

**ANALISIS SISTEM PENYANGGA PADA TEROWONGAN
PENGELAK PROYEK BENDUNGAN LAU SIMEME
KEC.SIBIRU-BIRU KABUPATEN DELI SERDANG,
SUMATERA UTARA**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Dalam
Ujian Sidang Sarjana Teknik Sipil Sastra Satu
Universitas Medan Area

Disusun Oleh:

**GEOVANO OSVALDO SIMBOLON
188110039**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
2022**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 30/5/23

Access From (repository.uma.ac.id)30/5/23

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS SISTEM PENYANGGA PADA TEROWONGAN
PENGELAK PROYEK BENDUNGAN LAU SIMEME
KEC.SIBIRU-BIRU KABUPATEN DELI SERDANG,
SUMATERA UTARA


SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Dalam
Ujian Sidang Sarjana Teknik Sipil Sastra Satu
Universitas Medan Area

Disusun Oleh:

GEOVANO OSVALDO SIMBOLON
188110039

Disetujui Oleh:
Dosen Pembimbing


Ir. Nurmaidah, M.T
NIDN: 0108016101

Mengetahui:


Dean Fakultas Teknik
Dr. Ramad Syah, S.Kom., M.Kom
NIDN: 0105058804


Ketua Program Studi Teknik Sipil
Hermansyah, S.T., M.T
NIDN: 0106088004

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 30/5/23

Access From (repository.uma.ac.id)30/5/23

HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila dikemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Delitua, 16 Juni 2022



Geovano Osvaldo Simbolon

188110039



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR/SKRIPSI/TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Geovano Osvaldo Simbolon
NPM : 188110039
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Dengan pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul: "Analisis Sistem Penyangga pada Terowongan Pengelak Proyek Bendungan Lau Simeme Kec. Sibiru-biru Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara". Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Delitua
Pada Tanggal : 16 Juni 2022
Menyatakan



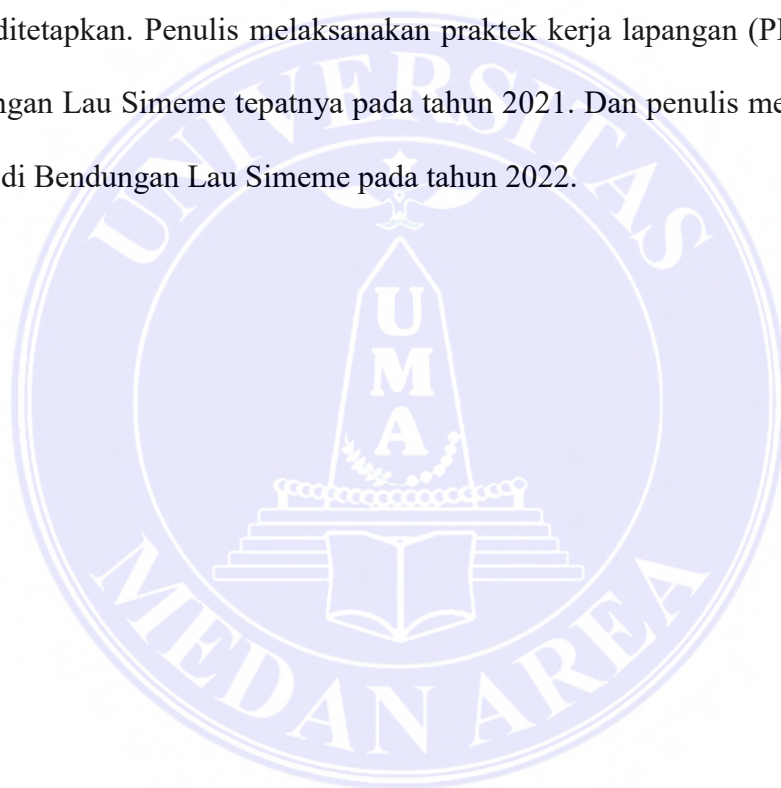
Geovano Osvaldo Simbolon
188110039

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Delitua. Pada tanggal 14 April 2000. Penulis merupakan putra ke 2 (Dua) dari 4 (Empat) bersaudara.

Penulis lulus dari SMA pada tahun 2018 dan pada tahun 2018 terdaftar sebagai mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area.

Selama mengikuti perkuliahan, penulis mengikuti seluruh mata kuliah yang sudah ditetapkan. Penulis melaksanakan praktek kerja lapangan (PKL) di Proyek Bendungan Lau Simeme tepatnya pada tahun 2021. Dan penulis mengambil judul skripsi di Bendungan Lau Simeme pada tahun 2022.



KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis Panjatkan Kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmatnya penulis dapat menyelesaikan Laporan Penelitian ini dengan judul “Analisis Sistem Penyangga pada Terowongan Pengelak Proyek Bendungan Lau Simeme Kec. Sibiru-biru Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara”

Terimakasih penulis sampaikan kepada ibu Ir. Nurmaidah,M.T selaku dosen pembimbing serta bapak Hermansyah,S.T.,M.T selaku Ka Prodi yang telah membantu penulis selama melaksanakan penelitian. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada ayah, ibu, serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir/skripsi/tesis ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan tugas akhir/skripsi/tesis ini. Penulis berharap tugas akhir/skripsi/tesis ini dapat bermanfaat baik untuk kalangan pendidikan maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Delitua, 16 Juni 2022

