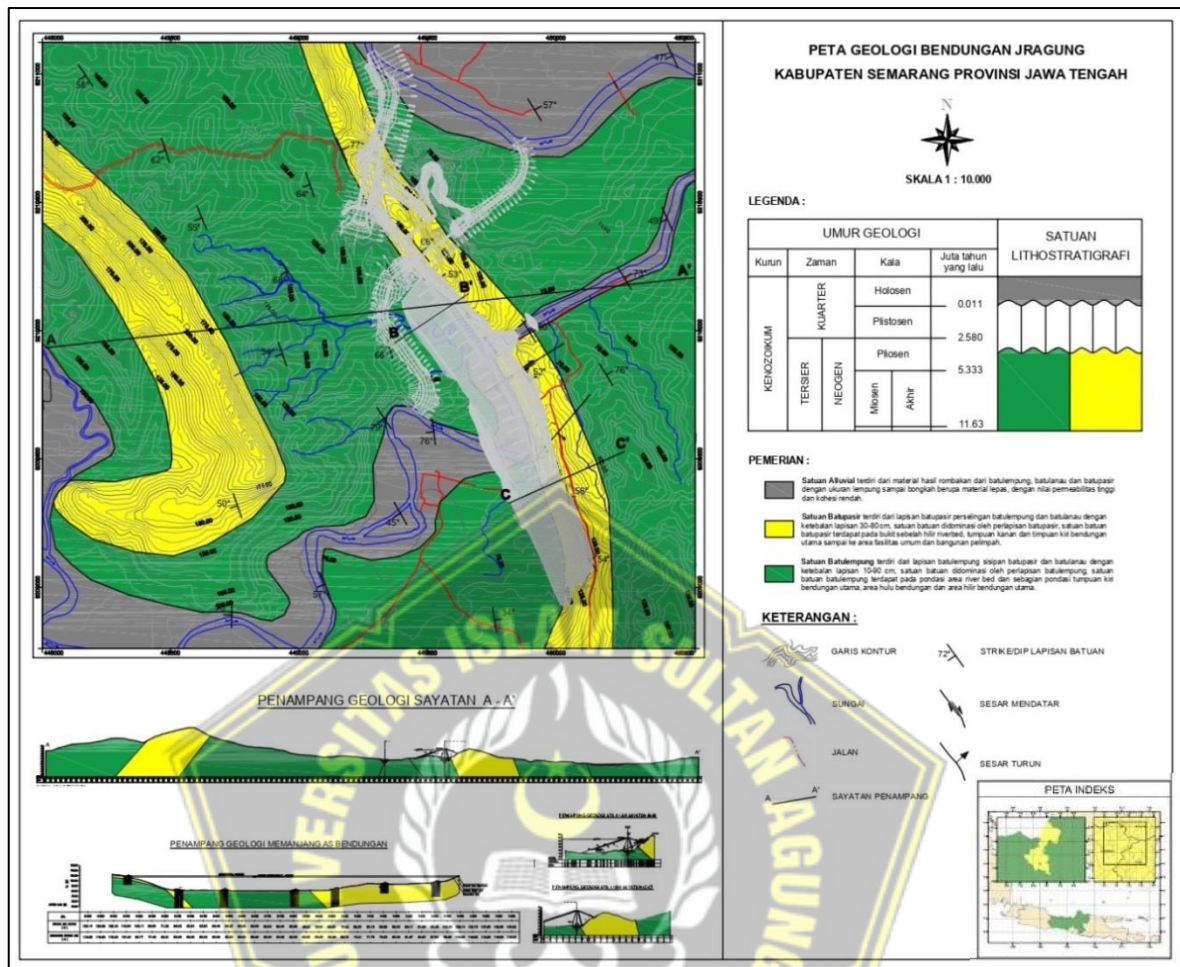
Gambar 4.11. Foto Hasil Uji Petrografi Batulempung

Selanjutnya pengamatan terhadap hasil pemboran inti dilakukan pada titik BP-01, BP-02 dan BP-03 seperti terlihat pada Gambar 4.14. Salah satu contoh pengamatan dilakukan pada BP-03 dengan hasil pada kedalaman 0 - 2 m berupa tanah residu, kedalaman 2 – 6 m berupa batulempung perselingan batupasir, dan kedalaman 6 – 15 m berupa batulempung perselingan batupasir dan batulanau. Contoh pengamatan sampel batuan bawah permukaan dapat dilihat pada Gambar 4.12. dan hasil pengamatan keseluruhan dapat dilihat pada Lampiran 2.



Gambar 4.12. Contoh Pengamatan Sampel Inti Batuan Hasil Pemboran BP-03

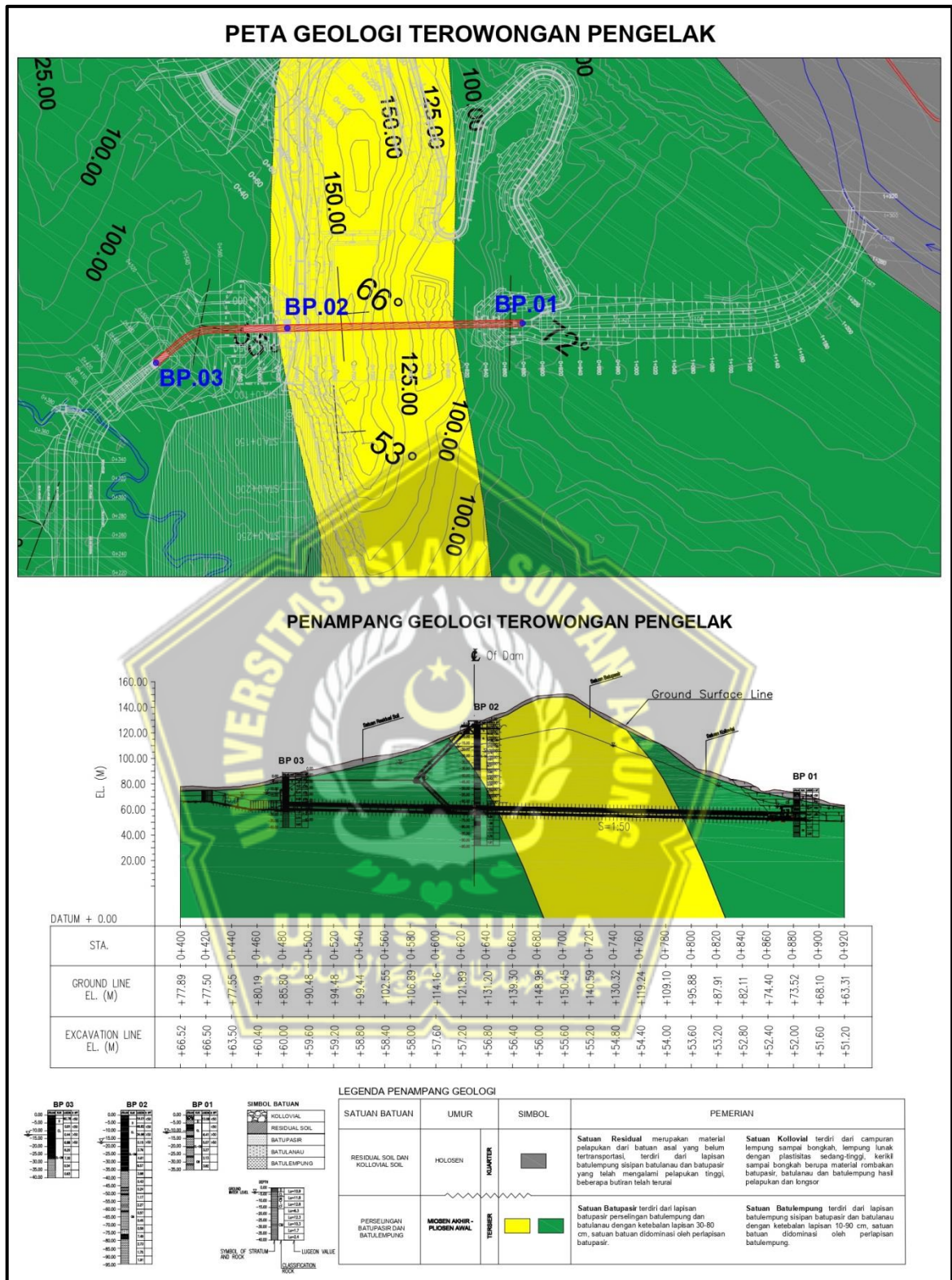
Hasil deskripsi keseluruhan terhadap batuan secara megaskopis terhadap singkapan, pengamatan batuan bawah permukaan dari hasil pemboran inti dan pengamatan mikroskopis dengan uji petrografi menunjukkan bahwa litologi terdiri dari tiga satuan batuan, yaitu satuan alluvial, satuan batulempung, dan satuan batupasir. Sebaran satuan batuan daerah penelitian digambarkan pada peta geologi dan penampang profil geologi daerah penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Peta Geologi dan Penampang Geologi Daerah Penelitian

4.1.1.3. Stratigrafi pada Trase Terowongan

Stratigrafi lokasi penelitian khususnya pada trase terowongan diperoleh berdasarkan pengamatan hasil pemboran inti pada titik BP-01, BP-02 dan BP-03. Kemudian dilakukan analisis dan korelasi terhadap titik-titik bor tersebut sehingga didapatkan profil geologi bawah permukaan khususnya pada trase terowongan, sebagaimana terlihat pada Gambar 4.14. Stratigrafi pada trase terowongan tersusun atas satuan batulempung dan satuan batupasir. Tanah residu terbentuk dari pelapukan sempurna batuan dengan ketebalan lapisan antara 2 – 6 meter menutupi permukaan batuan.



Gambar 4.14. Profil Geologi pada Trase Terowongan Pengelak

4.1.1.4. Struktur geologi

Analisis struktur geologi dilakukan sebagai analisa awal untuk menentukan ada tidaknya sesar di lapangan. Berdasarkan peta geologi regional Lembar Salatiga, Jawa (Sukardi dan Budhitrisna, 1992), juga berdasarkan hasil analisis data jalur sesar aktif Indonesia, pada lokasi penelitian menunjukkan tidak terdapat sesar, namun terdapat lipatan antiklin yang mempunyai sumbu berarah barat laut – tenggara. Hal ini terkonfirmasi dari hasil pengukuran *strike and dip* di lapangan yang menunjukkan lapisan batuan memiliki sudut kemiringan perlapisan (*dip*) yang terjal sampai tegak sekitar 70° - 90° , berlawanan arah ke barat daya dan timur laut. Selain itu juga batuan di area ini memiliki struktur geologi berupa kekar berpasangan/ kekar gerus, yang dapat dilihat pada Gambar 4.15. Kekar umumnya terdapat sebagai rekahan tensional berkaitan dengan sesar atau lipatan dan tidak ada gerak sejajar bidangnya. Kekar dapat memperbesar permeabilitas pada batuan, sehingga menjadi jalan fluida atau tempat pengendapan mineral.



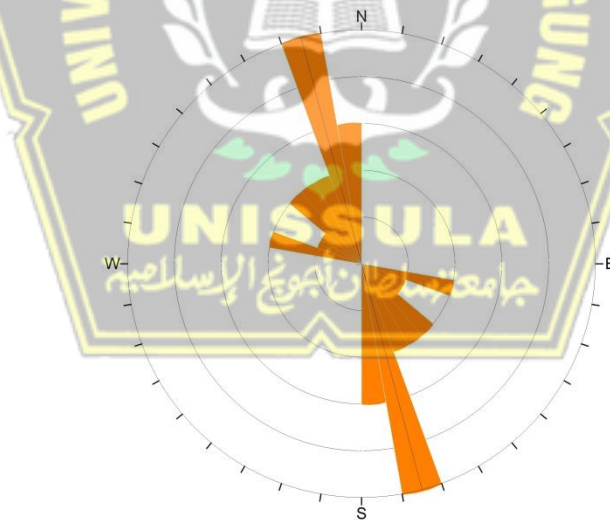
Gambar 4.15. Kedudukan kekar berpasangan pada batupasir di Sta. 0+940 ($N351^{\circ}E/85^{\circ}$ & $N68^{\circ}E/87^{\circ}$)

Pengukuran kekar di daerah penelitian dilakukan untuk interpretasi arah umum kedudukan batuan. Adapun data pengukuran kekar di lapangan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Hasil analisis kekar yang dianalisis dengan menggunakan *software* DIPS version 5.103 seperti pada Gambar 4.16. menunjukkan arah kedudukan batuan dominan berarah barat laut – tenggara, dengan kedudukan umum N345°E/82°.

Tabel 4.1. Kedudukan Kekar-kekar di Lokasi Penelitian

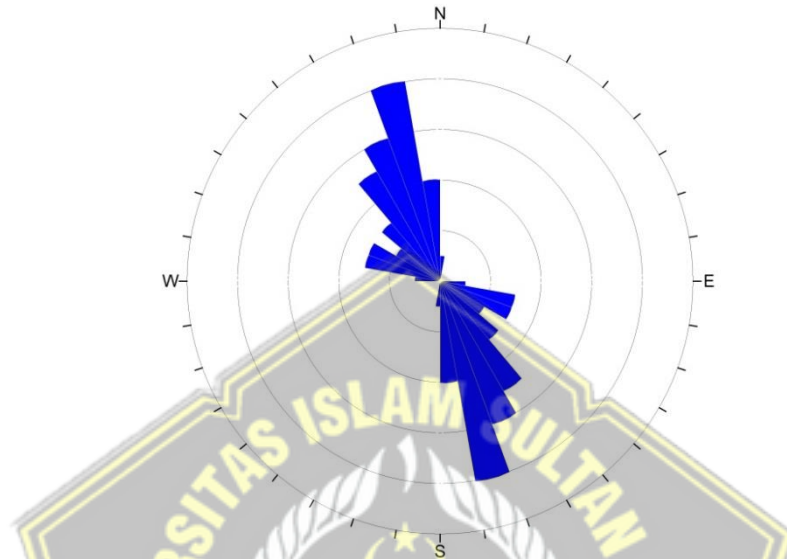
No	Strike (N...°E)	Dip (...°)	No	Strike (N...°E)	Dip (...°)
1	293	83	10	342	80
2	302	85	11	352	85
3	314	88	12	357	70
4	347	76	13	312	82
5	326	78	14	342	80
6	287	87	15	336	70
7	352	88	16	282	72
8	324	82	17	330	85
9	344	80	18	340	81



Gambar 4.16. Hasil Analisis Kekar dengan Kedudukan Umum N345°E/82°

Berdasarkan interpretasi arah kelurusan punggungan perbukitan, dapat disimpulkan bahwa kelurusan pada lokasi penelitian dipengaruhi oleh struktur geologi, dilihat dari garis-garis kelurusan yang panjang. Kemudian dilakukan analisis dengan menggunakan *software* DIPS version 5.103 kelurusan punggungan

daerah penelitian mempunyai arah umum barat laut – tenggara (N342°E) sesuai pada Gambar 4.17. Hal ini sesuai dengan hasil dari analisis data kekar dan sumbu lipatan antiklin yang menunjukkan kedudukan batuan hanya dipengaruhi oleh struktur lipatan dan tidak terpengaruh gaya lain seperti aktivitas vulkanik.



Gambar 4.17. Hasil Analisis Kelurusan Punggungan berarah Barat Laut – Tenggara (N342°E)

4.1.1.5. Analisis Air Tanah

Analisis air tanah pada penelitian ini dilakukan terbatas hanya sepanjang trase terowongan. Data air tanah diperoleh berdasarkan hasil pemboran dari BBWS Pemali Juana melalui PT. Brantas Abipraya, terdapat 3 titik pemboran dengan masing-masing elevasi muka air tanah secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 2, sehingga dapat diperoleh data air tanah sebagai berikut:

- BP-01 : +74,462 m (kedalaman 10,5 m dari permukaan)
- BP-02 : +126,334 m (kedalaman 17,0 m dari permukaan)
- BP-03 : +86,615 m (kedalaman 6,70 m dari permukaan)

Hasil analisis muka air tanah pada trase terowongan dapat dilihat pada Gambar 4.19. Data tersebut diperlukan sebagai penunjang dalam membuat pemodelan terowongan menggunakan perangkat lunak. Elevasi air tanah juga digunakan untuk membedakan kondisi material batuan jenuh dan tidak jenuh pada *input* parameternya.