Geovano Osvaldo Simbolon
188110039

ABSTRAK

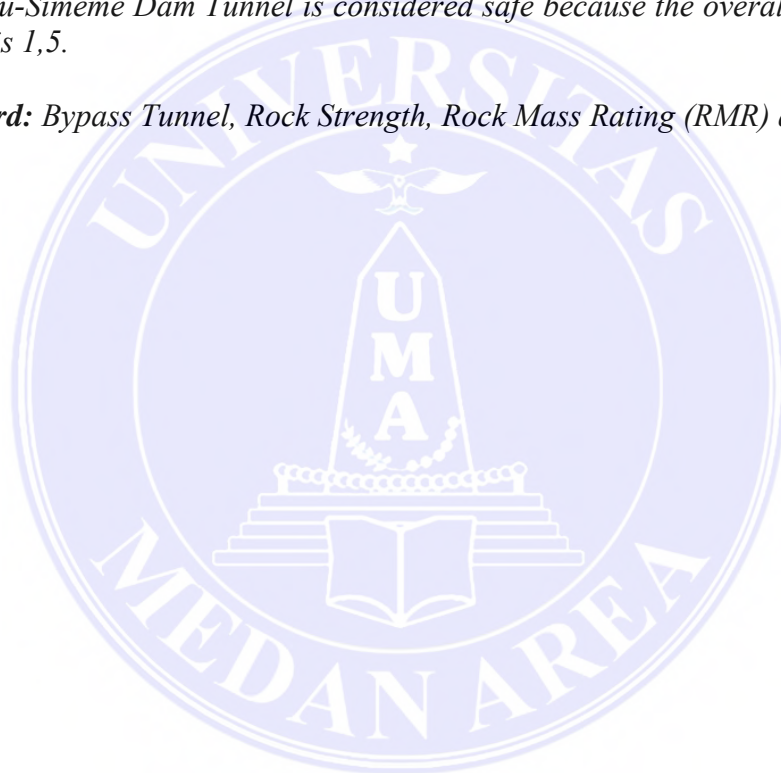
Terowongan ini merupakan bangunan pengelak yang berfungsi untuk mengalihkan air sungai selama konstruksi badan bendungan dibangun. Lokasi Terowongan ini terletak di Desa Kuala Deka, Kecamatan Sibiru-biru, Provinsi Deli Serdang, Sumatera Utara. Terowongan ini terdapat di bawah bukit oleh karena itu, diperlukan sistem penyangga di dalam terowongan agar terowongan dapat dikategorikan aman. Tujuan penelitian ini, untuk menganalisis tegangan-tegangan di sisi inlet dan memperhitungkan faktor keamanan terowongan. Sedangkan untuk mengetahui *stand-up time* terowongan ditentukan dengan menggunakan klasifikasi massa batuan Rock Mass Rating (RMR). Oleh karena itu, ketika menganalisis sistem pendukung hulu (*Inlet*) di STA 0+ 043.000, kami menyimpulkan bahwa sistem pendukung yang digunakan di sisi hulu terowongan adalah *rock bolts* dan *shotcrete*, berdasarkan pedoman Bieniawski (1989) termasuk batuan sedang (Kelas III) yang disurvei oleh ahli geologi, menghasilkan nilai RMR antara RMR 41 dan 60. Menurut perhitungan matematis, tegangan di sisi inlet adalah 11,758 MPa dan maksimum kekakuan adalah 41.221,137 MPa/m, sehingga faktor keamanan pada sisi inlet adalah 301,14 untuk atap dan 51,50 untuk dinding. Faktor keamanan terowongan secara keseluruhan adalah 1,5, sehingga terowongan bendungan Lau-Simeme dianggap aman.

Kata Kunci: Terowongan pengelak, Kuat massa batuan, *Rock Mass Rating* (RMR), dan tegangan

ABSTRACT

This tunnel is an alternative structure used to divert river water during construction of the dam body. Location The tunnel is located in Kuala Deca Village, Civilville District, Deli Serdang District, North Sumatra. Since this tunnel is located under a hill, a buffer system is required within the tunnel for the tunnel to be considered safe. The purpose of this study is to analyze the entrance side stress and calculate the safety factor of the tunnel. Rock mass classification (RMR) is currently used to determine the service life of tunnels. Analysis of the upstream support system "Inlet" shows that at STA 0+ 043.000 the support system used on the upstream side of the tunnel is I conclude that it is bedrock bolts and shotcrete. A geologist gives him an RMR value between RMR 41 and 60. Mathematically, the inlet stress is 11,758 MPa and the maximum stiffness is 41.221,137 MPa/m, so the inlet safety factor is 301,14 . 51,50 for roofs and walls. The Lau-Simeme Dam Tunnel is considered safe because the overall tunnel safety factor is 1,5.

Keyword: *Bypass Tunnel, Rock Strength, Rock Mass Rating (RMR) and Stress*



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

HALAMAN PERNYATAAN

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

RIWAYAT HIDUP

KATA PENGANTAR..... i

ABSTRAK ii

ABSTRACT iii

DAFTAR ISI..... iv

DAFTAR TABEL vii

DAFTAR GAMBAR..... ix

BAB I PENDAHULUAN..... 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 3

1.3 Batasan Masalah..... 3

1.4 Tujuan Penelitian 3

1.5 Manfaat Penelitian 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... 4

2.1 Penelitian Sebelumnya 4

2.2 Terowongan..... 8

2.2.1 Sistem Penyangga Terowongan 14

2.2.2 Sifat Batuan 14

2.2.3 Klasifikasi Massa Batuan 19

2.2.4 *Rock Mass Rating (RMR)* 19

2.2.5 Sistem Penyanggaan Terowongan Dalam Hubungan
Sistem RMR 31

2.2.6	Stand-Up Time	32
2.2.7	<i>Geological Strength Index (GSI)</i>	33
2.2.8	Metode Pembangunan Terowongan.....	35
2.2.9	Kuat Masa Batuan	50
2.2.10	Tegangan Batuan di Sekitar Terowongan	54
2.2.11	Analisis Perilaku Tegangan.....	55
2.2.12	Faktor Aman.....	58
2.3	Rumus Trigonometri Sudut Rangkap.....	59
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		61
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	61
3.2	Pelaksanaan Penelitian.....	61
3.2.1	Tahap Persiapan	61
3.2.2	Survei Pendahuluan.....	62
3.2.3	Pengumpulan Data	62
3.3	Analisa Data	65
3.4	Bagan Penelitian.....	67
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		70
4.1	Data Hasil Pengujian Laboratorium.....	70
4.2	<i>Rock Mass Rating (RMR)</i>	70
4.2.1	Inlet Tunnel/Tipe I (Sta.0+026.50 ~ 0+043.00).....	70
4.3	Kuat Massa Batuan	72
4.4	Tegangan di Sekitar Terowongan dengan <i>Kirsch Solution</i>	77
4.5	Analisis Perilaku Tegangan dan Faktor Aman pada Sistem Penyangga	80
4.5.1	Analisis Perilaku Tegangan pada Terowongan	80

4.5.2 Analisis <i>Safety Factor</i> (SF) pada Sistem Penyangga Terowongan.....	83
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	85
5.1 KESIMPULAN.....	85
5.2 SARAN	85
DAFTAR PUSTAKA	86
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