4.1.1.6. Karakteristik Geologi Teknik

Pada penelitian ini analisis karakteristik geologi teknik dilakukan sepanjang trase terowongan. Dokumentasi sampel pemboran inti pada elevasi terowongan dapat dilihat pada Gambar 4.18. dan secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 2. Karakteristik geologi teknik diketahui dengan melakukan pengujian sifat indeks dan sifat mekanika tanah dan batuan. Resume hasil pengujian laboratorium batuan dan tanah pada titik pemboran di sepanjang trase terowongan dapat dilihat pada Tabel 4.2. dan secara detail dapat dilihat pada Lampiran 3 – 7. Kemudian dari hasil pengujian laboratorium tersebut dibuat ilustrasi karakteristik geologi teknik bawah permukaan sepanjang trase terowongan yang dapat dilihat pada Gambar 4.19.

Dari hasil analisis didapatkan bahwa trase terowongan tersusun atas dua satuan geologi teknik tingkat pelapukan batuan yang terdiri dari batulempung sisipan batupasir lapuk sedang – sedikit lapuk (CL-CM), serta batupasir perselingan batulempung dan batulanau sedikit lapuk – batuan segar (CM). Berikut merupakan deskripsi dari masing-masing satuan geologi teknik tingkat pelapukan :

a) Batulempung sisipan batupasir lapuk sedang – sedikit lapuk (CL-CM)

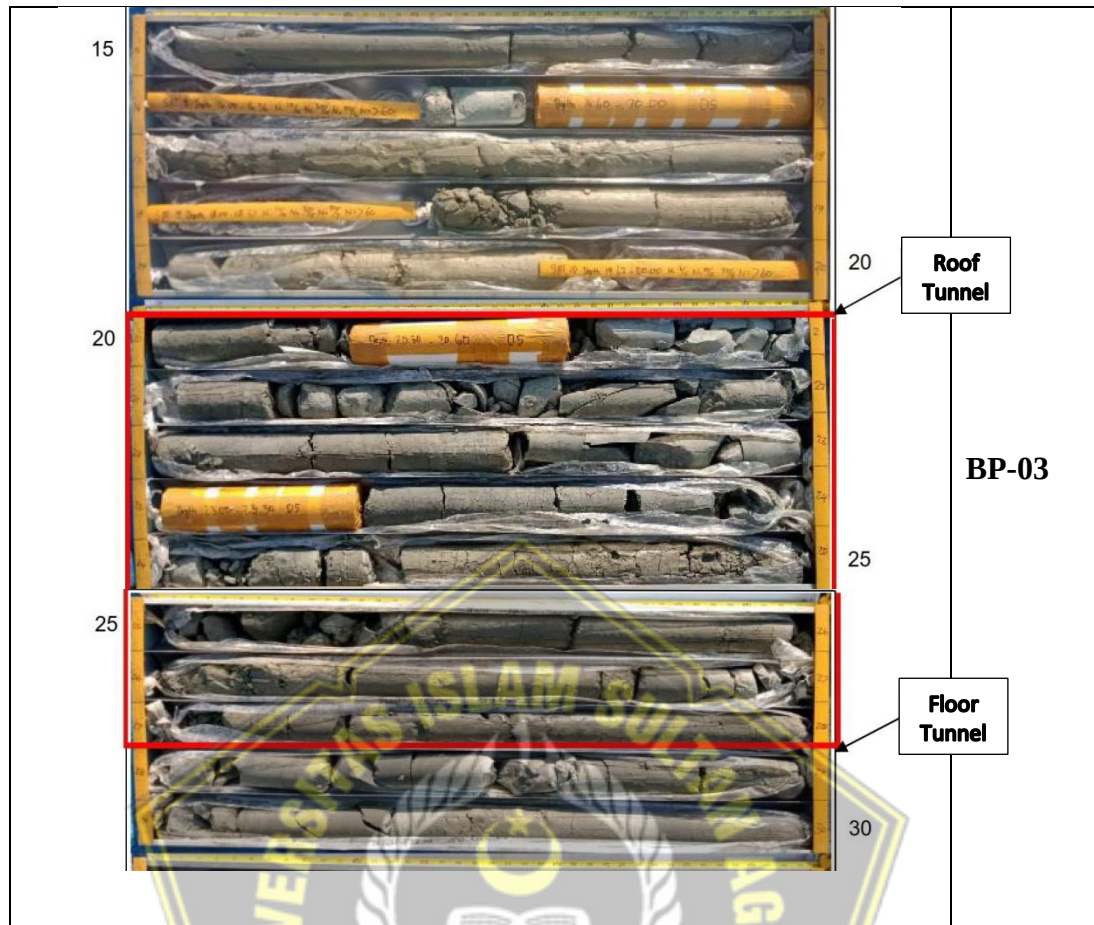
Berwarna abu-abu – kecoklatan, lapuk di bidang kontak lapisan dengan tingkat sementasi sedang ini terdiri dari bagian sedikit lapuk sampai relatif lapuk. Kekar spasi : 30 – 80 cm, tertutup hingga terbuka 1 – 5 mm, sebagian terisi lempung dan mineral kalsit. Memiliki kekerasan sedang - agak lunak, N-SPT >50, sudut geser (ϕ) 24,72°, kohesi (c) = 0,16 kg/cm², *specific gravity* (sg) = 2,668 kg/cm³, kapasitas/ daya dukung batas (q_u) = 23,67 kg/cm², kuat tekan 0,429 – 0,653 kg/cm², porositas kedap – semi kedap dengan permeabilitas (k) = 5,72x10⁻⁰⁶ - 7,90x10⁻⁰⁴ cm/det (Lu=0,44 – 60,78), berat jenis 1,96 gr/cm³, dan *water content* 31,31 %.

b) Batupasir perselingan batulempung dan batulanau sedikit lapuk – batuan segar (CM)

Berwarna abu-abu – kecoklatan muda, lapuk di bidang kontak lapisan, dengan tingkat sementasi tinggi ini terdiri dari bagian sedikit lapuk sampai relatif segar. Kekar spasi : 20 – 60 cm, tertutup hingga terbuka 1 – 3 mm, sebagian terisi

lempung dan mineral kalsit. Memiliki kekerasan yang seragam keras, N-SPT >50, sudut geser (ϕ) 25,99°, kohesi (c) = 1,24 kg/cm², *specific gravity* (sg) = 2,664 kg/cm³, kapasitas/ daya dukung batas (q_u) = 33,45 kg/cm², kuat tekan 0,429 – 0,653 kg/cm², porositas kedap dengan permeabilitas (k) = $2,47 \times 10^{-06}$ - $1,34 \times 10^{-04}$ cm/det ($Lu=0,19$ – 10,28), berat jenis 2,15 gr/cm³, dan *water content* 38,73 %.

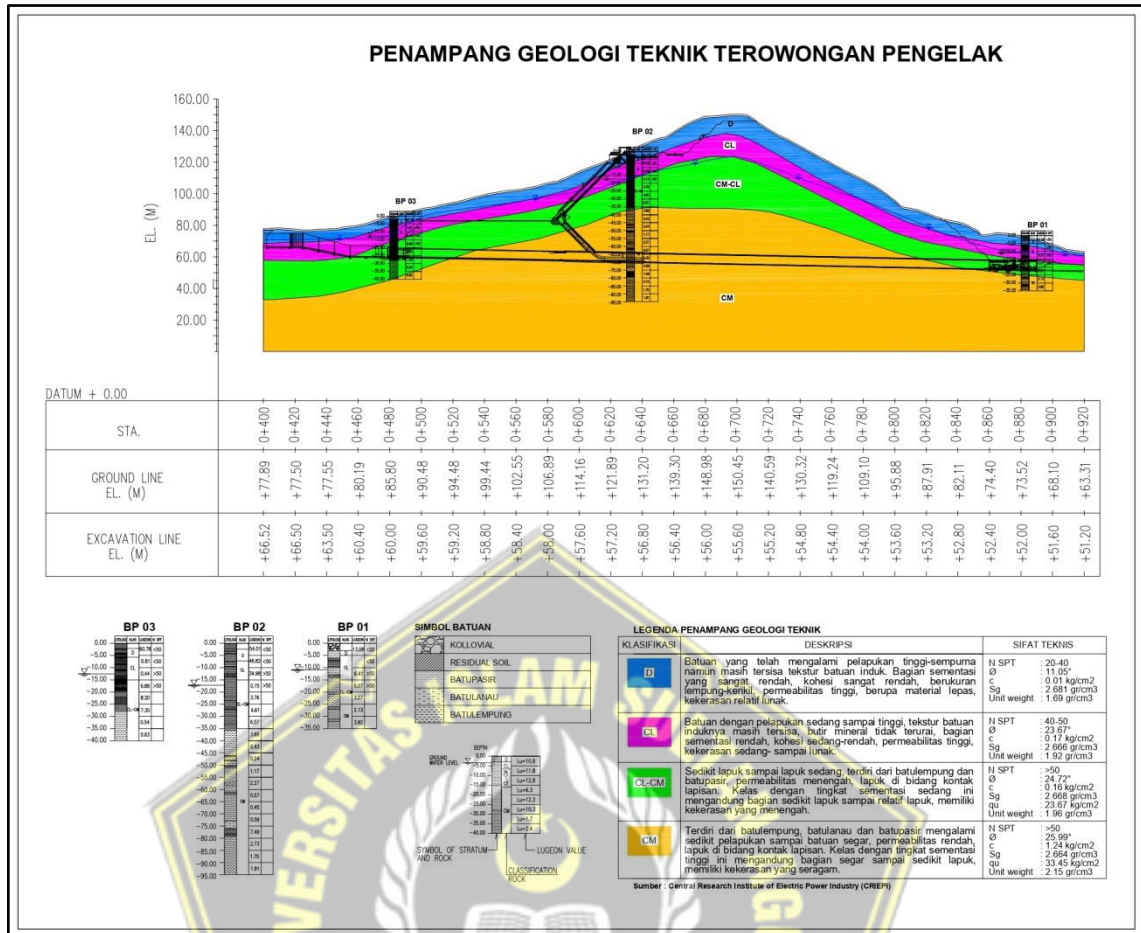
15 Roof Tunnel 20		20 Floor Tunnel 25	BP-01
60 Roof Tunnel 65 70		65 Floor Tunnel 70 75	BP-02



Gambar 4.18. Foto Sampel Pemboran Inti pada Trase Terowongan

Tabel 4.2. Resume Hasil Pengujian Sifat Index dan Mekanik Batuan

No	Hole ID	STA	Kedalaman	Uji Laboratorium									Keterangan
				Direct Shear				Triaxial Test (Unconsolidated Undrained)		Triaxial Test (Unconfined Compression Test)			
				Water Content (%)	Specific Gravity (g/cm ³)	c (kg/cm ²)	φ (°)	c (kg/cm ²)	φ (°)	c (kg/cm ²)	q _u (kg/cm ²)	σ _c (kg/cm ²)	
1	BP 01	0+880	21.00 – 23.00	31.81	2.5755	-	-	0.310	5.029	0.327	0.653	-	Batulempung
2			32.20 – 33.70	24.59	2.5884	-	-	0.730	25.174	0.214	0.429	-	Batulempung
3	BP 02	0+630	1.00 – 1.50	34.62	2.6212	-	-	-	-	-	-	-	Residual
4			3.00 – 3.50	30.91	2.6819	0.063	30.340	0.010	11.052	-	0.435	-	Residual
5			51.44 – 51.92	46.67	2.6325	4.347	16.951	-	-	-	-	23.964	Batulempung
6			56.36 – 56.82	32.45	2.6418	6.248	19.377	-	-	-	-	48.271	Batulempung
7			62.00 – 62.50	47.74	2.6149	3.136	15.238	-	-	-	-	23.672	Batupasir
8			65.00 – 65.50	49.12	2.6259	1.245	25.994	-	-	-	-	33.451	Batulempung
9	BP 03	0+480	12.45 – 12.85	30.93	2.666	0.17	23.67	-	-	-	-	-	Batulempung
10			16.60 – 17.00	28.77	2.668	0.16	24.72	-	-	-	-	-	Batulanau
11			20.30 – 20.60	-	2.6601	1.087	35.867	-	-	-	-	1.550	Batupasir
12			23.00 – 23.30	-	2.6641	1.879	37.611	-	-	-	-	3.413	Batulempung



Gambar 4.19. Penampang Geologi Teknik pada Trase Terowongan Pengelak

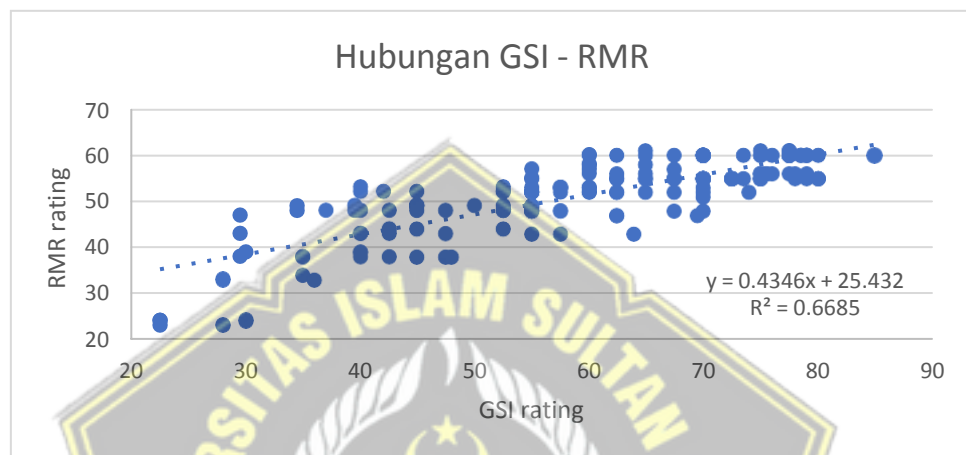
4.1.1.7. Analisis Kualitas Massa Batuan

Pada sub bab ini dilakukan analisis terhadap kualitas massa batuan permukaan dengan menggunakan metode *Geological Strength Index (GSI)*. Penentuan GSI permukaan dilakukan secara langsung di lapangan sebagaimana dijelaskan pada sub bab 3.3.2.1. Penilaian dilakukan pada titik-titik pengamatan dengan menggunakan bagan GSI pada Gambar 2.18. sehingga menghasilkan peta GSI permukaan seperti pada Gambar 4.21.