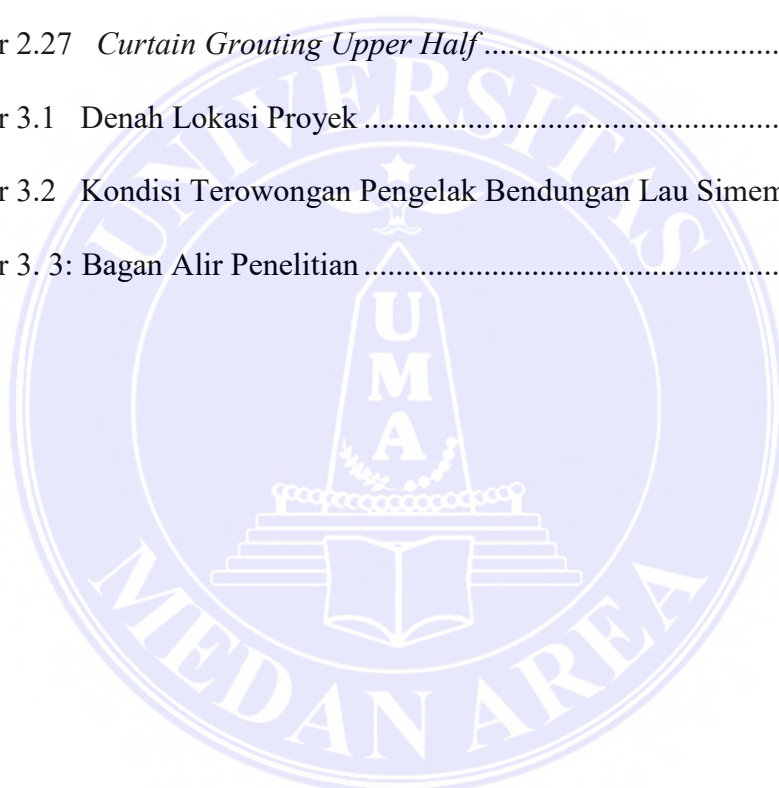
Tabel 2.1	Klasifikasi Teknis Batuan Utuh	21
Tabel 2.2	Klasifikasi Kekuatan Batuan Berdasarkan Nilai <i>Uniaxial Compressive Strength</i> / UCS	21
Tabel 2.3	Kualitas Massa Batuan Berdasarkan RQD	23
Tabel 2.4	Klasifikasi Jarak Kekar	24
Tabel 2.5	Klasifikasi Persistensi	25
Tabel 2.6	Klasifikasi Kekasaran	25
Tabel 2.7	Klasifikasi Deskripsi Kondisi Buka-an Kekar	26
Tabel 2.8	Pembobotan Kondisi Isian	27
Tabel 2.9	Pembobotan Klasifikasi Pelapukan.....	27
Tabel 2.10	Kondisi Air Tanah di Lapangan.....	28
Tabel 2.11	Efek Jurus/Kemiringan Diskontinuitas di Dalam Terowongan	29
Tabel 2.12	Penyesuaian Pembobotan Orientasi Diskontinuitas.....	30
Tabel 2.13	Kelas Massa Batuan Berdasarkan Nilai RMR	30
Tabel 2.14	Petunjuk Untuk Penggalian dan Penyangga Terowongan Batuan dengan Klasifikasi RMR.....	31
Tabel 2.15	Arti Kelas Massa Batuan.....	33
Tabel 2.16	Kelas Massa Batuan Berdasarkan GSI.....	34
Tabel 2.17	Jenis Metode Pembangunan Terowongan.....	35
Tabel 2.18	Urutan Pelaksanaan Galian dengan Metode Peledakan.....	38
Tabel 2.19	Nilai ρ Untuk Batuan Lunak	52
Tabel 2.20	Nilai m_i Untuk Batuan Lunak.....	53
Tabel 2.21	Klasifikasi Kestabilan Lereng.....	58

Tabel 2. 22	Trigonometri Sudut Istimewa	60
Tabel 3.1	Ketinggian Batuan di Atas Terowongan.....	63
Tabel 3.2	Hasil Analisis Kuat Massa Batuan.....	65
Tabel 3.3	Data Batuan di Sekitar Terowongan	65
Tabel 3.4	Hasil Analisis Tegangan di Sekitar Terowongan Menggunakan <i>Kirsh Solution</i>	65
Tabel 3.5	Data Teknis Bangunan Pengelak	67
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian Laboratorium.....	70
Tabel 4.2	Analisis RMR Sta.0+026.50 ~ 0+043.00.....	71
Tabel 4.3	Sifat-Sifat Batuan di Sekitar Terowongan	72
Tabel 4.4	Hasil Analisis Kuat Massa Batuan pada Terowongan	77
Tabel 4.5	Hasil Analisi Tegangan di Sekitar Terowongan menggunakan <i>Kirsch Solution</i>	79
Tabel 4.6	Nilai Faktor Aman Inlet Sistem Penyangga Terowongan	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Terowongan Cut and Cover	9
Gambar 2.2	Terowongan Batuan	10
Gambar 2.3	Mesin TBM	11
Gambar 2.4	Bentuk Terowongan Lingkaran.....	12
Gambar 2.5	Bentuk Terowongan Tapal Kuda	13
Gambar 2.6	Terowongan Bentuk Huruf “D”	13
Gambar 2.7	Bentuk Terowongan Persegi	14
Gambar 2.8	Penyebaran Tegangan di Dalam Contoh Batu yang Diuji (a) Teoritis dan (b) Eksperimental, (c) Bentuk Pecahan Teoritis dan (d) Bentuk Pecahan Eksperimental	16
Gambar 2.9	Regangan Sebelum dan Setelah Pengujian Kuat Tekan Batuan	18
Gambar 2.10	Kurva Tegangan-Regangan dari Pengujian Kuat Tekan Batuan ...	18
Gambar 2.11	Mencari Nilai RQD	22
Gambar 2.12	Kondisi Bukaan Aperture Kekar	26
Gambar 2.13	Klasifikasi Model Penggalian Terhadap Kemiringan Kekar	29
Gambar 2.14	Strike Kekar Tegak Lurus dengan Sumbu Terowongan dengan Arah Dip Melawan Arah Penggalian Sebesar 20°- 45°	29
Gambar 2.15	Perkiraan Nilai GSI untuk Setiap Kelas Massa Batuan	34
Gambar 2.16	Lubang Bor Stabil (Baut Tarik Batuan)	39
Gambar 2.17	Lubang Bor Stabil (Baut Geser).....	40
Gambar 2.18	Salah Satu Jenis Mesin Campuran <i>Wet Shotcrete</i>	41
Gambar 2.19	Sketsa Sederhana Sistem Campuran <i>Dry Shotcrete</i>	42
Gambar 2.20	Tipe Steel Rib.....	44

Gambar 2.21	Penampang Melintang dan Memanjang Tipikal Pola Perkuatan dan Dinding Terowongan.....	44
Gambar 2.22	Pengecoran Bagian Bawah.....	46
Gambar 2.23	Pembetonan Bagian Tengah.....	46
Gambar 2.24	Pembetonan Bagian Atas	47
Gambar 2.25	Persyaratan Contact Grouting	49
Gambar 2.26	Persyaratan Consolidation Grouting	49
Gambar 2.27	<i>Curtain Grouting Upper Half</i>	50
Gambar 3.1	Denah Lokasi Proyek	61
Gambar 3.2	Kondisi Terowongan Pengelak Bendungan Lau Simeme.....	62
Gambar 3.3	Bagan Alir Penelitian	69



DAFTAR NOTASI

E_C	:	Modulus Elastisitas <i>shotcrete</i>	(MPa)
E_G	:	Modulus elastisitas <i>grouting</i>	(MPa)
E_{sb}	:	Modulus elastisitas <i>rockbolt</i>	(MPa)
T_{bf}	:	Kuat tekan <i>rockbolt</i>	(MPa)
T_{gf}	:	Kuat tekan <i>grouting</i>	(MPa)
d_b	:	Diameter <i>rock bolt</i>	(m)
d_g	:	Diameter <i>grouting</i>	(m)
k_{sb}	:	Kekauan <i>rockbolt</i>	(MPa/m)
k_{sc}	:	Kekauan <i>shotcrete</i>	(MPa/m)
P_h	:	Tegangan horizontal	(MPa)
$P_{sb \text{ maks}}$:	Tegangan maksimum penyangga <i>rockbolt</i>	(MPa)
$P_{ss \text{ maks}}$:	Tegangan maksimum penyangga <i>shotcrete</i>	(MPa)
P_v	:	Tegangan vertikal	(MPa)
r_i	:	Radius terowongan	(m)
S_l	:	Jarak <i>grouting</i> menurut sumbu memanjang penggalian	(m)
S_l	:	Jarak <i>rockbolt</i> secara longitudinal	(m)
S_c	:	Jarak antar <i>grouting</i>	(m)
S_c	:	Jarak pemasangan <i>rockbolt</i>	(m)
t_B	:	Ketebalan blok	(m)
t_c	:	Tebal <i>shotcrete</i>	(m)
σ_1	:	tegangan utama mayor	(Kn/m ²)

σ_3	:	tegangan utama minor	(Kn/m ²)
h	:	Ketinggian batuan di atas terowongan	(m)
NATM	:	<i>New Austrian Tunneling Method</i>	-
RMR	:	<i>Rock Mass Rating</i>	-
RQD	:	<i>Rock Quality Designing</i>	-
UCS	:	<i>Uniaxial Compressive Strength</i>	-
σ_{cc}	:	Kuat tekan beton	(MPa)
σ_{ci}	:	Kuat tekan batuan utuh	(MPa)
H	:	Tinggi terowongan	(m)
l_g	:	Panjang <i>grouting</i>	(m)
l_b	:	Panjang <i>rockbolt</i>	(m)
ν	:	Angka poisson	(m)
γ	:	Berat isi batuan	(MN/cm ³)
θ	:	Sudut kuat geser batuan	°
ρ	:	Rasio kuat tekan	Poor
m_i	:	Nilai batuan utuh	Rock Type
a atau r	:	Jari-jari terowongan	(m)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bendungan Lau Simeme merupakan salah satu Proyek Nasional Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Kemen PUPR) yang dilaksanakan oleh Direktorat Jenderal Sumber Daya Air melalui Balai Wilayah Sungai (BWS) Wilayah II.

Kontrak pembangunan Bendungan Lau Simeme ditandatangani pada 22 Desember 2017 oleh dua mitra WIKA – BUMI KARSA, KSO dan PP – ANDESMONT KSO. Rencananya, Bendungan Lau Simeme akan membendung Sungai Percut dengan jalur Batu bertumpuk setinggi 69,5 meter, panjang 205 meter, dan lebar 11 meter dengan luas genangan 125,84 hektar. Total area penyimpanan 21,07 juta m³.

Jangka waktu pelaksanaan tahun anggaran 2017–2022 adalah 52 bulan (1567 hari kalender), sedangkan masa pemeliharaan adalah 12 bulan (365 hari kalender). Pekerjaan fisik bangunan akan dimulai pada 2017 dan selesai pada 22 Desember 2022.

Saat ini progres fisik pelaksanaan pembangunan Bendungan Lau Simeme telah mencapai 80% dengan jenis pekerjaan seperti terowongan *bypass*, bangunan *spillway* dan jalan pemukiman kembali.

Keberadaan bendungan ini dapat memberikan manfaat sebagai prasarana pengendalian banjir bagi Kota Medan dan Kabupaten Deli Serdang dengan menyalurkan air ke hulu sungai Percut dan Deli pada saat musim hujan. Selain

itu, bendungan Lau Simeme dioperasikan untuk memenuhi kebutuhan air baku Medan dan Deli Serdang sebesar ± 3.000 liter per detik.

Bendungan pada dasarnya terdiri dari banyak struktur, seperti struktur pelimpah, biasa disebut *spillway*, struktur penerima yang dikenal sebagai *intake*, struktur pengelak terowongan, dan struktur lainnya. Pembangunan Bendungan Lausimeme pertama-tama akan membutuhkan pembangunan struktur terowongan untuk mengalihkan aliran air sementara selama pembangunan bendungan.

Terowongan ini adalah salah satu struktur dari Bendungan Lau Simeme. Bangunan ini disebut juga bangunan pengelak berfungsi sebagai saluran untuk mengalihkan air sungai selama konstruksi badan bendungan yang akan dibangun. Saluran terbuka tidak dapat digali karena terowongan merupakan saluran tertutup dan saluran terhalang oleh bukit (Agustawijaya, 2016).

Tunneling sebuah bukit dilakukan dengan meledakkan dari pintu masuk ke pintu keluar secara bersamaan, atau dengan membombardir dinamit untuk mencapai persimpangan. Selama operasi peledakan, batuan di sekitar terowongan terganggu dan stabilitas terowongan terancam. NATM (*New Austrian Tunneling Method*) diperlukan sebagai metode konstruksi terowongan. NATM adalah proses plesteran bawah tanah yang memperkuat batuan dasar dan tanah itu sendiri dan mengompresi terowongan menggunakan semua metode yang tersedia. Oleh karena itu, diperlukan sistem penyangga di dalam terowongan agar terowongan dapat diklasifikasikan sebagai aman *shotcrete*, baut jangkar (*Rock bolts*), instalasi baja (*steel ribs*), dinding beton (*Concrete lining*), sementasi (*Grouting*).

1.2 Rumusan Masalah

Berapa tegangan yang diperlukan untuk mendukung konstruksi Terowongan Alternatif Lau Simeme agar dianggap aman untuk konstruksi terowongan?

1.3 Batasan Masalah

Dalam studi ini, hanya menganalisis tegangan di penyangga terowongan pengelak Tipe I yang terletak di sisi inlet terowongan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan bagi penelitian ini, untuk menganalisis tegangan-tegangan yang berhubungan dengan perancangan sistem pendukung terowongan untuk menentukan faktor keamanan terowongan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan rincian tentang perilaku beban sistem penyangga di Terowongan Bendungan Lau Simeme.
2. Sebagai evaluasi kestabilan alat penyangga dalam menumbuhkan faktor proteksi terowongan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Struktur alternatif membantu mengalihkan sungai saat bendungan dibangun. Bangunan ini, baik yang sedang dibangun atau sedang membangun, merupakan struktur yang perlu direncanakan dengan cermat untuk keberhasilan konstruksi bangunan. Secara umum, proyek sering menemui banyak kendala, baik mengenai kondisi cuaca maupun alat berat yang digunakan. Banyak aspek yang perlu diperhatikan agar pekerjaan dapat terlaksana sesuai rencana, baik secara konseptual maupun tepat waktu.

Ptera dkk. (2019), Menggunakan “*Metode Empiris untuk Konfirmasi Penyangga Terowongan Evasion Bendungan Beringin Sila*”, mengklasifikasikan batuan dasar sebagai dasar untuk memperkirakan jenis dukungan untuk Terowongan Evasion Bendungan Beringin Sila. Klasifikasi yang digunakan adalah klasifikasi sistem RMR Geomekanika dengan 6 parameter. Semua ini dapat diukur di tempat dan diperoleh dari data lubang bor. Parameter yang digunakan untuk klasifikasi RMR massa batuan adalah kompresi uniaksial material batuan, *lithology designation* (RQD), jarak diskontinuitas, status diskontinuitas, status airtanah, dan arah diskontinuitas. Hasil presentasi menunjukkan bahwa jenis batuan pada lubang alternatif bendungan Beringin-Sila terdiri dari *breksi tuf* dan *tuf cinder*. Dari perhitungan pembobotan global RMR diketahui bahwa kategori kelas massa batuan di sepanjang Terowongan Bendungan Bringin-Sila termasuk dalam kategori *Ugly Rocks* (Kelas IV). Tiang

penyangga di sepanjang terowongan adalah tiang penopang baja ringan sampai sedang dengan jarak 1,0 m menggunakan wire mesh 3 kg/m² dan *shotcrete* setebal 15 cm, dan baut batu dengan panjang sekitar 4-5m 1,0 - 1,5 m dengan baut batu spasi 1,0 - 1,5 m.