Penentuan kualitas massa batuan bawah permukaan dilakukan pada trase terowongan dengan menggunakan metode *Geological Strength Index (GSI)* dan *Rock Mass Rating (RMR)*. Data yang digunakan dalam analisis terdiri dari data hasil pengamatan pada bor log dan hasil uji laboratorium pada sampel bor log di sepanjang trase terowongan. Penentuan kualitas massa batuan dilakukan dengan penentuan nilai *Rock Quality Designation (RQD)*, penentuan nilai GSI bawah

permukaan untuk batuan dengan *infilling* dan tanpa *infilling*, serta penentuan nilai RMR tiap 1 m kedalaman bor yang dapat dilihat pada Lampiran 1. Selanjutnya dilakukan Analisa hubungan GSI dan RMR terhadap data-data tersebut dan menghasilkan grafik hubungan antara GSI dan RMR pada Gambar 4.20., serta persamaan hubungan antara GSI dan RMR sebagaimana persamaan berikut :

$$\text{RMR} = 0,4346 \text{ GSI} + 25,432 \quad (\text{IV.1})$$

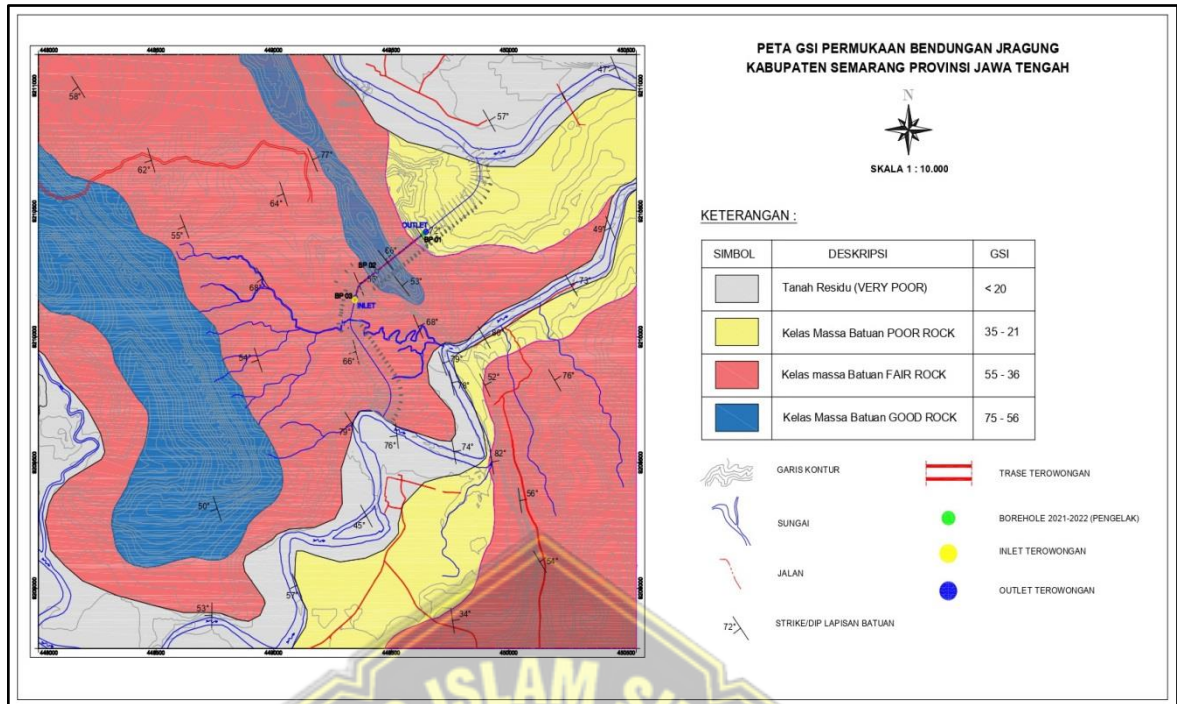


Gambar 4.20. Analisis Hubungan GSI dan RMR

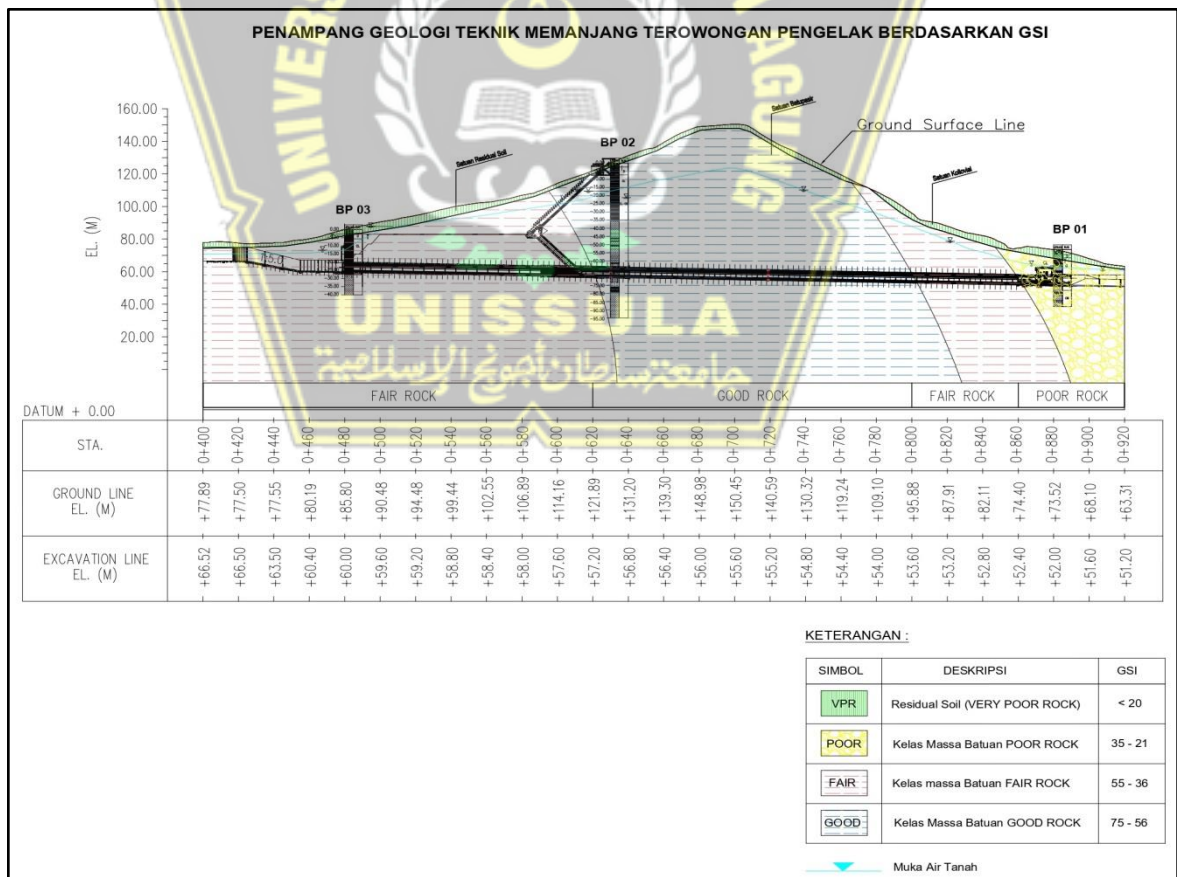
Dapat dilihat pada Gambar 4.20. bahwa nilai R^2 dari persamaan linier menunjukkan nilai 0,6685, yang artinya persamaan korelasi tersebut dapat dikatakan cukup baik untuk digunakan. Semakin mendekati angka 1 maka persamaan korelasi semakin baik, sedangkan jika mendekati angka 0 semakin tidak memiliki korelasi.

Analisis kualitas massa batuan bawah permukaan menunjukkan hasil yang bervariasi, dengan nilai GSI 12 - 93,5 dan nilai RMR 12 - 65. Hasil investigasi lengkap dari penentuan nilai GSI dan RMR dapat dilihat pada Lampiran-1. Penampang memanjang dari analisis kualitas massa batuan berdasarkan metode GSI dan RMR dapat dilihat pada Gambar 4.22. dan Gambar 4.23.

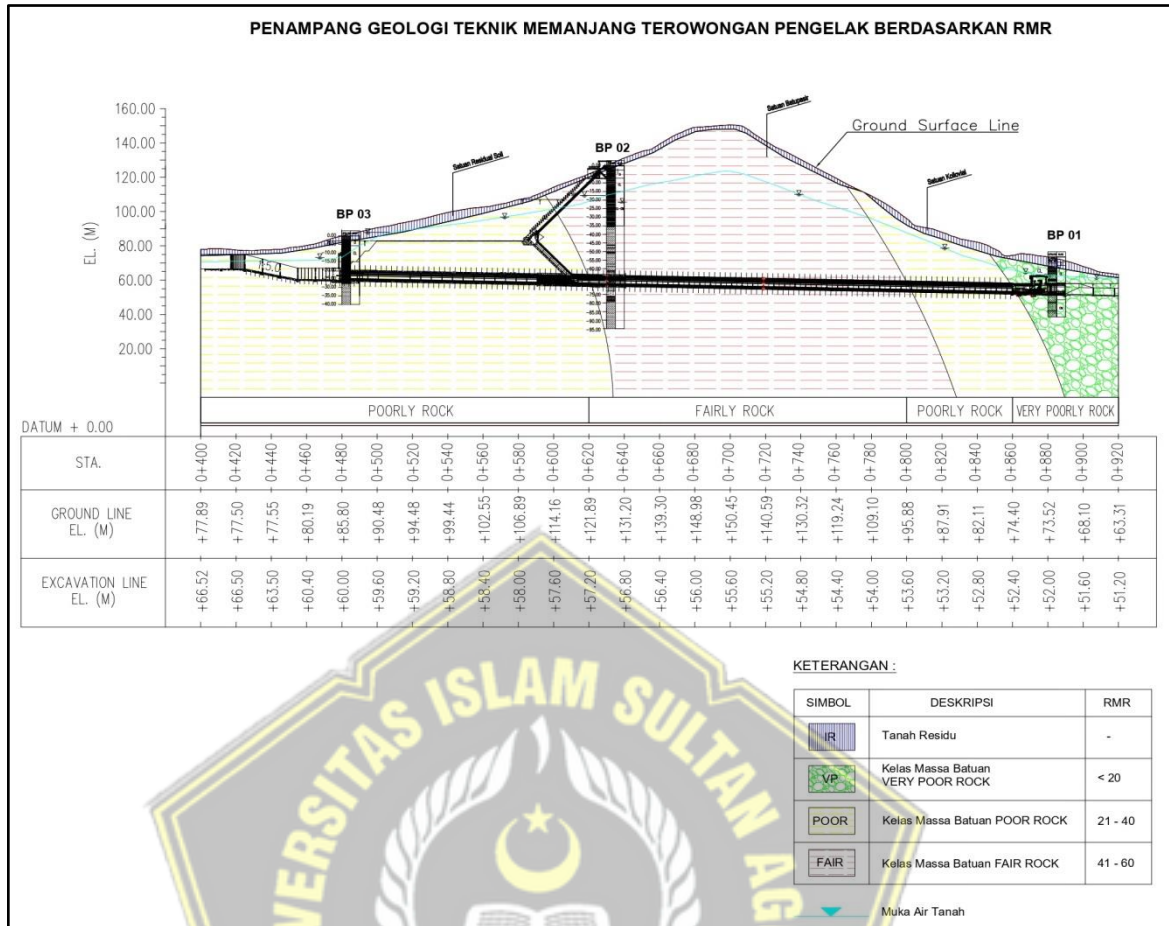
Nilai GSI tidak dapat digunakan langsung untuk menentukan kelas massa batuan, sehingga dilakukan korelasi antara GSI – RMR untuk mendapatkan persamaan yang akan digunakan dalam penentuan kelas massa batuan. Hasil analisis kualitas massa batuan nantinya akan dijadikan acuan dalam analisis kestabilan lereng portal, metode penggalian, maupun sistem penyangga terowongan.



Gambar 4.21. Peta GSI Permukaan Daerah Penelitian



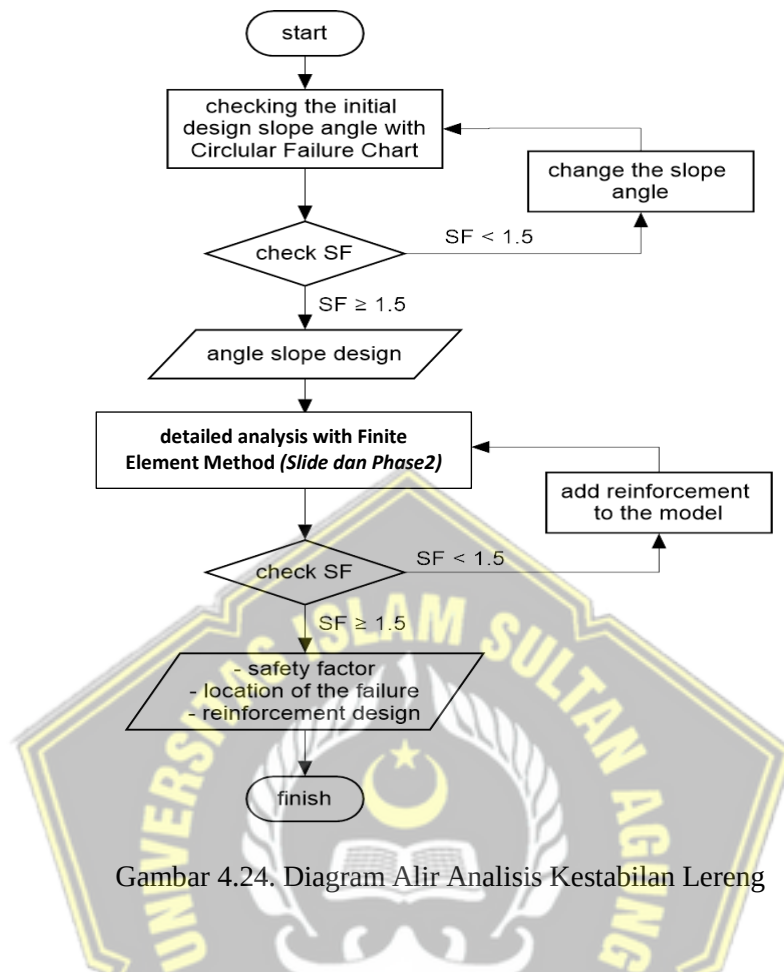
Gambar 4.22. Kualitas Massa Batuan Trase Terowongan Berdasarkan Analisis GSI



Gambar 4.23. Kualitas Massa Batuan Trase Terowongan Berdasarkan Analisis RMR

4.1.2. Analisis Kestabilan Lereng Portal Terowongan

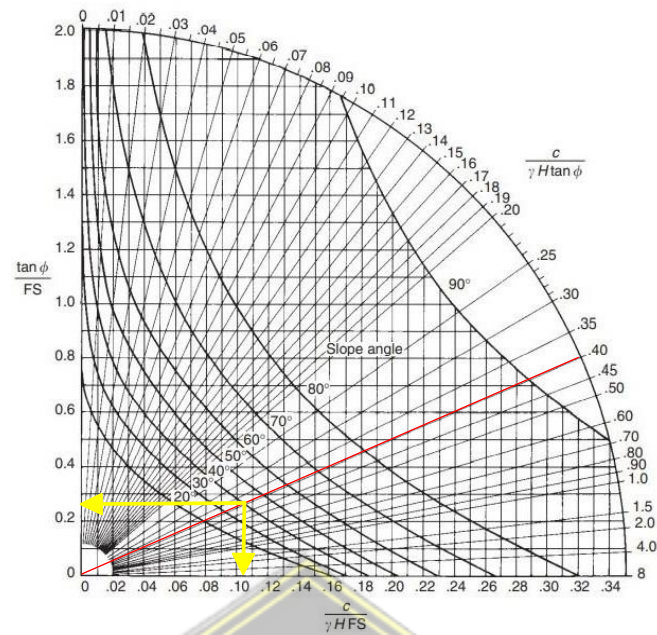
Analisis kestabilan lereng dilakukan pada bagian portal *inlet* dan *outlet* terowongan. Dalam analisis ini dilakukan pengecekan terhadap desain awal perencanaan dengan melakukan penentuan sudut kemiringan lereng menggunakan *Circular Failure Chart (CFC)* (Wyllie and Mah, 2004). Kemudian sudut kemiringan lereng yang diperoleh akan digunakan untuk membuat model geometri pada metode *finite element* menggunakan perangkat lunak *Slide* dan *Phase2*, dengan batasan faktor keamanan/ *safety factor (SF)* tanpa beban gempa yang diizinkan yaitu lebih besar dari 1,5 ($SF > 1,5$) dan jika dengan beban gempa lebih besar dari 1,1 ($SF > 1,1$) (SNI 8460-2017). Pada metode *finite element* juga dapat diperoleh lokasi dari bidang gelincir, sehingga dapat memberikan gambaran metode penanganan yang sesuai. Secara garis besar tahapan analisis kestabilan lereng pada studi ini digambarkan pada diagram alir sesuai pada Gambar 4.24.