<https://www.scribd.com/document/428996043/ST5-Chandra-Putera-Dkk-Enggunaan-Metode-Empirik-Sebagai-Penentu-Penyangga-Terowongan-Pengelak-Bendungan-Beringin-Sila>

Quratu' Aeni (2014) dianugerahi judul penelitian “*Perilaku tegangan massa batuan menggunakan sistem penyangga grouting di Terowongan Pengelak Bendungan Pandan Duri Swangi Di Lombok Timur*”. Penelitian ini menggunakan perhitungan matematis, lokasi penelitian terletak di dalam side *tunnel* Waduk Pandan Duli, dan bentuk *side tunnel* terbagi menjadi 20 blok pada sisi masuk dan 36 blok pada sisi keluar. Sepatu kuda. Tebal cangkang beton 0,46 m, tinggi dan lebar terowongan alternatif 4,627 m dan 4,4 m, serta diameter terowongan yang akan dibangun 3 m. Jenis batuan yang diuji di lapangan terowongan alternatif antara lain breksi vulkanik dengan rasio toksin 0,301, densitas 2,278 ton/m³, *modulus Young* 6,5,10³ kg/cm², kohesi 3,82 t/m² dan sudut geser meningkat 30°. Analisis yang dilakukan oleh peneliti meliputi tegangan batuan, perpindahan, dan tegangan puncak dari sistem pendukung *grout* dan liner beton. Kajian tersebut mengungkapkan nilai tegangan vertikal dari 0,28 MPa hingga 0,625 MPa dan nilai tegangan horizontal dari 0,122 MPa hingga 0,67 MPa. Sistem penyangga lapisan beton memiliki beban maksimum 5,0418 MPa dan kekakuan 4002 MPa/m. Di sisi lain, tegangan maksimum yang dihasilkan oleh sistem pendukung injeksi adalah 1,4MPa hingga 3,1MPa, dan kekakuan setiap blok adalah 475MPa/m hingga 1044MPa/m.

<http://perpustakaan.ft.unram.ac.id/index.php?p=fstream-pdf&fid=224&bid=5512>

Yuyun Yunita (2016) melakukan penelitian tentang `` *Analisis Sistem Penyangga pada Terowongan Mila di Rababaka Kompleks Kabupaten Dompu* ". Penelitian ini dilakukan dengan perhitungan dan simulasi matematis menggunakan pemodelan SAP2000 V14. Untuk menganalisis tegangan yang terjadi pada sistem pendukung *Mira Tunnel*. Sistem pendukung yang digunakan di Terowongan Mira adalah shotcrete, baut batu, kolom baja, lapisan beton dan sistem pendukung nat. Berdasarkan analisis data yang dilakukan, tegangan total yang dihasilkan oleh tumpuan terowongan adalah 6,40 MPa dan kekakuan maksimum 4184,89 MPa/m. Total faktor keamanan pintu masuk adalah 31,68 untuk atap dan 36,89 untuk dinding, pintu keluar 31,23 untuk atap dan 36,42 untuk dinding, dan faktor keamanan terowongan adalah 1,5, sehingga Terowongan Mira dianggap aman.

<http://eprints.unram.ac.id/7253/1/ARTIKEL%20ILMIAH%20YUYUN%20YUNITA%20%28F1A%20012%20152%29.pdf>

Anggiet Roro Sakapakerti (2020) melakukan penelitian “*Analisis Pengaruh Geser Massa Batuan Terhadap Waktu Tunggu (Stand-Up Time) Terowongan Pengelak Beringin Sila, Kabupaten Sumbawa*” dengan menggunakan kriteria Mohr-Coulomb dan Hooke-Brown dan ditentukan secara massal dalam analisis dampak kekuatan geser massa batuan terhadap *rise time* Terowongan Sila Banyan di provinsi Sumbawa. sawah. Kunci kekuatan geser. Selain itu, untuk menentukan nilai umur layanan terowongan, gunakan pembagian gunung terowongan dan uji setiap pos pemeriksaan. Dari hasil perhitungan didapatkan kuat geser batuan pada masing-masing bagian Terowongan *Bypass Banyansila* sebesar 0,093 MPa pada

STA+240, 0,218 MPa pada STA+520, 0,241 MPa dan 0,075 MPa pada STA+660. Bintang +800. Di sisi lain, *latency (rise time)* adalah 6 jam untuk STA+240, 70 jam untuk STA+520, 150 jam untuk STA+660, dan 2 jam untuk STA+800. Dari uraian tersebut dapat dilihat pengaruh kekuatan geser batuan terhadap waktu tunggu pembukaan terowongan (*Stand-up time*). Tempat dimana waktu tunggu (*Stand-up time*) sampai terowongan terbuka cukup lama dan nilai kuat geser batuan penyusunnya tinggi.

<http://perpustakaan.ft.unram.ac.id/index.php?p=fstream-pdf&fid=2224&bid=8911>

Chikalistyanti Sudrajat (2020) memimpin tugas akhir “*Analisis Sistem Penyangga Pada Terowongan Pengelak Bendungan Beringin Sila Di Kabupaten Sumbawa*”. Berdasarkan hasil perhitungan matematis, sistem penyangga *shotcrete* memiliki nilai tegangan maksimum sebesar 0,30 MPa dan kekakuan sebesar 431,75 MPa/m. Sistem jangkar (*rockbolt*) memiliki nilai tegangan maksimum 0,83 MPa dan kekakuan 10,67 MPa/m. Pada jarak 1 m, sistem penyangga baja (*steel*) memiliki nilai tegangan maksimum 0,06 MPa dan kekakuan 123,72 MPa/m. Sistem penyangga *concrete lining* memiliki tegangan maksimum 5,59 MPa dan kekakuan 2697,21 MPa/m. Sistem penopang cor memiliki tegangan maksimum 1,52 MPa dan kekakuan 7,99 MPa/m. Dengan menggunakan software SAP2000 V.14, hasil analisis tegangan maksimum untuk sisi *inlet*, *middle*, dan *outlet* dari sistem *shotcrete* adalah 0,262 MPa, 0,417 MPa, dan 0,364 MPa. Tegangan maksimum untuk sistem balok baja pada sisi *inlet*, *middle* dan *outlet* adalah 0,174 MPa, 0,268 MPa dan 0,280 MPa. Tegangan maksimum sistem penopang *concrete lining* pada sisi *inlet*, *middle* dan *outlet* adalah 0,283 MPa, 0,525 MPa dan 0,468 MPa. Hasil pemodelan SAP2000 V-14. Tegangan total yang

dihasilkan oleh sistem pendukung terowongan adalah 0,72 MPa di pintu masuk, 1,21 MPa di tengah dan 1,11 MPa di pintu keluar. Nilai faktor keamanan sisi masuk adalah 4,70 untuk atap dan 1,79 untuk dinding, faktor keamanan terowongan perantara (tengah) adalah 7,10 untuk atap dan 2,66 untuk dinding, dan faktor keamanan sisi keluar adalah faktor keamanan terowongan. Atapnya 6,62 dan dindingnya 2,49. Faktor keamanan tegangan total yang dihitung adalah $\geq 1,5$ yang mengklasifikasikan Terowongan Beringin-Sila sebagai tahan runtuh.