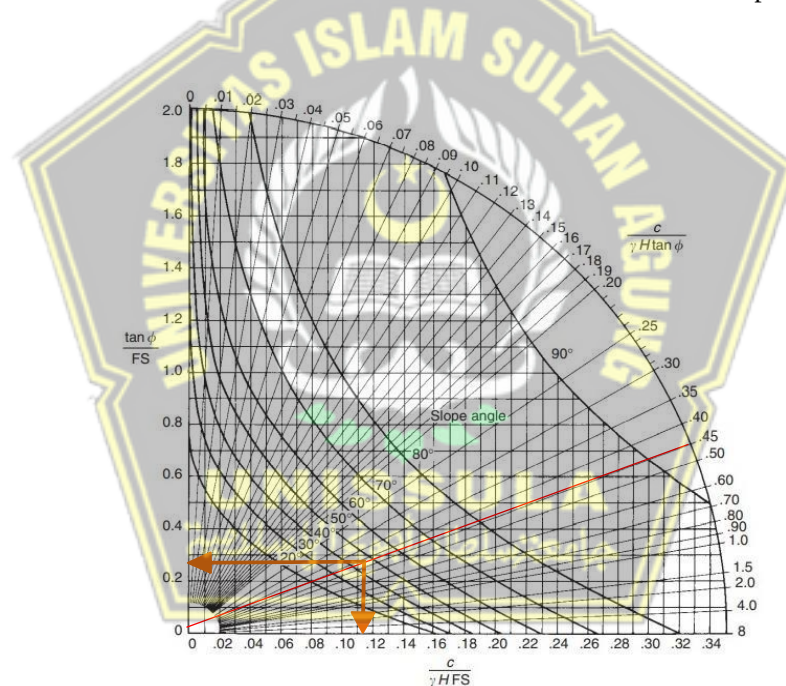
Gambar 4.24. Diagram Alir Analisis Kestabilan Lereng

4.1.2.1. Circular Failure Chart (CFC)

Berdasarkan desain awal perencanaan yang didapatkan dari dokumen perencanaan oleh BBWS Pemali Juana, sudut kemiringan lereng pada kedua portal terowongan adalah 60°. Namun setelah dilakukan analisis menggunakan *Circular Failure Chart*, ternyata diperoleh nilai *safety factor* < 1.5, sehingga diperlukan perubahan sudut kemiringan lereng agar didapatkan angka keamanan sesuai dengan ketentuan. Menurut Hoek and Bray chart no. 3 (2010) seperti pada Gambar 4.25. dan Gambar 4.26. berikut ini merupakan hasil perhitungan menggunakan CFC sehingga diperoleh sudut kemiringan dan *safety factor* sesuai pada Tabel 4.3.



Gambar 4.25. *Circular Failure Chart* untuk Analisis Stabilitas pada *Inlet*



Gambar 4.26. *Circular Failure Chart* untuk Analisis Stabilitas pada *Outlet*

Tabel 4.3. Hasil Analisis Menggunakan *Circular Failure Chart*

Lokasi	Sudut Kemiringan Lereng (°)	<i>Factor of Safety</i>
<i>Inlet</i> terowongan	40	1.56
<i>Outlet</i> terowongan	45	1.58

4.1.2.2. Finite Element Method (FEM)

Hal yang perlu diperhatikan dalam simulasi metode numeris adalah parameter atau *properties* dari material-material yang digunakan. Kriteria keruntuhan yang digunakan pada analisis FEM ini adalah kriteria keruntuhan Hoek-Brown untuk material batuan, dan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb untuk material tanah. Dengan asumsi metode penggalian dilakukan secara manual, sehingga nilai faktor gangguan 'D' adalah 0. Tabel 4.4. berikut ini merupakan *properties* material tanah dan batuan yang diinput pada perangkat lunak *Slide* dan *Phase2* serta Tabel 4.5. untuk *properties* baut batuan (*rock bolt*).

Tabel 4.4. *Properties* Material Tanah dan Batuan pada FEM

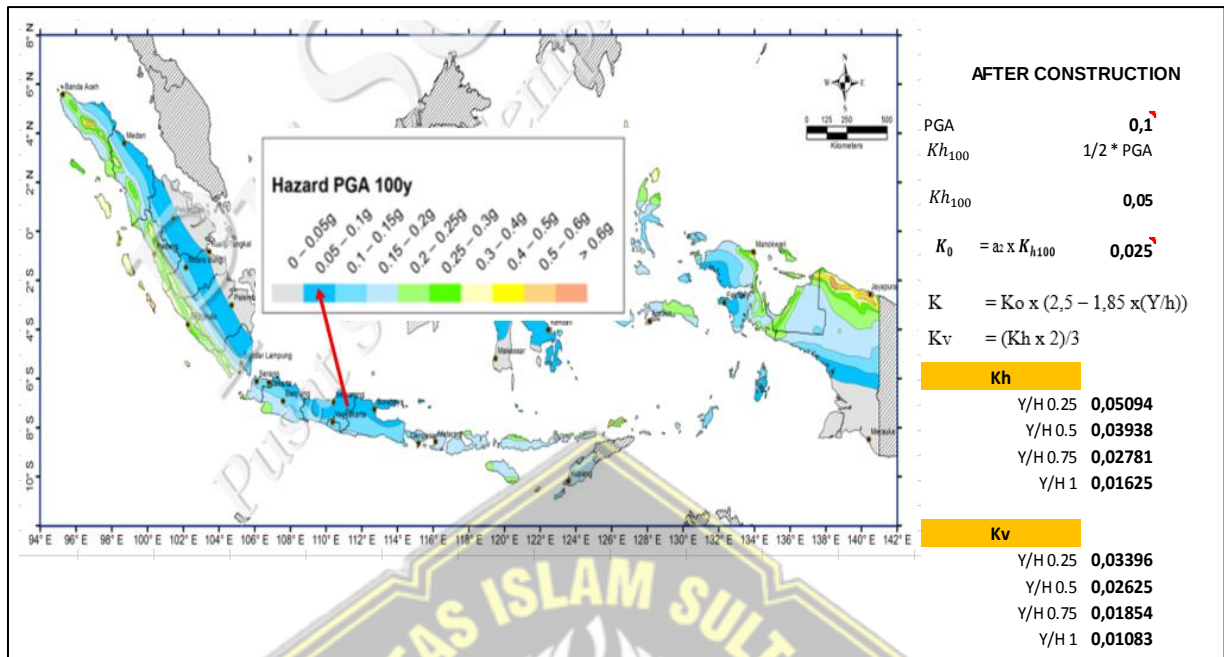
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Young's Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Failure Criterion	Friction Angle (peak) (deg)	Cohesion (peak) (kPa)	Intact Compressive Strength (kPa)	mb (peak)	s (peak)	a (peak)
Klasifikasi Batuan D		16.57	50000	0.4	Mohr Coulomb	30.34	6				
Klasifikasi Batuan CL		19.2	1.35257e+006	0.4	Generalized Hoek-Brown			770	0.292313	0.00626696	0.501975
Klasifikasi Batuan CL-CM		19.6	4.166e+006	0.25	Generalized Hoek-Brown			2310	0.506374	0.0266974	0.500911
Klasifikasi Batuan CM		21.5	1.18792e+007	0.25	Generalized Hoek-Brown			3340	1.15453	0.23474	0.500201

Tabel 4.5. *Properties* Baut Batuan (*Rock Bolt*) pada FEM

Support Name	Color	Type	Force Application	Out-Of-Plane Spacing	Tensile Capacity	Plate Capacity	Percent of Length	Bond Strength
Support 1		Grouted Tieback	Passive (Method B)	1.5	100	100	100	29.4

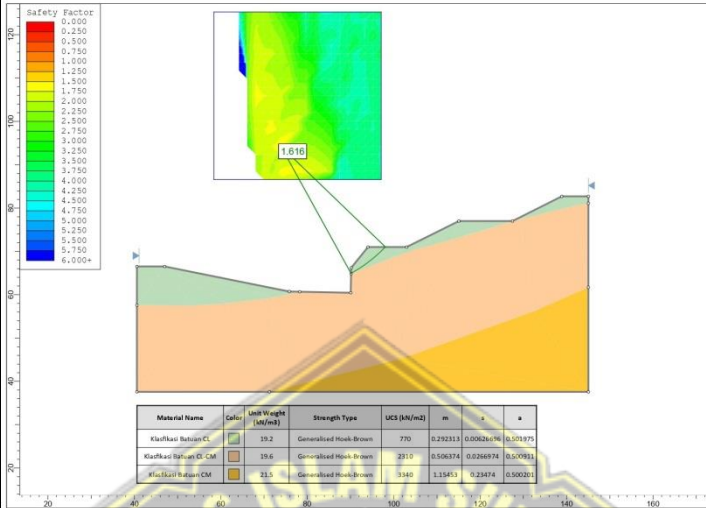
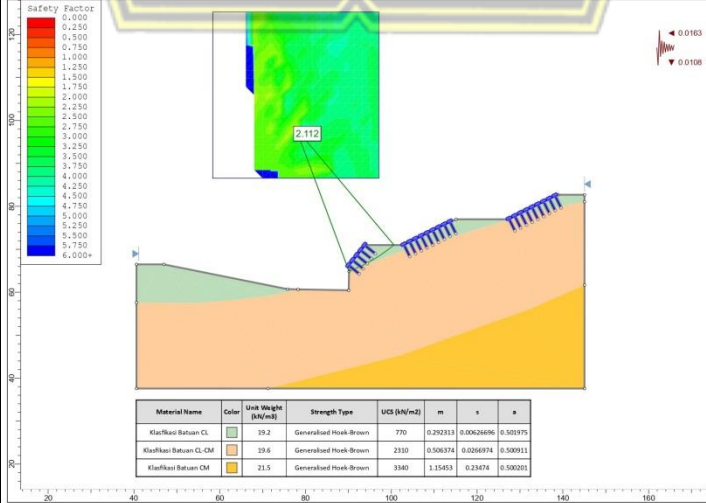
Pengaruh kegempaan pada lereng portal mengacu pada Gempa Dasar Operasi (OBE = *Operating Basis Earthquake*), adalah batasan getaran gempa pada daerah penelitian dengan 50% kemungkinan gempa tidak terlampaui dalam 100 tahun. Untuk menentukan koefisien kegempaan OBE pada lereng portal terowongan pengelak bendungan Jragung dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Koefisien Kegempaan OBE Lereng Portal Terowongan pada FEM

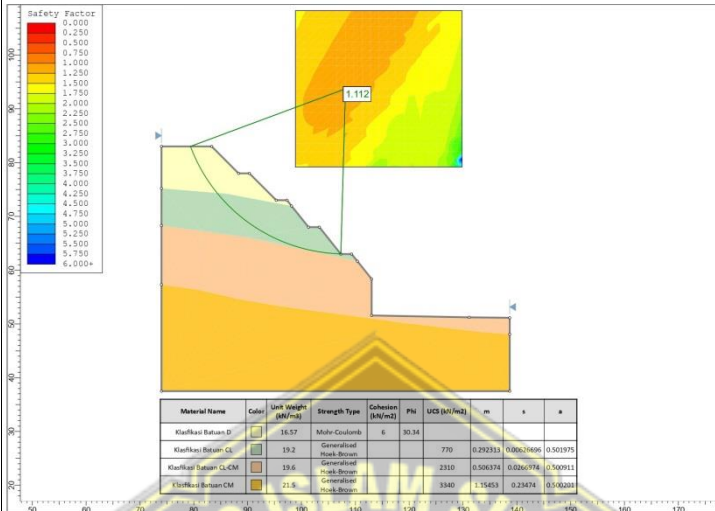
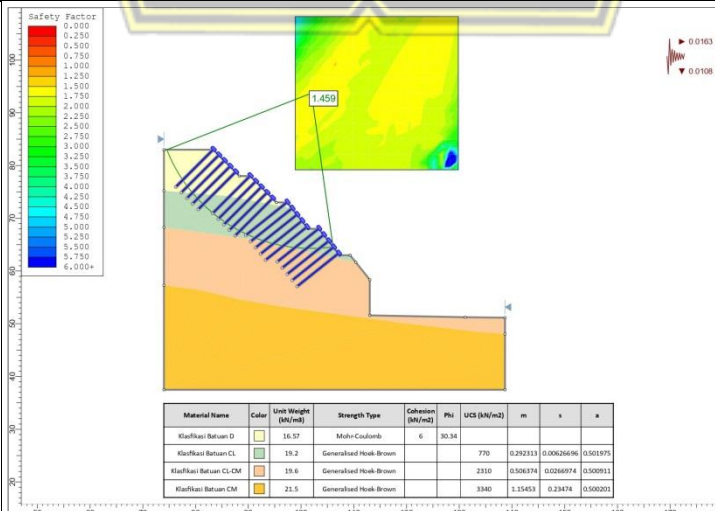


Nilai *safety factor* dari analisis FEM dengan menggunakan sudut yang didapat dari analisis CFC ternyata sudah cukup ($SF > 1,5$), sehingga didapatkan hasil yang lebih optimal. Pada bagian *outlet* portal dicoba diberikan perbaikan lereng terasering yang memberikan kenaikan secara signifikan pada nilai *safety factor*. Hasil akhir dari analisis FEM untuk kestabilan lereng dapat dilihat pada Tabel 4.7. untuk inlet dan Tabel 4.8. untuk outlet. Untuk menunjukkan bentuk keruntuhan lereng yang mungkin terjadi dengan analisa FEM dan *total displacement maksimum* digunakan perangkat lunak *Phase2* yang di *convert* dari *Slide*, dapat dilihat pada Tabel 4.9. untuk inlet dan Tabel 4.10. untuk outlet.

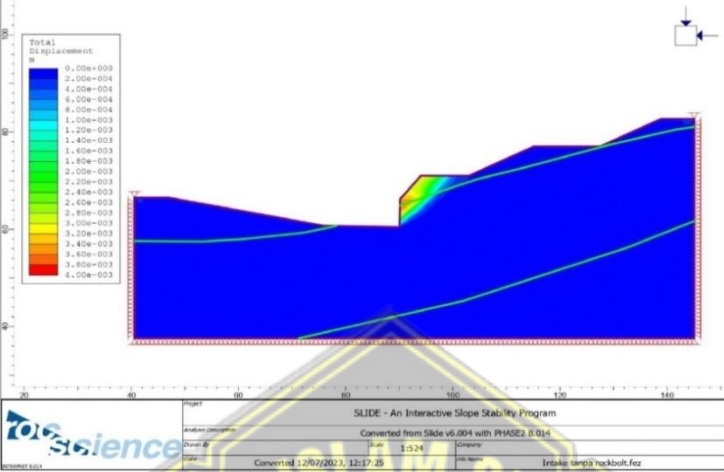
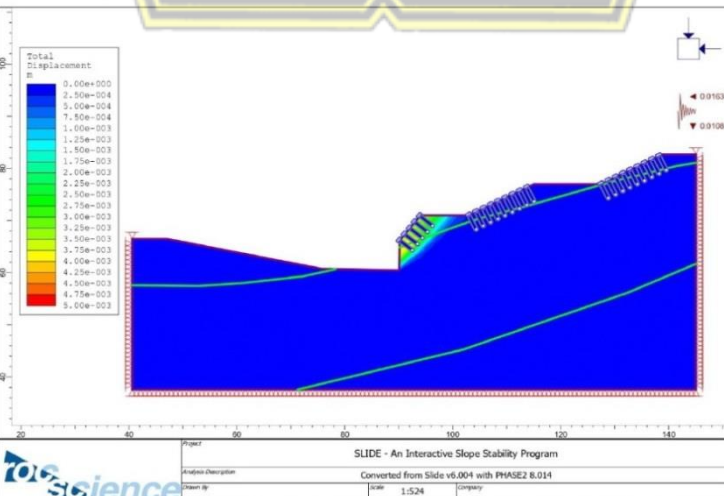
Tabel 4.7. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Portal Inlet dengan FEM

Tahapan Konstruksi	Grafik	Keterangan																																
INLET																																		
- Galian lereng portal	 <table border="1" data-bbox="568 826 973 911"><thead><tr><th>Material Name</th><th>Color</th><th>Unit Weight (kN/m³)</th><th>Strength Type</th><th>UCS (kN/m²)</th><th>m</th><th>s</th><th>φ</th></tr></thead><tbody><tr><td>Klasifikasi Batuan CL</td><td></td><td>19.2</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>770</td><td>0.292313</td><td>0.00626696</td><td>0.501975</td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL CM</td><td></td><td>19.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>2310</td><td>0.506374</td><td>0.0266974</td><td>0.500911</td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CM</td><td></td><td>21.5</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>3340</td><td>1.15453</td><td>0.23474</td><td>0.500201</td></tr></tbody></table>	Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	UCS (kN/m ²)	m	s	φ	Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown	770	0.292313	0.00626696	0.501975	Klasifikasi Batuan CL CM		19.6	Generalized Hoek-Brown	2310	0.506374	0.0266974	0.500911	Klasifikasi Batuan CM		21.5	Generalized Hoek-Brown	3340	1.15453	0.23474	0.500201	- Factor of safety : 1,616
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	UCS (kN/m ²)	m	s	φ																											
Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown	770	0.292313	0.00626696	0.501975																											
Klasifikasi Batuan CL CM		19.6	Generalized Hoek-Brown	2310	0.506374	0.0266974	0.500911																											
Klasifikasi Batuan CM		21.5	Generalized Hoek-Brown	3340	1.15453	0.23474	0.500201																											
- Galian lereng portal + rock bolts + shotcrete	 <table border="1" data-bbox="568 1341 973 1426"><thead><tr><th>Material Name</th><th>Color</th><th>Unit Weight (kN/m³)</th><th>Strength Type</th><th>UCS (kN/m²)</th><th>m</th><th>s</th><th>φ</th></tr></thead><tbody><tr><td>Klasifikasi Batuan CL</td><td></td><td>19.2</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>770</td><td>0.292313</td><td>0.00626696</td><td>0.501975</td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL CM</td><td></td><td>19.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>2310</td><td>0.506374</td><td>0.0266974</td><td>0.500911</td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CM</td><td></td><td>21.5</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>3340</td><td>1.15453</td><td>0.23474</td><td>0.500201</td></tr></tbody></table>	Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	UCS (kN/m ²)	m	s	φ	Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown	770	0.292313	0.00626696	0.501975	Klasifikasi Batuan CL CM		19.6	Generalized Hoek-Brown	2310	0.506374	0.0266974	0.500911	Klasifikasi Batuan CM		21.5	Generalized Hoek-Brown	3340	1.15453	0.23474	0.500201	- Factor of safety : 2,206 - Rock bolt: diameter 25mm, panjang 3m, spasi 1,5m. - Shotcrete: tebal 10 cm, K225.
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	UCS (kN/m ²)	m	s	φ																											
Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown	770	0.292313	0.00626696	0.501975																											
Klasifikasi Batuan CL CM		19.6	Generalized Hoek-Brown	2310	0.506374	0.0266974	0.500911																											
Klasifikasi Batuan CM		21.5	Generalized Hoek-Brown	3340	1.15453	0.23474	0.500201																											
- Galian lereng portal + rock bolts + shotcrete + beban gempa	 <table border="1" data-bbox="568 1848 973 1933"><thead><tr><th>Material Name</th><th>Color</th><th>Unit Weight (kN/m³)</th><th>Strength Type</th><th>UCS (kN/m²)</th><th>m</th><th>s</th><th>φ</th></tr></thead><tbody><tr><td>Klasifikasi Batuan CL</td><td></td><td>19.2</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>770</td><td>0.292313</td><td>0.00626696</td><td>0.501975</td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL CM</td><td></td><td>19.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>2310</td><td>0.506374</td><td>0.0266974</td><td>0.500911</td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CM</td><td></td><td>21.5</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td>3340</td><td>1.15453</td><td>0.23474</td><td>0.500201</td></tr></tbody></table>	Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	UCS (kN/m ²)	m	s	φ	Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown	770	0.292313	0.00626696	0.501975	Klasifikasi Batuan CL CM		19.6	Generalized Hoek-Brown	2310	0.506374	0.0266974	0.500911	Klasifikasi Batuan CM		21.5	Generalized Hoek-Brown	3340	1.15453	0.23474	0.500201	- Factor of safety : 2,112 - Rock bolt: diameter 25mm, panjang 3m, spasi 1,5m. - Shotcrete: tebal 10 cm, K225. - Beban gempa: kh=0,0163; kv=0,0108
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	UCS (kN/m ²)	m	s	φ																											
Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown	770	0.292313	0.00626696	0.501975																											
Klasifikasi Batuan CL CM		19.6	Generalized Hoek-Brown	2310	0.506374	0.0266974	0.500911																											
Klasifikasi Batuan CM		21.5	Generalized Hoek-Brown	3340	1.15453	0.23474	0.500201																											

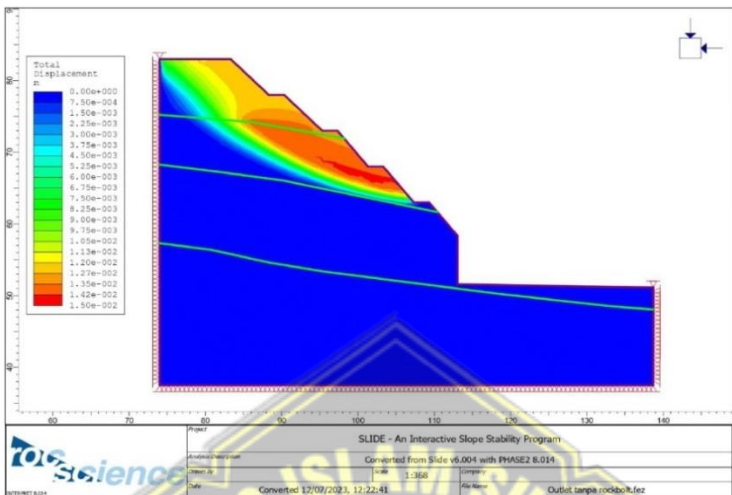
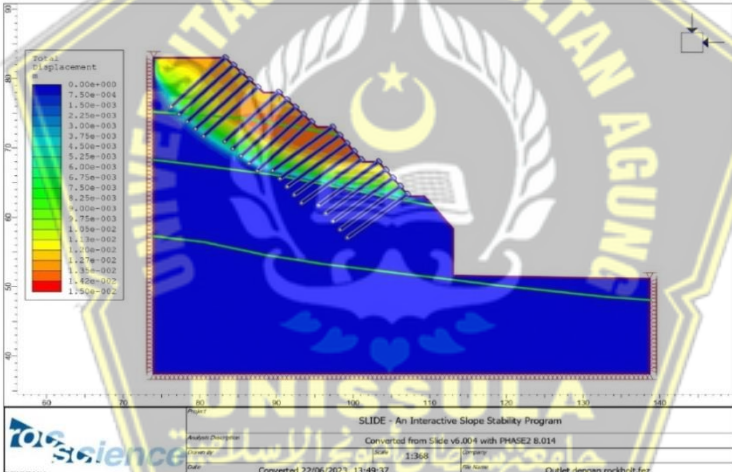
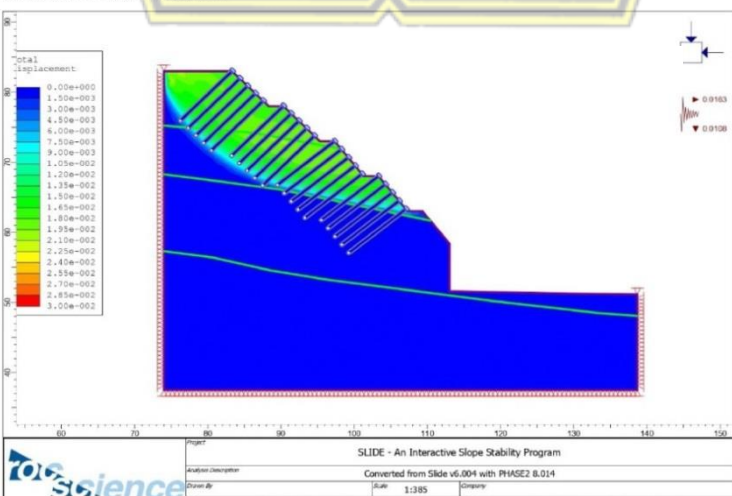
Tabel 4.8. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Portal Outlet dengan FEM

Tahapan Konstruksi	Grafik	Keterangan																																																		
OUTLET																																																				
- Galian lereng portal	 <table><tr><th>Material Name</th><th>Color</th><th>Unit Weight (kN/m³)</th><th>Strength Type</th><th>Cohesion (kN/m²)</th><th>Phi</th><th>UCS (kN/m²)</th><th>m</th><th>s</th><th>n</th></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan D</td><td></td><td>16.57</td><td>Mohr-Coulomb</td><td>6</td><td>30.34</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL</td><td></td><td>19.2</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>770</td><td>0.292313</td><td>0.00626636</td><td>0.501975</td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL-CM</td><td></td><td>19.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>2310</td><td>0.506374</td><td>0.02661974</td><td>0.500911</td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CM</td><td></td><td>21.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>3340</td><td>1.15453</td><td>0.23474</td><td>0.500203</td><td></td></tr></table>	Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	n	Klasifikasi Batuan D		16.57	Mohr-Coulomb	6	30.34					Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown		770	0.292313	0.00626636	0.501975		Klasifikasi Batuan CL-CM		19.6	Generalized Hoek-Brown		2310	0.506374	0.02661974	0.500911		Klasifikasi Batuan CM		21.6	Generalized Hoek-Brown		3340	1.15453	0.23474	0.500203		- Factor of safety : 1,112
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	n																																											
Klasifikasi Batuan D		16.57	Mohr-Coulomb	6	30.34																																															
Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown		770	0.292313	0.00626636	0.501975																																												
Klasifikasi Batuan CL-CM		19.6	Generalized Hoek-Brown		2310	0.506374	0.02661974	0.500911																																												
Klasifikasi Batuan CM		21.6	Generalized Hoek-Brown		3340	1.15453	0.23474	0.500203																																												
- Galian lereng portal + rock bolts + shotcrete	 <table><tr><th>Material Name</th><th>Color</th><th>Unit Weight (kN/m³)</th><th>Strength Type</th><th>Cohesion (kN/m²)</th><th>Phi</th><th>UCS (kN/m²)</th><th>m</th><th>s</th><th>n</th></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan D</td><td></td><td>16.57</td><td>Mohr-Coulomb</td><td>6</td><td>30.34</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL</td><td></td><td>19.2</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>770</td><td>0.292313</td><td>0.00626636</td><td>0.501975</td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL-CM</td><td></td><td>19.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>2310</td><td>0.506374</td><td>0.02661974</td><td>0.500911</td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CM</td><td></td><td>21.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>3340</td><td>1.15453</td><td>0.23474</td><td>0.500203</td><td></td></tr></table>	Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	n	Klasifikasi Batuan D		16.57	Mohr-Coulomb	6	30.34					Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown		770	0.292313	0.00626636	0.501975		Klasifikasi Batuan CL-CM		19.6	Generalized Hoek-Brown		2310	0.506374	0.02661974	0.500911		Klasifikasi Batuan CM		21.6	Generalized Hoek-Brown		3340	1.15453	0.23474	0.500203		- Factor of safety : 1,523 - Rock bolt: diameter 25mm, panjang 10m, spasi 1,5m. - Shotcrete: tebal 10 cm, K225.
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	n																																											
Klasifikasi Batuan D		16.57	Mohr-Coulomb	6	30.34																																															
Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown		770	0.292313	0.00626636	0.501975																																												
Klasifikasi Batuan CL-CM		19.6	Generalized Hoek-Brown		2310	0.506374	0.02661974	0.500911																																												
Klasifikasi Batuan CM		21.6	Generalized Hoek-Brown		3340	1.15453	0.23474	0.500203																																												
- Galian lereng portal + rock bolts + shotcrete + beban gempa	 <table><tr><th>Material Name</th><th>Color</th><th>Unit Weight (kN/m³)</th><th>Strength Type</th><th>Cohesion (kN/m²)</th><th>Phi</th><th>UCS (kN/m²)</th><th>m</th><th>s</th><th>n</th></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan D</td><td></td><td>16.57</td><td>Mohr-Coulomb</td><td>6</td><td>30.34</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL</td><td></td><td>19.2</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>770</td><td>0.292313</td><td>0.00626636</td><td>0.501975</td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CL-CM</td><td></td><td>19.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>2310</td><td>0.506374</td><td>0.02661974</td><td>0.500911</td><td></td></tr><tr><td>Klasifikasi Batuan CM</td><td></td><td>21.6</td><td>Generalized Hoek-Brown</td><td></td><td>3340</td><td>1.15453</td><td>0.23474</td><td>0.500203</td><td></td></tr></table>	Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	n	Klasifikasi Batuan D		16.57	Mohr-Coulomb	6	30.34					Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown		770	0.292313	0.00626636	0.501975		Klasifikasi Batuan CL-CM		19.6	Generalized Hoek-Brown		2310	0.506374	0.02661974	0.500911		Klasifikasi Batuan CM		21.6	Generalized Hoek-Brown		3340	1.15453	0.23474	0.500203		- Factor of safety : 1,459 - Rock bolt: diameter 25mm, panjang 10m, spasi 1,5m. - Shotcrete: tebal 10 cm, K225. - Beban gempa: kh=0,0163; kv=0,0108
Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	n																																											
Klasifikasi Batuan D		16.57	Mohr-Coulomb	6	30.34																																															
Klasifikasi Batuan CL		19.2	Generalized Hoek-Brown		770	0.292313	0.00626636	0.501975																																												
Klasifikasi Batuan CL-CM		19.6	Generalized Hoek-Brown		2310	0.506374	0.02661974	0.500911																																												
Klasifikasi Batuan CM		21.6	Generalized Hoek-Brown		3340	1.15453	0.23474	0.500203																																												

Tabel 4.9. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Portal Inlet dengan FEM dan Total Displacement Maksimum

Tahapan Konstruksi	Grafik	Keterangan
INLET		
- Galian lereng portal	Maksimum Total Displacement : 0.097 m 	- Total Displacement Maksimum : 0,097 m
- Galian lereng portal + rock bolts + shotcrete	Maksimum Total Displacement : 0.059 m 	- Total Displacement Maksimum : 0,059 m - Rock bolt: diameter 25mm, panjang 3m, spasi 1,5m. - Shotcrete: tebal 10 cm, K225.
- Galian lereng portal + rock bolts + shotcrete + beban gempa	Maksimum Total Displacement : 0.062 m 	- Total Displacement Maksimum : 0,062 m - Rock bolt: diameter 25mm, panjang 3m, spasi 1,5m. - Shotcrete: tebal 10 cm, K225. - Beban gempa: $k_h=0,0163$; $k_v=0,0108$

Tabel 4.10. Hasil Analisis Kestabilan Lereng Portal Outlet dengan FEM dan Total Displacement Maksimum

Tahapan Konstruksi	Grafik	Keterangan
OUTLET		
- Galian lereng portal	Maksimum Total Displacement : 0.37 m 	- Total Displacement Maksimum : 0,37 m
- Galian lereng portal + rock bolts + shotcrete	Maksimum Total Displacement : 0.039 m 	- Total Displacement Maksimum : 0,039 m - Rock bolt: diameter 25mm, panjang 10m, spasi 1,5m. - Shotcrete: tebal 10 cm, K225.
- Galian lereng portal + rock bolts + shotcrete + beban gempa	Maksimum Total Displacement : 0.098 m 	- Total Displacement Maksimum : 0,098 m - Rock bolt: diameter 25mm, panjang 10m, spasi 1,5m. - Shotcrete: tebal 10 cm, K225. - Beban gempa: $k_h=0,0163$; $k_v=0,0108$

Secara keseluruhan hasil analisis FEM menunjukkan nilai *safety factor* tanpa beban gempa yang diizinkan yaitu lebih besar dari 1,5 ($SF > 1,5$) dan jika dengan beban gempa lebih besar dari 1,1 ($SF > 1,1$). Pada bagian *inlet* terowongan didapatkan nilai *safety factor* yang cukup tinggi, hal tersebut disebabkan karena pada lereng *inlet* diberikan rekayasa geoteknik berupa galian terasering dan pelandaian yang menyebabkan lereng menjadi sangat aman. Untuk deformasi secara keseluruhan dapat dinyatakan aman karena lebih kecil dari deformasi izin yaitu 0,1m (SNI 8460-2017).