<http://eprints.unram.ac.id/18565/1/Naskah%20Skripsi%20Chikalistyanti%20Sudrajat%20F1A016029.pdf>

2.2 Terowongan

Terowongan adalah infrastruktur bawah tanah yang lebih panjang dari lebar penggalian. Bentuk terowongan biasanya tertutup di semua sisi kecuali kedua ujungnya yang terbuka di pintu masuk dan keluar. Beberapa insinyur sipil mengartikan terowongan ini sebagai lorong pendek yang disebut *underpass*, yaitu lorong bawah tanah dengan panjang minimal 160,9 meter (0,1 mil) (Rahardjo, 2004).

Struktur terowongan dibuat untuk keperluan transportasi, tetapi terowongan umumnya dibangun untuk kondisi alam atau perkotaan dan tidak dapat dibangun di atas tanah. Transportasi kendaraan, drainase, irigasi, kereta api, dll.

Untuk membangun terowongan, perlu diketahui sifat-sifat tanah dan batuan, serta metode konstruksi terowongan yang optimal untuk kondisi tanah dan batuan. Metode yang umum digunakan dalam konstruksi terowongan adalah *Cut and Cover System*, *Pipe Jacking System (Micro Tunneling)*, *Tunneling Bor Machine*

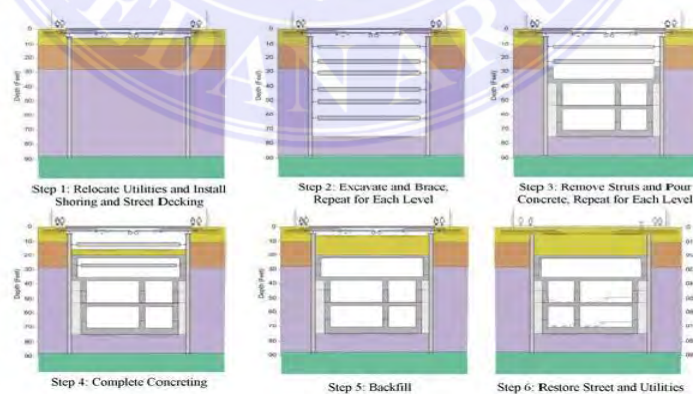
(TBM), *New Austrian Tunneling Method* (NATM) dan sistem terowongan pipa terendam.

Stabilitas terowongan terutama dipengaruhi oleh dua faktor. Batuan yang optimal meliputi kekuatan batuan, deformabilitas, kekuatan anisotropik, diskontinuitas, pelapukan, dan strategi mekanis seperti regangan batuan dan air tanah (Panthi, 2006).

Ada tiga jenis terowongan dalam konstruksi terowongan berdasarkan bahan konstruksi ialah:

1. Terowongan Tertutup Bumi

Terowongan dibuat dengan menggali parit besar, membuat struktur terowongan di parit, dan mengisi bagian atas setelah menempatkan struktur. Beton pracetak yang disebut gorong-gorong kotak digunakan dalam pembangunan terowongan ini. Metode ini hanya dapat digunakan jika terowongannya dangkal dan dapat digali dari permukaan.



Gambar 2.1 Terowongan Cut and Cover
Sumber: Ruang Sipil, 2018

2. Terowongan Batu

Terowongan batu dibor atau diledakkan (*drilling and blasting*) melalui batuan padat. Secara umum, terowongan batu lebih mudah dibangun dari pada terowongan tanah lunak. Hal ini karena batuan lebih keras dan lebih stabil, sehingga lebih mudah untuk mendapatkan tulangan yang diperlukan.



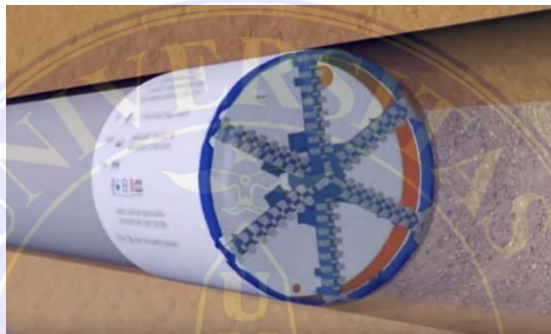
Gambar 2.2 Terowongan Batuan
Sumber: ENR (*Engineering News Record*)

3. Terowongan Tanah Lunak

Terowongan memiliki berbagai jenis tanah, termasuk tanah liat, pasir, dan batuan lunak. Material ini cenderung runtuh selama proses penggalian, maka diperlukan dinding dan atap yang kuat untuk melindunginya seiring dengan proses penggalian. Perisai biasanya digunakan untuk mencegah ekskavator runtuh. Metode konstruksi yang paling umum saat ini adalah *Tunnel Boring Machine* (TBM) untuk pemasangan perisai.

TBM adalah mesin bor terowongan yang menggali terowongan melingkar dengan penampang besar. Di dalam mesin TBM terdapat bagian yang berputar dan membuat terowongan melalui tanah. Contoh penggunaan TBM-nya di Indonesia adalah proyek MRT-nya di Jakarta. Beberapa keuntungan menggunakan alat TBM untuk membuat terowongan adalah proses pemboran

relatif cepat dan dinding terowongan bersih. Apalagi penggunaan alat ini juga sangat cocok digunakan di perkotaan. Namun kekurangan dari penggunaan *Tunnel Boring Machines* (TBM) adalah biaya awal yang sangat tinggi, sehingga biasanya hanya digunakan pada proyek skala besar. Persiapannya juga butuh waktu lama. Metode ini dapat diselesaikan dengan lebih efisien dan cepat, sehingga sangat cocok untuk proyek dengan penampang terowongan yang besar dan panjang.



Gambar 2.3 Mesin TBM

Sumber: *Er. Ow Chun Nam – Understanding of TBM*

Berdasarkan penggunaannya oleh Rai (1998), terowongan dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis:

a. Terowongan lalu lintas (*Traffic*)

Contoh penggunaan terowongan untuk lalu lintas:

1. Terowongan kereta api
2. Terowongan jalan raya
3. Terowongan navigasi
4. Terowongan tambang

b. Terowongan transportasi, termasuk:

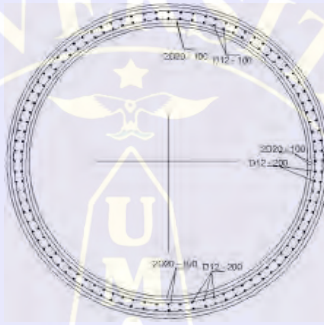
1. Terowongan pembangkit tenaga listrik (*Hydro Power*)
2. Terowongan persediaan air (*water supply*)

3. Terowongan air limbah (*sewerage water*)
4. Terowongan untuk utilitas umum

Berdasarkan bentuk terowongan yang biasa digunakan dalam infrastruktur, terowongan dibagi menjadi empat jenis terowongan:

1. Terowongan Lingkaran

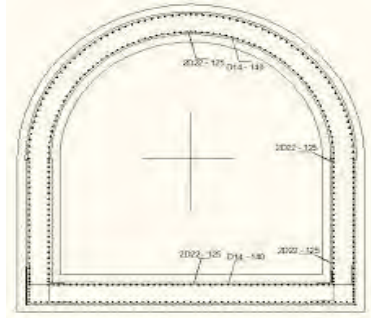
Terowongan lingkaran tidak hanya cocok untuk saluran air tetapi juga terowongan yang sangat baik yang tahan terhadap dampak internal atau eksternal yang tinggi.