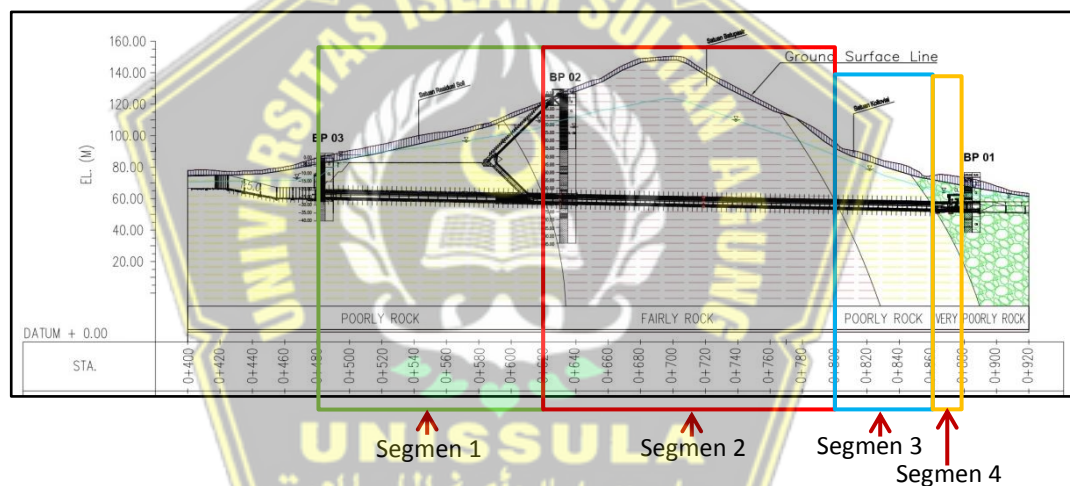
4.1.3. Analisa Empiris Metode Penggalian dan Sistem Penyangga Terowongan

Penentuan tipe penggalian terowongan umumnya dilakukan dengan menggunakan grafik dari Pettifer and Fookes (1994). Namun dalam penelitian oleh Tsiambaos and Saroglou (2010) membahas grafik Pettifer-Fookes ini pada tipe penggalian *ripping* bersifat terlalu *underestimate* dan memprediksi penggalian yang sukar, sedangkan peralatan ekskavasi saat ini semakin modern. Sehingga diperkenalkan modifikasi grafik GSI sebagai alat penilai untuk menentukan tipe penggalian yang dianggap lebih sesuai dengan kondisi saat ini. Untuk nilai *point load strength* $Is_{50} < 3,0$ MPa penilaian tipe penggalian menggunakan grafik pada Gambar 4.28. Maka tipe penggalian yang sesuai dengan trase terowongan adalah penggalian menggunakan *ripping* dan *digging*.

Tabel 4.11. Hasil Analisis Kualitas Massa Batuan pada Elevasi Terowongan

Borehole	STA	GSI		RMR	
		Rating	Kelas Batuan	Rating	Kelas Batuan
BP-03	(0+480) – (0+620)	48,54	Sedang	36,62	Buruk
BP-02	(0+620) – (0+770)	67,11	Baik	47,39	Sedang
BP-01	(0+770) – (0+820)	52,89	Sedang	35,57	Buruk
	(0+820) – (0+880)	24,94	Buruk	18,63	Sangat Buruk

Kemudian untuk perencanaan sistem penyangga terowongan akan dibagi kedalam 4 segmen seperti yang digambarkan pada Gambar 4.29. dengan segmen 1 berupa STA 0+480 – 0+620, segmen 2 berupa STA 0+620 – 0+770, segmen 3 berupa STA 0+770 – 0+860, dan segmen 4 berupa STA 0+860 – 0+880.

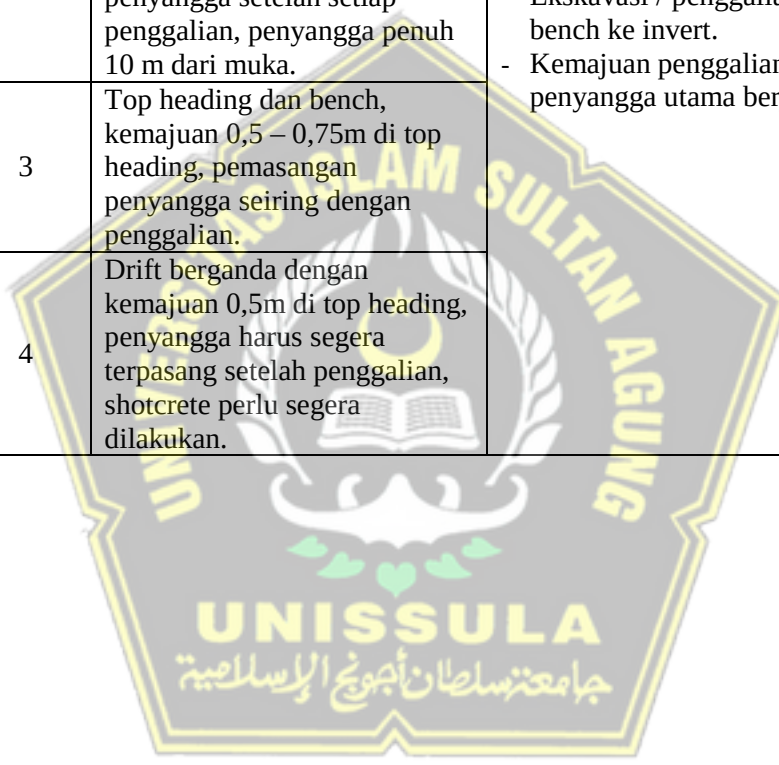


Gambar 4.29. Pembagian Segmen berdasarkan Analisis Kualitas Massa Batuan

Analisis metode penggalian terowongan dilakukan dengan menggunakan metode RMR dan NATM. Berdasarkan hasil klasifikasi massa batuan, dapat diketahui metode penggalian yang sesuai dengan kondisi di lapangan disajikan pada Tabel 4.12. Kemudian dilakukan penentuan metode penyangga terowongan menggunakan metode RMR dan NATM. Hasil dari analisis dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.12. Hasil Analisis Metode Penggalian Terowongan

Titik Bor	Segmen	RMR	NATM
BP-03	1	Top heading dan bench, kemajuan 0,5 – 0,75m di top heading, pemasangan penyangga seiring dengan penggalian.	- Ekskavasi / penggalian awal pada top heading. - Pemasangan penyangga utama pada top heading. - Ekskavasi / penggalian peralihan dari top heading ke bench. - Pemasangan penyangga utama pada bench. - Ekskavasi / penggalian peralihan dari bench ke invert. - Kemajuan penggalian dan pemasangan penyangga utama berjarak 0,5 – 1,5 m.
BP-02	2	Top heading dan bench, kemajuan 0,75 – 1,5 m di top heading, pemasangan penyangga setelah setiap penggalian, penyangga penuh 10 m dari muka.	
BP-01	3	Top heading dan bench, kemajuan 0,5 – 0,75m di top heading, pemasangan penyangga seiring dengan penggalian.	
	4	Drift berganda dengan kemajuan 0,5m di top heading, penyangga harus segera terpasang setelah penggalian, shotcrete perlu segera dilakukan.	



Tabel 4.13. Hasil Analisis Sistem Penyangga Terowongan

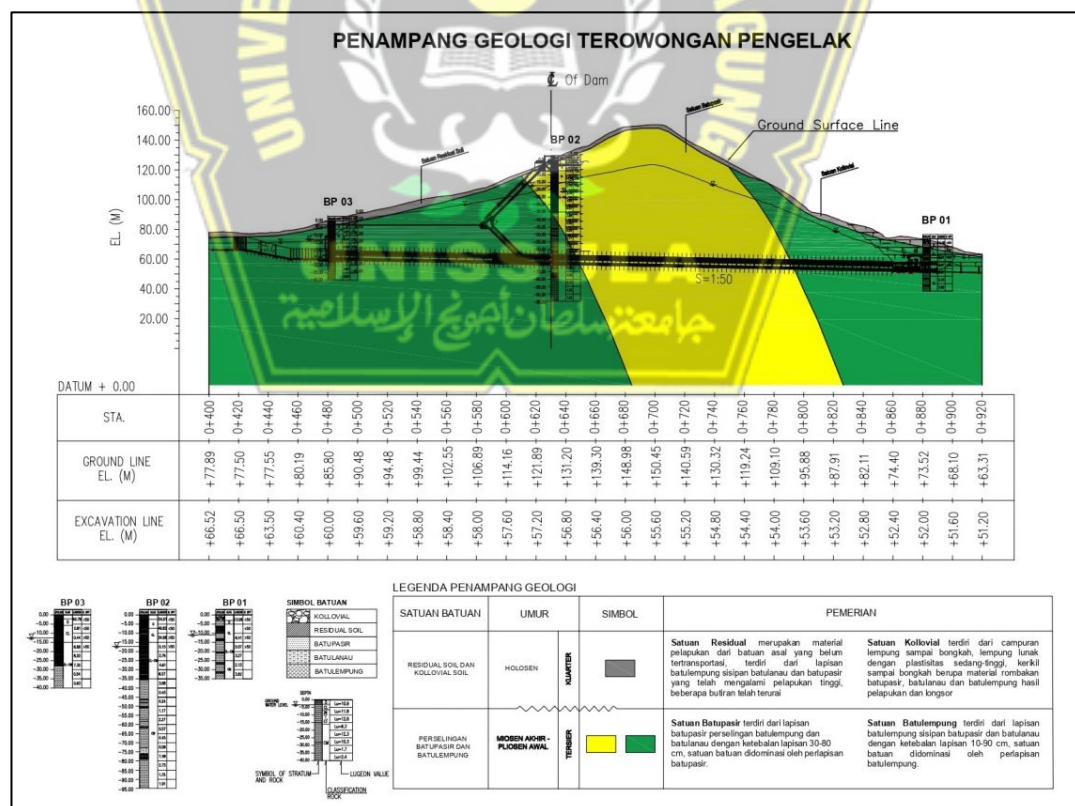
Titik Bor	Segmen	RMR	NATM
BP-03	1	- Shotcrete; 100-150 mm di atap, 100 mm di dinding. - Rockbolt; sistematis bolt panjang 4 – 5 m, diameter 25 mm full grouting, spasi 0,5 – 0,75 m di atap dan dinding dengan wiremesh. - Steel sets; rangka ringan sampai sedang spasi 0,5-0,75 m, ditempat yang diperlukan.	- Rangka baja H100 (panjang=17m, tebal = 8mm, tinggi = 100mm, spasi = 0,5 – 1,5m / disesuaikan dengan kondisi batuan); - Rockbolt (diameter = 25mm, panjang = 6 m, spasi longitudinal = 1,2m, spasi lateral = disesuaikan dengan jarak rangka baja) pada atap dan dinding; Wiremesh (diameter 5mm); - Shotcrete pada atap, dinding, dan lantai kerja (tebal=100 mm) Metode tambahan yang diperlukan antara lain: - Perkuatan awal (forepoling diameter 32mm, panjang 6m, spasi 300mm, dengan pengisi atau injeksi semen). - Perkuatan muka bidang galian dengan shotcrete dan rockbolt. - Pengendalian aliran air dengan pemboran drainase.
BP-02	2	- Shotcrete; 50-100 mm di atap, 100 mm di dinding. - Rockbolt; sistematis bolt panjang 3-4 m, diameter 25 mm full grouting, spasi 0,75–1,0 m di atap dan dinding dengan wiremesh. - Steel sets; rangka ringan - sedang, spasi 0,75 - 1,5 m, ditempat yang diperlukan.	
BP-01	3	- Shotcrete; 100-150 mm di atap, 150 mm di dinding. - Rockbolt; sistematis bolt panjang 4 – 5 m, diameter 25 mm full grouting, spasi 0,5 – 1,0 m di atap dan dinding dengan wiremesh. - Steel sets; rangka ringan sampai sedang, spasi 0,5-0,75 m, ditempat yang diperlukan.	
	4	- Shotcrete; 150-200 mm di atap, 200 mm di dinding dan 100 mm di muka. - Rockbolt; sistematis bolt panjang 5 – 6 m, diameter 25 mm full grouting, spasi 0,5 – 0,75 m di atap dan dinding dengan wiremesh, bolt invert. - Steel sets; rangka sedang sampai berat spasi 0,5-0,75 m, dengan steel lagging dan forepoling jika diperlukan, invert tertutup.	

4.2. Pembahasan

Pada sub bab ini berisi pembahasan tentang kondisi geologi dan geologi teknik untuk evaluasi kemiringan lereng portal terowongan, metode penggalian dan penentuan sistem penyangga terowongan.

4.2.1. Evaluasi Kondisi Geologi

Evaluasi kondisi geologi daerah penelitian dilakukan dengan melakukan identifikasi morfologi, litologi, stratigrafi, struktur geologi, air tanah, dan kegempaan. Kondisi geologi pada trase terowongan memiliki morfologi dan litologi yang seragam, yaitu satuan morfologi perbukitan struktural curam dan perbukitan struktural miring, litologi berupa batupasir perselingan batulempung dan batulanau serta batulempung sisipan batupasir dan batulanau dengan kemiringan perlapisan relatif tegak kearah timur laut (hilir/ outlet). Adapun struktur geologi berupa lipatan antiklin mempunyai puncak lipatan berada di sebelah barat daya atau bagian hulu berjarak sekitar 300 meter dari trase inlet terowongan.



Gambar 4.30. Evaluasi Kondisi Geologi pada Trase Terowongan

4.2.1.1. Geomorfologi

Kondisi morfologi daerah penelitian dan sekitarnya berupa satuan perbukitan struktural curam, satuan perbukitan struktural miring dan satuan dataran sungai. Pola pengaliran dengan tipe trellis menandakan bahwa kondisi morfologi lokasi penelitian dikendalikan oleh struktur geologi berupa lipatan. Kondisi morfologi ini menyebabkan pada dataran sungai rawan terhadap bahaya banjir, sedangkan pada daerah perbukitan struktural curam dan miring rawan terhadap bahaya longsor dan erosi permukaan. Hal ini dapat menjadi perhatian dalam pembangunan terowongan khususnya pada lokasi kedua portal terowongan, yaitu inlet yang berada pada satuan perbukitan struktural miring dan outlet yang berada di satuan perbukitan struktural curam.

4.2.1.2. Litologi dan Stratigrafi

Litologi lokasi penelitian terdiri dari satuan batulempung dan satuan batupasir. Kedua litologi tersebut termasuk dalam Formasi Kalibeng, yang terbentuk pada kisaran kala Miosen Akhir sampai Pliosen.

Stratigrafi pada lokasi penelitian berupa alluvial, lapisan batupasir perselingan batulempung dan batulanau dengan ketebalan lapisan 30 – 80 cm dan didominasi oleh perlapisan batupasir, dan lapisan batulempung sisipan batupasir dan batulanau dengan ketebalan lapisan 10 – 90 cm. Sedangkan pada trase terowongan hanya dijumpai batupasir perselingan batulempung dan batulanau dan batulempung sisipan batupasir dan batulanau. Pada permukaan terdapat lapisan tanah residu dan alluvial dengan ketebalan 2 - 5 m. Arah umum perlapisan batuan menunjukkan kemiringan ke arah timur laut yang merupakan sayap / sisi timur sumbu antiklin. Hal ini akan berpengaruh pada penentuan orientasi arah penggalian dan kestabilan lereng di bagian portal terowongan. Juga arah rembesan yang biasanya akan mengikuti arah perlapisan batuan (Yanget al., 2014).

4.2.1.3. Struktur Geologi

Struktur geologi yang dijumpai di lokasi penelitian adalah lipatan antiklin dengan sumbu yang berarah barat laut – tenggara dan mempunyai puncak lipatan berada di sebelah barat daya atau bagian hulu dari trase inlet terowongan.

Antiklin ini termasuk jenis lipatan sedang (*moderate fold*) dengan kemiringan yang condong ke arah timur laut.

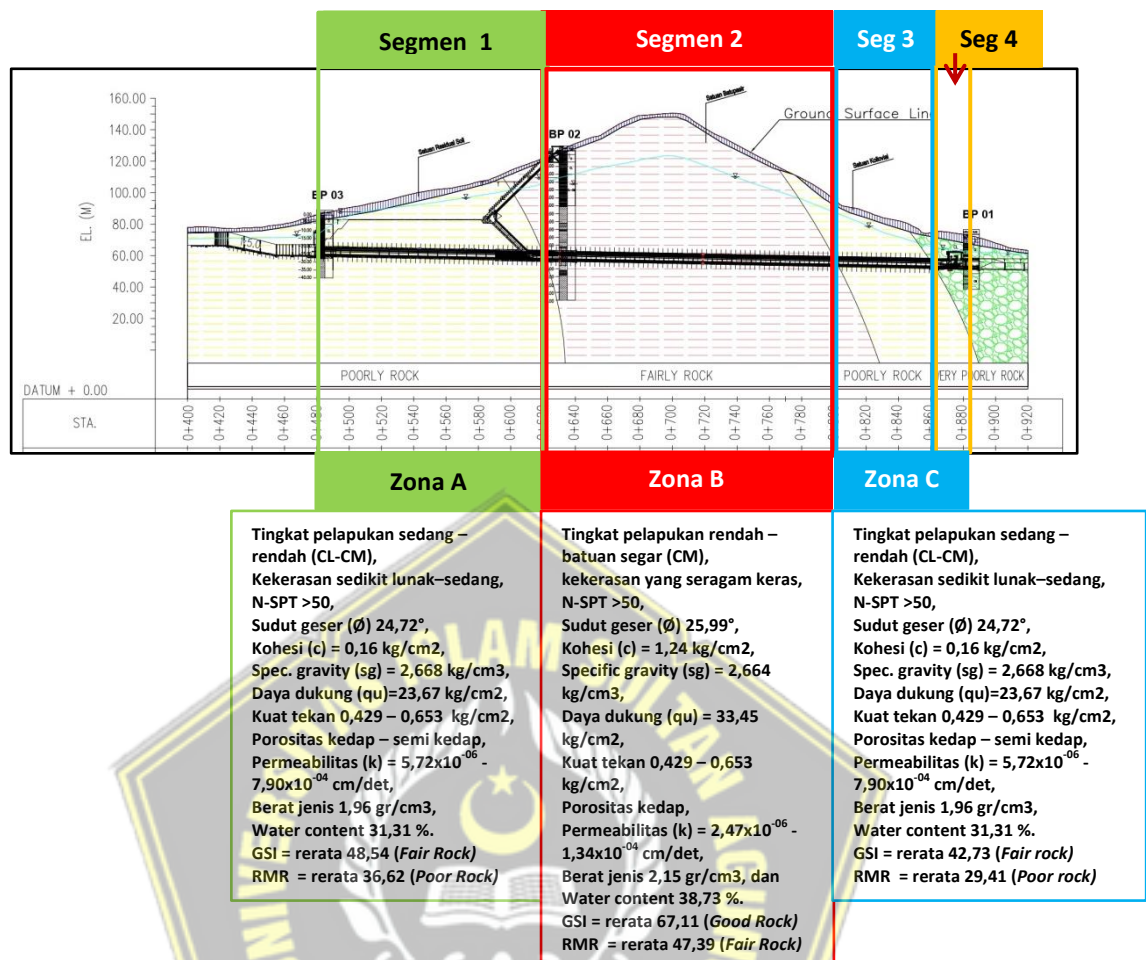
Berdasarkan hasil analisis struktur, diketahui bahwa arah umum kekar adalah barat laut – tenggara (N345°E/82°) yang mana tegak lurus terhadap arah gaya utama berarah relatif barat daya – timur laut, yaitu subduksi di Pulau Jawa antara Lempeng Eurasia dan Indo-Australia yang terjadi pada zaman Pliosen-Plistosen. Akibat gaya utama ini menyebabkan terbentuknya morfologi (relief) perbukitan di daerah penelitian dan sekitarnya.

4.2.1.4. Kondisi Air Tanah

Berdasarkan data hasil pemboran di lapangan, diketahui bahwa muka air tanah berada pada kedalaman 6,7 – 17 m dari permukaan tanah, yang mana secara keseluruhan berada diatas jalur terowongan. Sehingga pada analisis kestabilan lereng portal, metode penggalian, maupun sistem penyangga terowongan harus menggunakan properties material jenuh air dan mempertimbangkan pengaruh tekanan air tanah. Permeabilitas (k) rerata menunjukkan angka $4,78 \times 10^{-5}$ – $5,99 \times 10^{-5}$ cm/det sehingga kondisi batuan dapat dikatakan cukup kedap, air tanah setidaknya hanya akan menetes namun tekanan hidrolik akan berpengaruh pada kestabilan lereng. Untuk mitigasi terutama pada portal terowongan tetap diperlukan pembuatan sistim drainase pada dinding (*drainage hole*). Saat penggalian terowongan perlu dilakukan *dewatering* untuk mencegah aliran air terakumulasi dalam terowongan.

4.2.2. Evaluasi Kondisi Geologi Teknik

Evaluasi kondisi geologi teknik meliputi kondisi geologi teknik dan analisis kualitas massa batuan. Secara garis besar kondisi geologi teknik pada trase terowongan dibagi menjadi 3 (tiga) zona. Kemudian dari ketiga zona tersebut dikelompokkan berdasarkan atas penilaian kualitas massa batuan menjadi 4 (empat) segmen seperti diilustrasikan pada Gambar 4.31. Kualitas massa batuan akan berpengaruh terhadap penentuan metode penggalian dan sistem penyangga terowongan. Arah kemiringan perlapisan batuan yang relatif searah juga berdampak pada orientasi arah penggalian terowongan.



Gambar 4.31. Evaluasi Kondisi Geologi Teknik pada Trase Terowongan

4.2.2.1. Geologi Teknik

Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan dan hasil pemboran, serta analisis terhadap hasil pengujian laboratorium, maka pada trase terowongan dibagi ke dalam 2 satuan geologi teknik yaitu; Batulempung sisipan batupasir lapuk sedang – sedikit lapuk, dan Batupasir perselingan batulempung dan batulanau sedikit lapuk – batuan segar. Kedua satuan geologi teknik tersebut tersebar pada keempat segmen diatas. Dari hasil uji sifat index dan sifat keteknikan menunjukkan faktor pengontrol yang paling berpengaruh dalam geologi teknik dan kualitas massa batuan adalah kondisi pelapukan yang dipengaruhi oleh cuaca dan iklim pada batuan di permukaan dan juga struktur lipatan pada batuan bawah permukaan (Wyllie and Mah, 2004). Hal ini disebabkan karena air tanah cenderung melewati rekahan-rekahan yang ada pada

batuan, sehingga proses pelapukan terjadi lebih cepat daripada bagian lain (Mirmehrabi et al., 2008). Pada bagian permukaan di sepanjang trase terowongan, batuan yang mengalami pelapukan sempurna atau disebut sebagai tanah residu setebal 2 - 5 m. Sehingga dalam hal kestabilan lereng portal terowongan, faktor pelapukan dianggap lebih berpotensi menyebabkan keruntuhan lereng.

4.2.2.2. Kualitas Massa Batuan

Untuk kualitas massa batuan di bawah permukaan berdasarkan penilaian GSI memiliki kualitas batuan buruk (*poor*) hingga bagus (*good*). Sedangkan berdasarkan RMR kualitas batuan sangat buruk (*very poor*) hingga sedang (*fair*). Hasil analisis kualitas massa batuan tersebut dipengaruhi oleh jenis perlapisan batuan dengan kemiringan berarah ke timur laut (area outlet/ hilir).

Rendahnya kualitas massa batuan menyebabkan perlunya pemantauan terhadap dampak yang mungkin terjadi pada saat pelaksanaan konstruksi, yaitu deformasi pada terowongan maupun pada permukaan tanah. Instrumen pemantauan deformasi dapat dipasang setidaknya masing-masing pada setiap segmen penggalian terowongan.

4.2.3. Evaluasi Kestabilan Lereng pada Portal Terowongan

Dari pembahasan mengenai geologi teknik dan kualitas massa batuan pada sub bab sebelumnya, diketahui bahwa kekuatan massa batuan di bagian permukaan lebih dikontrol oleh pelapukan daripada struktur geologi. Meskipun berdasarkan survey lapangan, singkapan batuan menunjukkan struktur *planar failure* mungkin saja terjadi, namun pada kasus ini tipe keruntuhan lereng yang lebih mungkin terjadi berbentuk *circular failure*. Sehingga untuk menentukan desain awal dari kemiringan lereng portal akan digunakan *Circular Failure Chart (CFC)*. Dengan melakukan *preliminary desain* ini diharapkan akan mengurangi *trial and error* pada metode numerik nantinya.

Berdasarkan hasil analisis dengan *Circular Failure Chart (CFC)*, ternyata dibutuhkan kemiringan lereng yang lebih landai daripada perencanaan, yaitu 40° pada bagian *inlet* dan 45° pada bagian *outlet* terowongan, dengan angka keamanan (*safety factor*) 1,56 pada *inlet* dan 1,58 pada *outlet*. Kedua angka aman tersebut

dianggap telah memenuhi persyaratan keamanan kestabilan lereng yaitu lebih besar dari 1,50 (SNI 8460-2017). Meskipun dalam penelitian oleh Manouchehrian et al. (2014) mengatakan bahwa angka keamanan yang didapat dari *circular chart* biasanya lebih tinggi, namun setelah dilakukan analisis numerik ternyata didapatkan angka keamanan yang lebih tinggi daripada *CFC*.

Untuk memastikan hasil desain dari *CFC* dilakukan pemodelan analisis numerik dengan menggunakan *Slide*. Pada analisis numerik, *Rock bolts* dan *shotcrete* juga ditambahkan dalam pemodelan. Dengan adanya *Rock bolts* dan *shotcrete* ternyata cukup berpengaruh terhadap angka keamanan. Pada bagian *inlet* angka keamanan bertambah sebesar 0,590 sedangkan pada bagian *outlet* bertambah sebesar 0,411. Penambahan *shotcrete* ini diberikan pada lereng portal untuk mencegah longsor yang diakibatkan oleh paparan cuaca dan bencana alam. Dikarenakan pada lokasi terowongan teridentifikasi berpotensi terjadinya gempa bumi, sehingga pada analisis numerik ditambahkan pengaruh gempa bumi dalam pemodelannya. Penambahan data gempa bumi ini juga berpengaruh terhadap angka keamanan lereng, yaitu pada bagian *inlet* angka keamanan bertambah sebesar 0,496 sedangkan pada bagian *outlet* bertambah sebesar 0,347.

Karena penggalian terowongan menggunakan kombinasi metode RMR dan *New Australian Tunneling Method (NATM)* dengan *ripping* dan *digging* dimana faktor gangguan dianggap 0, sehingga penggalian terowongan dianggap tidak akan berdampak pada kestabilan lereng portal. Pemodelan beban gempa pada analisis numerik menghasilkan deformasi lebih kecil dari deformasi izin 0,1 m sehingga dianggap aman.

4.2.4. Evaluasi Metode Penggalian pada Terowongan

Berdasarkan analisis penentuan tipe penggalian dengan menggunakan grafik GSI oleh Tsiambaos dan Saroglou didapatkan tipe penggalian menggunakan *digging* dan *ripping*. Meskipun demikian, menurut Hoek (2001) dalam Sharifzadeh and Kolivand (2013) tidak ada aturan baku yang benar-benar dapat memfasilitasi dalam penentuan tipe penggalian. Penentuan tipe penggalian lebih dipengaruhi oleh pengalaman teknis daripada perhitungan teoritis. Penentuan tipe penggalian pada terowongan lebih dipengaruhi oleh keamanan konstruksi, biaya

dan waktu.

Untuk orientasi arah penggalian lebih menguntungkan apabila penggalian terowongan dilakukan dari arah inlet atau sisi barat daya (hulu), karena arah kemiringan perlapisan batuan relatif ke arah timur laut atau outlet (hilir) di sepanjang trase terowongan. Penentuan orientasi arah penggalian yang tepat akan membantu mencegah terjadinya runtuh pada muka bidang galian.

Penentuan metode penggalian terowongan dilakukan dengan menggunakan gabungan 2 metode empiris, yaitu *Rock Mass Rating* (RMR) dan *New Austrian Tunneling Method* (NATM). Analisis metode penggalian dilakukan berdasarkan hasil analisis kualitas massa batuan yang dibagi menjadi 4 segmen berdasarkan RMR dan GSI. Dari gabungan kedua metode tersebut didapatkan panjang lajur penggalian dan lokasi penempatan penyangga. Pada penelitian ini hanya memberikan rekomendasi metode penggalian berdasarkan RMR dan NATM, tidak menyarankan metode mana yang lebih tepat untuk digunakan. Meskipun demikian, berdasarkan hasil analisis dengan kedua metode tersebut didapatkan hasil metode penggalian yang hampir sama, sehingga tidak akan berbeda jauh *safety factor* yang akan didapat apabila akan dilakukan analisis dengan metode numeris. Hasil analisis dengan metode RMR maupun NATM menunjukkan penggalian terowongan dilakukan dengan tahapan penggalian yaitu *top heading* dan *bench*.

4.2.5. Evaluasi Sistem Penyangga pada Terowongan

Untuk penentuan sistem penyangga terowongan dilakukan seperti pada penentuan metode penggalian, dibagi kedalam 4 segmen dengan berdasarkan RMR dan GSI. Hasil analisis dengan menggunakan metode penggalian berdasarkan RMR dan NATM didapatkan hasil sistem penyangga yang hampir sama, sehingga tidak akan berbeda jauh *safety factor* yang didapat apabila akan dilakukan analisis dengan metode numeris.

Pada hasil analisis gabungan metode RMR dan NATM tersebut, pemasangan sistem penyangga terowongan disesuaikan dengan kondisi batuan di setiap segmennya. Sistem penyangga terowongan tersebut menggunakan perkuatan rangka baja (*steel ribs*), baut batuan (*rockbolts*), *wiremesh* dan

shotcrete. Pemasangan rangka baja (*steel ribs*) pada trase terowongan dengan jarak spasi 0,5 – 1,5 meter atau disesuaikan dengan kualitas massa batuan. Sedangkan baut batuan (*rockbolts*), *wiremesh* dan *shotcrete* dipasang pada atap dan dinding terowongan. Pada kondisi kualitas massa batuan yang rendah atau batuan lunak, perlu ditambahkan pemasangan *forepoling* pada bagian atap (*crown*) sebagai perkuatan pada saat penggalian.

Pemantauan zona-zona pada sistem penyangga terowongan juga perlu memperhatikan kondisi batuan dan beban diatas elevasi terowongan. Terutama pada area yang direncanakan akan dibangun fasilitas umum, yang nantinya diperlukan analisis potensi *hazard* di permukaan supaya tidak berdampak pada stabilitas terowongan.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pada bab-bab sebelumnya, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Karakteristik geologi teknik dijelaskan menjadi kondisi geologi dan sifat keteknikan.
 - Kondisi geologi daerah penelitian adalah sebagai berikut:
 - a) Daerah penelitian terdiri dari 3 (tiga) satuan geomorfologi, yaitu Satuan Perbukitan Struktural Curam, Satuan Perbukitan Struktural Miring, dan Satuan Dataran Sungai.
 - b) Litologi daerah penelitian terdiri dari 3 (tiga) satuan batuan, yaitu Satuan Alluvial, Satuan Batupasir dan Satuan Batulempung.
 - c) Pada daerah penelitian terdapat antiklin yang berarah relatif barat laut – tenggara. Sumbu antiklin ini berada didepan portal inlet (sebelah barat) trase terowongan, sehingga trase terowongan berada pada sayap kanan (hilir) antiklin tersebut. Struktur yang dijumpai di lapangan adalah kekar berpasangan/ kekar gerus dengan arah umum barat laut – tenggara.
 - d) Berdasarkan data hasil pemboran, elevasi muka air tanah di sepanjang trase terowongan relatif tinggi dengan kedalaman berkisar antara 6,7 – 17,0 m dari permukaan tanah. Keseluruhan trase terowongan berada dibawah permukaan air tanah.
 - e) Kegempaan dalam penelitian ini menggunakan data sekunder dari Peta Sumber dan Bahaya Gempa tahun 2017 dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun. Pada lokasi penelitian besarnya percepatan puncak batuan dasar adalah 0,3-0,4 g.
 - Sifat keteknikan tanah dan batuan adalah sebagai berikut :
 - a) Berdasarkan pengujian laboratorium didapatkan parameter geologi teknik tanah dan batuan antara lain : berat jenis jenuh air (γ_{sat}), berat jenis kering (γ_d), sudut geser, kohesi, porositas, permeabilitas, derajat kejenuhan, modulus young, poisson rasio, dan kuat tekan batuan.