Gambar 2.4 Bentuk Terowongan Lingkaran
Sumber: Balasubramanian, 2017

2. Terowongan Tapal Kuda

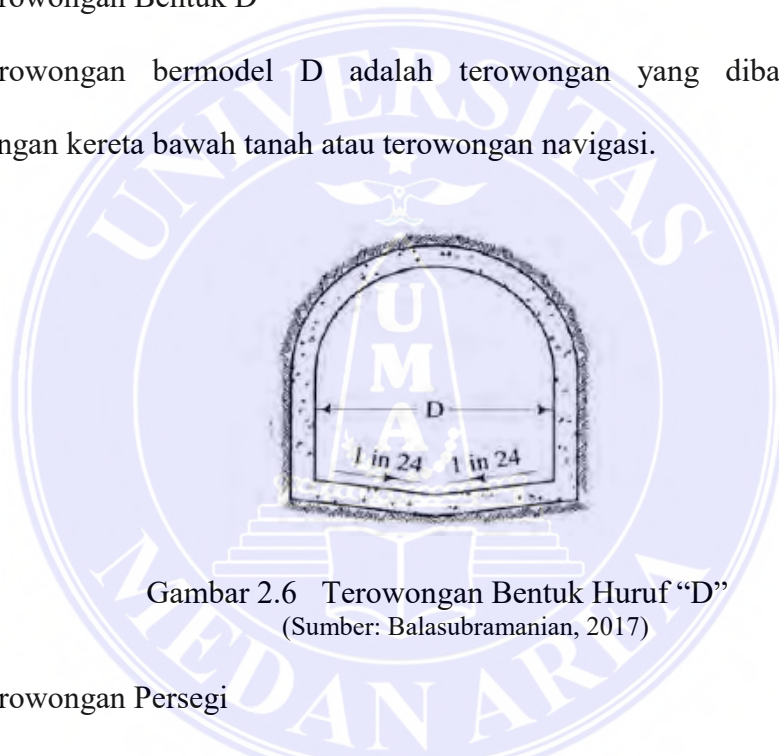
Terowongan tapal kuda memiliki atap semi-bola dengan dinding dan alas yang sedikit melengkung. Bentuk terowongan ini sangat baik digunakan pada batuan yang termasuk dalam kategori batu keras (*hard rock*). Pengoperasian terowongan ini, tanpa mengorbankan efisiensi hidraulik, tetap sama dengan luas penampang berbentuk bola dan baik untuk digunakan pada kondisi batuan keras. Terowongan ini juga cocok untuk konstruksi tanah lunak dan cocok untuk terowongan kereta api dan terowongan pengalihan bendungan.



Gambar 2.5 Bentuk Terowongan Tapal Kuda
(Sumber: Bahmanikashkooli, 2013)

3. Terowongan Bentuk D

Terowongan bermodel D adalah terowongan yang dibangun sebagai terowongan kereta bawah tanah atau terowongan navigasi.



Gambar 2.6 Terowongan Bentuk Huruf "D"
(Sumber: Balasubramanian, 2017)

4. Terowongan Persegi

Terowongan persegi adalah terowongan yang dibangun di atas lapisan batuan dasar yang keras, tetapi terowongan ini tidak ekonomis dan lebih sulit untuk dibangun.



Gambar 2.7 Bentuk Terowongan Persegi
Sumber: Wally, 2014

2.2.1 Sistem Penyangga Terowongan

Relaksasi tegangan batuan/tanah di sekitarnya biasanya terjadi sebagai akibat dari peledakan. Penurunan tegangan mempengaruhi stabilitas terowongan. Untuk mencegah hal tersebut perlu dipasang sistem penyangga di dalam terowongan sehingga kestabilannya tergolong aman. Sistem pendukung yang umum digunakan dalam konstruksi terowongan adalah *shotcrete*, *rock bolts*, *steel ribs*, *concrete lining* dan *grout*. Untuk penjelasan lebih rinci tentang jenis pembawa, kita akan membahas penggunaan metode NATM.

2.2.2 Sifat Batuan

1) Sifat Fisik Batuan

Sifat fisik batuan adalah sifat-sifat yang ditemukan setelah diuji tanpa merusaknya. Setelah semua batuan yang akan diperiksa disiapkan, ukur diameter dan tinggi masing-masing sampel dan hitung luas permukaan dan volumenya.

Beberapa sifat fisik batu adalah:

a. Bobot Isi

Massa jenis adalah perbandingan antara berat batu dengan volumenya.

Tergantung pada komposisinya, ada berbagai jenis bobot seperti:

- Massa jenis asli adalah perbandingan berat batu asli dengan volume batu.
- Densitas curah jenuh adalah rasio berat batuan jenuh terhadap volume batuan.
- Berat jenis kering adalah perbandingan berat batuan kering dengan volume batuan.

b. Specific Gravity

Dalam hal ini bobot dibagi menjadi dua kelompok. Dengan kata lain, berat jenis semu berarti rasio berat kering batu dengan berat air, dan berat jenis sebenarnya berarti rasio berat basah batu dengan berat air.

c. Kadar Air

Kadar air adalah perbandingan antara berat kadar air batuan dengan berat butir batuan itu sendiri dibagi dua, ialah:

- Kadar air asli adalah perbandingan (%) berat air asli dalam batuan dengan berat batuan itu sendiri.
- Kadar air jenuh adalah perbandingan berat air jenuh dalam suatu batuan dengan volume batuan tersebut.

d. Porositas

Porositas dapat didefinisikan sebagai rasio volume pori suatu batuan dengan volume total batuan, yang dinyatakan dalam persentase.

e. Angka Pori

Angka pori diartikan dengan artian perbandingan antara volume pori-pori batuan dengan volume batuan.