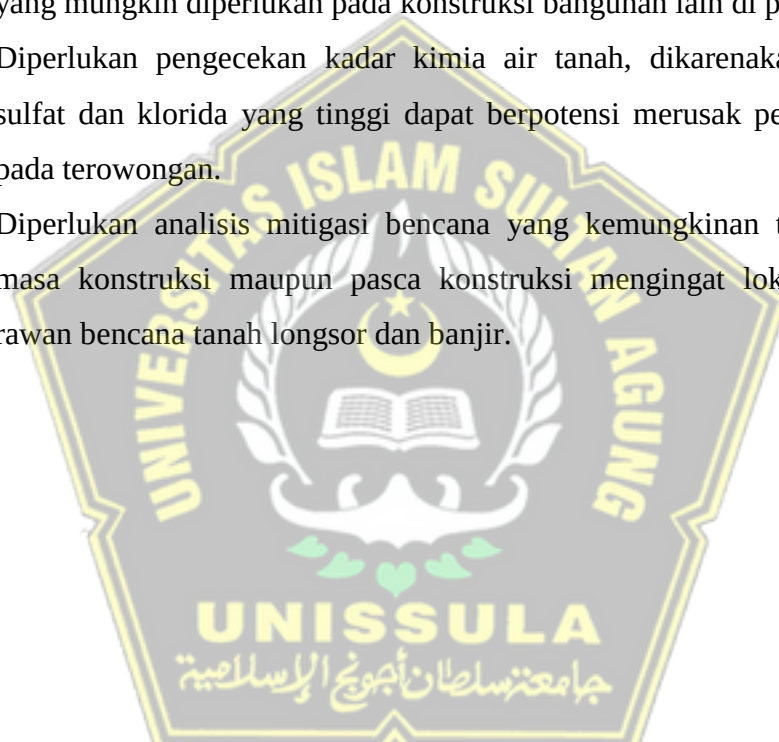
Menurut Hoek and Brown (1997) batuan pada daerah penelitian dapat dikategorikan kedalam *weak rock*.

- b) Hasil analisis kualitas massa batuan di sepanjang trase terowongan berdasarkan analisis GSI termasuk kedalam kelas batuan buruk (*poor*) hingga bagus (*good*), dan berdasarkan RMR termasuk kedalam kelas batuan sangat buruk (*very poor*) hingga sedang (*fair*).
2. Dari hasil analisis kestabilan lereng portal terowongan, untuk perbaikan lereng digunakan 2 (dua) cara, yaitu:
 - a) Melakukan perbaikan geometri berupa terasering dengan penggalian di muka terowongan yang bertujuan untuk menambah kelayakan lereng, yaitu dengan sudut 40° pada bagian *inlet* dan 45° pada bagian *outlet*.
 - b) Memasang baut batuan (*rock bolts*) dengan kedalaman 3 meter pada lereng inlet dan 10 meter pada lereng outlet serta *shotcrete* setebal 10 cm pada kedua lereng portal.
3. Metode penggalian terowongan terbagi menjadi 4 (empat) segmen dengan analisis secara keseluruhan sebagai berikut:
 - a) Metode penggalian yang sesuai dengan kondisi massa batuan pada trase terowongan adalah dengan *digging* dan *ripping*.
 - b) Hasil analisis metode penggalian terowongan berdasarkan metode RMR dan NATM adalah dengan segmentasi penggalian *top heading* dan *bench*. Adapun perkuatan tambahan yang diperlukan pada saat penggalian antara lain perkuatan awal, perkuatan muka bidang galian, dan pengendalian aliran air.
4. Sistem penyangga terowongan dibagi menjadi 4 (empat) segmen yang direkomendasikan menurut klasifikasi massa batuan berdasarkan GSI dan RMR. Secara keseluruhan pada setiap segmen menggunakan sistematis *steelribs* dan *rockbolts* dengan *shotcrete*, *wiremesh* serta pada tempat yang diperlukan dipasang *forepoling*. Yang membedakan sistem penyangga setiap segmen adalah ukurannya.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dalam penelitian ini, dapat diberikan saran antara lain :

- 1) Adanya perbedaan peta geologi teknik yang dihasilkan pada penelitian ini dengan data sekunder dapat menjadi masukan/ referensi kepada pemangku kepentingan dalam pelaksanaan konstruksi terowongan saluran pengelak Bendungan Jragung.
- 2) Diperlukan analisis potensi bahaya (*hazard*) di permukaan yang akan berdampak pada terowongan, yaitu sistem penyangga dan pengamanan yang mungkin diperlukan pada konstruksi bangunan lain di permukaan.
- 3) Diperlukan pengecekan kadar kimia air tanah, dikarenakan kandungan sulfat dan klorida yang tinggi dapat berpotensi merusak perkuatan beton pada terowongan.
- 4) Diperlukan analisis mitigasi bencana yang kemungkinan timbul selama masa konstruksi maupun pasca konstruksi mengingat lokasi penelitian rawan bencana tanah longsor dan banjir.



DAFTAR PUSTAKA

- Abramson, L.W., Lee, Sharma S., Boyce, G.M. (2002). *Slope Stability And Stabilization Methods*. Canada: John Willey & Sons.
- Aldiamar, F., and Ariestianty, S.K. (2014). Pemodelan Numerik Penentuan Panjang Laju Penggalan Untuk Terowongan Jalan (Numerical Modelling for Determination of Road Tunnel Excavation Round Length): *Jurnal Jalan-Jembatan*, v. 31, p. 145–153.
- Apriyono, A., and Sumiyanto. (2010). Tinjauan Kekuatan Sistem Penyangga Terowongan dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga (A Review of Tunnel Supporting Systems Using Finite Element Method): *Dinamika Rekayasa*, v. 6, p. 33–38.
- ASTM D 2216-98. (1998). *Metoda Pengujian Baku Untuk Menentukan Kadar Air Tanah dan Batuan di Laboratorium*: ASTM International, p. 6.
- ASTM D 4859-07. (2000). *Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil By Direct Heating*: ASTM International, p. 10.
- ASTM D 5731-02. (2002). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*: ASTM International, p.1–11, www.astm.org.
- ASTM D 854-14. (2021). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*: ASTM International, p. 6.
- Badan Standardisasi Indonesia. (2017). SNI 8460-2017, Persyaratan Perencanaan Geoteknik. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 134 - 136.
- Bell, F.G. (2007). *Engineering Geology Second Edition*: Elsevier Ltd, 581 p.
- van Bemmelen, R.W. (1949). *The Geology of Indonesia Vol. 1A - General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes*: Batavia, The Hague, v. 1A, 732 p.
- Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*: Canada, John Wiley & Sons, 251 p.
- Das, B.M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik)*: Jakarta, Erlangga, 300 p.
- Das, B.M., and Ramana, G.V. (2011). *Principles of Soil Dynamics*: Stamford, Cengage Learning, 575 p.
- Das, B.M., Shukla, S.K., and Sivakugan, N. (2013). *Rock Mechanics An Introduction*: London, Taylor & Francis, CRC Press, 234 p.
- Dearman, W.R. (1991). *Engineering geological mapping*: Newcastle-UK, Butterworth- Heinemann, v. 8, 387 p., doi:10.1007/BF02634605.

- Deere, D.U., and Deere, D.W. (1989). *Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years*. US Army Corps of Engineers Report GL-89-1: Department of The Army - US Army Corps of Engineers, p. 100.
- Fadhillah, R.A., and Hamdhan, I.N. (2016). Analisis Geoteknik Terowongan Batuan Geurutee Aceh Menggunakan Metode Elemen Hingga: *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, v. 2, p. 78–88.
- Griffiths, D. V., and Lane, P.A. (1999). *Slope stability analysis by finite elements: Géotechnique*, v. 49, p. 387–403, doi:10.1680/geot.51.7.653.51390.
- Hammah, R.E., Curran, J.H., Yacoub, T., Corkum, B. (2004). *Stability Analysis of Rock Slope using the Finite Element Method*. in Schubert (red.), Eurock 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium.
- Hardiyatmo, H.C. (2006). *Mekanika Tanah 1*: Yogyakarta, Gadjah Mada University Press, 399p.
- Hardjomuljadi, Sarwono. (2010). Terowongan Dengan NATM (*New Austrian Tunneling Method*). PT. MEDISA. Jakarta.
- Hoek, E., and Brown, E.T. (1998). *Practical Estimates of Rock Mass Strength*: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 34, p. 1165–1186, doi:10.23919/ae.2019.8866996.
- Hoek, E., Carter, T.G., and Diederichs, M.S. (2013). *Quantification of the geological strength index chart*, in 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2013, v. 3, p. 672–679.
- Hoek, E., and Karzulovic, A. (2000). *Rock mass properties for surface mines - Slope Stability in Surface Mining*: Society for Mining, Metallurgical, and Exploration, p. 59–70.
- Hoek, E., Marinos, P., and Marinos, V. (2007). *Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses, in Underground Works under Special Conditions - Proceedings of the Workshop (W1) on Underground Works under Special Conditions*, London, Taylor & Francis, doi:10.1201/noe0415450287.ch2.
- Indra Karya Cabang-1 Malang, PT. (2015). Detail Desain Bendungan Jragung, Kabupaten Semarang : Jakarta, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Indra Karya (Persero), PT. (2019). *Preparation of Jragung Multipurpose Dam Project : Engineering Design Report (EDR)* : Jakarta, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- ISRM. (2015). *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring* (R. Ulusay, Ed.): Cham, Switzerland, Springer, 292 p., doi:10.1016/0148-9062(81)90524-6.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2015). Pedoman Metode Perencanaan Penggalian dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan Pada Media Campuran Tanah- Batuan: Indonesia, p. 53.

- Kontogianni, V., and Stiros, S. (2003). *Tunnel monitoring during the excavation phase: 3-D kinematic analysis based on geodetic data*: Proc. of the 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, p. 1–5.
- Manouchehrian, A., Gholamnejad, J., and Sharifzadeh, M. (2014). *Development of a model for analysis of slope stability for circular mode failure using genetic algorithm*: Environmental Earth Sciences, v. 71, p. 1267–1277, doi:10.1007/s12665-013-2531-8.
- Marinos, P., and Hoek, E. (2000). *Gsi: A Geologically Friendly Tool For Rock Mass Strength Estimation* : ISRM International Symposium, p. 19.
- Marinos, V., Marinos, P., and Hoek, E. (2005). *The geological strength index: Applications and limitations*: Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 64, p. 55–65, doi:10.1007/s10064-004-0270-5.
- Miura, K. (2003). *Design and Construction of Mountain Tunnels in Japan*: Tunnelling and Underground Space Technology, v. 18, p. 115–126, doi:10.1016/S0886-7798(03)00038-5.
- Moon, V., Russell, G., and Stewart, M. (2001). *The Value of Rock Mass Classification Systems for Weak Rock Masses: A Case Example from Huntly, New Zealand*: Engineering Geology, v. 61, p. 53–67, doi:10.1016/S0013-7952(01)00024-2.
- Muzakky, M.A., Indrawan, I.G.B. (2020). *Karakteristik Geologi Teknik Bendungan Jragung, Kecamatan Pringapus, Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah* : Universitas Gajah Mada.
- Nugroho, W.K. (2020). *Evaluasi Kondisi Geologi Teknik dan Analisis Kestabilan Terowongan Pengelak Bendungan Pamukkulu Provinsi Sulawesi Selatan*: Universitas Gadjah Mada, 195 p.
- Pratikso (2020). *Buku Pedoman Penyusunan dan Penulisan Tesis : Magister Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung*, 52 p.
- Price, D.G. (2009). *Engineering geology: Principles and practice*: Berlin, Springer, 450 p., doi:10.1007/978-3-540-68626-2.
- Priest, S.D., and Hudson, J.A. (1976). *Discontinuity spacings in rock*: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and, v. 13, p. 135–148, doi:10.1016/0148- 9062(76)90818-4.
- Pusgen (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*: Jakarta, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 16 p.
- Rahmati, A., Faramarzi, L., and Sanei, M. (2014). *Development of a new method for RMR and Q classification method to optimize support system in tunneling*: Frontiers of Structural and Civil Engineering, v. 8, p. 448–455, doi:10.1007/s11709-014-0262-x.

- Romana M. (1985). *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slope*. Proceedings of the International Symposium on the Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works International Society of Rock Mechanics: Zacatecas. Hal.49-53
- Rori, S. V., Balamba, S., and Sarajar, A.N. (2017). *Analisa Tanah Pada Buka-an Terowongan (Studi Kasus: Terowongan Kawasan Green Hill, Madendeng)*: Jurnal Sipil Statik, v. 5, p.313–323.
- Sasangka, D.J. (2019). *Analisis Kestabilan Portal Dan Metode Ekskavasi Berdasarkan Kondisi Geologi Teknik pada Terowongan Pengelak Bendungan Bener Kabupaten Purworejo*: Universitas Gadjah Mada, 195 p.
- Sasangka, D.J., Taufik, R., Indrawan, I.G.B. (2019). *Engineering Geology Investigation for Slope Geometry Design of Diversion Tunnel Portal in Bener Dam Purworejo*. Proceeding of SLOPE 2019, 1-8.
- Setiawan, N.I., Sariyanto, dan Saputro, A.A. (2016). *Teknik Pembuatan Sayatan Tipis Batuan Di Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada*, in Proceeding, Seminar Nasional Kebumihan Ke-9, Yogyakarta, p. 378–388.
- Sharifzadeh, M., and Kolivand, F. (2013). *Design of sequential excavation method for large span urban tunnels in so ground – Niayesh tunnel*: Tunnelling and Underground Space Technology, v.35, p.178-188.
- Singh, B. and Goel, R. K. (2006). *Tunnelling in Weak Rocks* : Elsevier Geo-Engineering Book Series vol.5. Elsevier, Amsterdam.
- Singh, B. and Goel, R.K. (2011). *Engineering Rock Mass Classification: Tunnelling, Foundation and Landslide*. Amerika Serikat: Butterworth-Heinemann, 365 p.
- SNI-03-3637 (1994). *Metode Pengujian Berat Isi Tanah Berbutir Halus*: Jakarta, Indonesia, Badan Standardisasi Nasional, 4 p.
- SNI-1964 (2008). *Cara uji berat jenis tanah*: Jakarta, Indonesia, Badan Standardisasi Nasional, 14 p.
- SNI-1965 (2008). *Cara uji penentuan kadar air untuk tanah dan batuan di laboratorium*: Jakarta, Indonesia, Badan Standardisasi Nasional, 16 p.
- SNI-2813 (2008). *Cara Uji Kuat Geser Langsung Tanah Terkonsolidasi dan Terdrainase*: Jakarta, Indonesia, Badan Standardisasi Nasional, 30 p.
- SNI 2825 (2008). *Cara uji kuat tekan batu uniaksial*: Jakarta, Indonesia, Badan Standardisasi Nasional, 8 p.
- SNI 3420 (2016). *Metode Uji Kuat Geser Langsung Tanah Tidak Terkonsolidasi dan Tidak Terdrainase*: Jakarta, Badan Standardisasi Nasional, 19 p.
- SNI 8460-2017 (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik*: Sni, v. 8460, p. 323.

- Sukardi dan Budhitrisna, T. (1992). *Peta Geologi Bersistem Indonesia, Lembar Salatiga, Jawa, skala 1:100.000* : Bandung, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Toma, H., and Jodl, H.G. (2006). *Selecting efficient support methods for tunnels: International Symposium on Utilization of Underground Space in Urban Areas*, v. 5, p. 1–8.
- Tsiambaos, G., and Saroglou, H. (2010). *Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index* *Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI)*: Bull Eng Geol Environ, v.69, p.13-27, doi:10.1007/s10064-009- 0235-9.
- de Vallejo, L.I.G., and Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*: New York, Taylor & Francis, CRC Press, 669 p.
- Wibowo, A. (2019). *Evaluasi Kondisi Geologi Teknik dan Analisis Kestabilan Ekskavasi Terowongan Air Nanjung Provinsi Jawa Barat*: Universitas Gadjah Mada, 183 p.
- Wyllie, C.D., and Mah, W.C. (2004). *Rock Slope Engineering Civil and Mining*: London, SponPress, 431 p.
- van Zuidam. (1983). *Guide to Geomorphologic-Aerial Photographic Interpretation and Mapping* : Netherland, 442 p., doi:10.5194/esurf-2-339-2014.