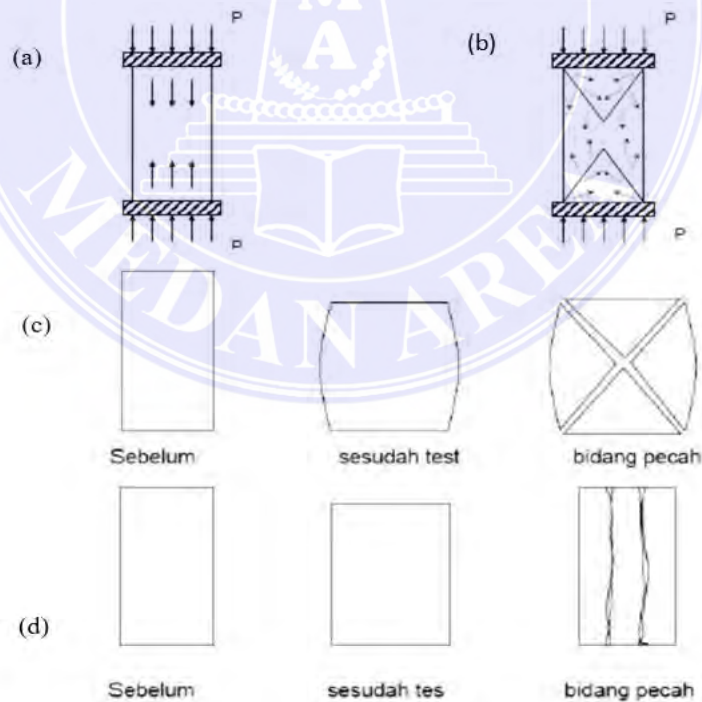
f. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan menyatakan bahwa, rasio kadar air asli terhadap kadar air jenuh, dinyatakan dalam bentuk %.

2) Sifat Mekanik Batuan

a. Pengujian Kuat Tekan Bebas

Uji tekan uniaksial adalah jenis pengujian di mana beban aksial diterapkan pada benda uji. Oleh karena itu, sampel tanah atau batuan dikompresi hanya dalam satu arah. Bentuk distribusi tegangan dapat diperhatikan pada gambar di yang tertera di bawah ini.



Gambar 2.8 Penyebaran Tegangan di Dalam Contoh Batu yang Diuji (a) Teoritis dan (b) Eksperimental, (c) Bentuk Pecahan Teoritis dan (d) Bentuk Pecahan Eksperimental

Sumber: Wally, 2014

b. Kuat Tekan Batuan

Kuat tekan batuan dinyatakan sebagai rasio tegangan pada saat runtuh dengan luas awal sampel. Pada percobaan ini permukaan sampel dibuat rata agar beban tetap merata di semua sisi.

c. *Modulus Young (Modulus Elastisitas)*

Modulus Young merupakan aspek penting dalam membandingkan deformasi batuan di bawah berbagai kondisi pembebanan. Nilai modulus Young untuk batuan berkisar dari pola ke pola karena variasi di dalam bentuk dan awal batuan (Mineral yang membentuk batuan).

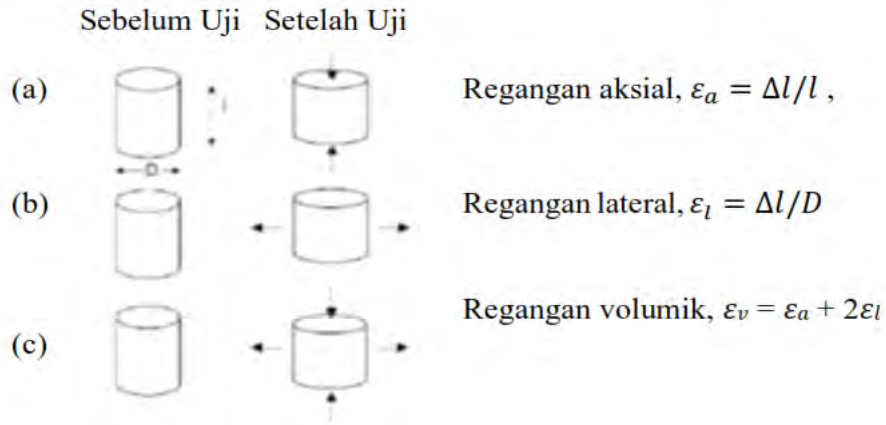
Beberapa faktor dapat mempengaruhi modulus, termasuk jenis batuan, porositas, ukuran butir, dan kadar air. Modulus elastisitas yang diukur tegak lurus lapisan lebih besar dari modulus elastisitas yang diukur sejajar dengan arah lapisan. Modulus elastisitas dapat dihitung dari hubungan antara tegangan aksial dan regangan aksial.

d. *Poisson Ratio*

Rasio *Poisson* adalah rasio mengerikan antara tekanan (Regangan) transversal dan tekanan (Regangan) aksial. Rasio Poisson menunjukkan bahwa ada pembesaran lateral karena tegangan aksial.

e. Kurva Tegangan – Regangan

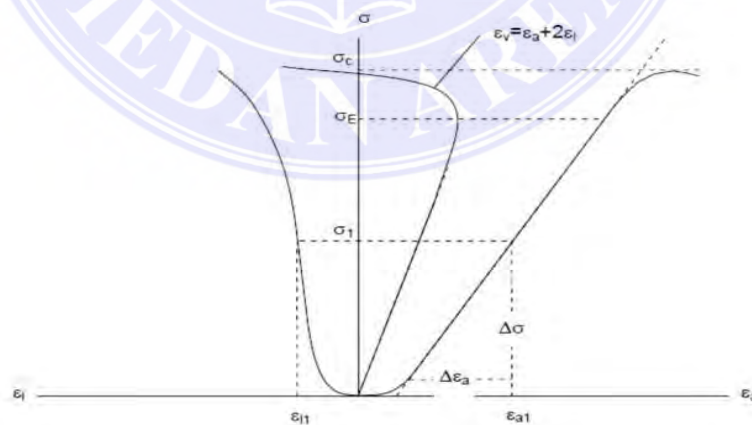
Di bawah ini adalah gambar regangan yang dihasilkan dari pengujian kuat tekan batuan.



Gambar 2.9 Regangan Sebelum dan Setelah Pengujian Kuat Tekan Batuan
Sumber: Wally, 2014

Hasil pengujian kuat tekan dapat direpresentasikan dengan kurva tegangan-regangan seperti pada gambar di bawah ini. Diagram kurva berikut dapat menentukan sifat mekanik batuan:

- Kuat Tekan (σ_c)
- Batas Elastik (σ_E)
- *Modulus Young* (E)
- *Poisson Ratio* (ν)



Gambar 2.10 Kurva Tegangan-Regangan dari Pengujian Kuat Tekan Batuan
Sumber: Wally, 2014

2.2.3 Klasifikasi Massa Batuan

Jenis massa batuan adalah cara mengklasifikasikan massa batuan melalui pengamatan yang berkaitan dengan bentuk dan kondisi bidang-bidang diskrit (Santoso, et al, 2016). Pengerjaan klasifikasi batuan harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

- a) Pengetahuan tentang parameter kunci yang mempengaruhi perilaku batuan.
- b) Mengklasifikasikan massa batuan ke dalam kelompok-kelompok yang menunjukkan perilaku yang sama di setiap kelas massa batuan.
- c) Mendeskripsikan ciri-ciri utama dari ciri-ciri masing-masing kelas gunung.
- d) Perbandingan bongkahan batu dari satu lokasi ke lokasi lain.
- e) Contoh Ekstraksi Data untuk Pedoman Desain (*Engineering*).
- f) Menyediakan data umum yang memfasilitasi komunikasi antara insinyur dan ahli geologi.

2.2.4 *Rock Mass Rating (RMR)*

Klasifikasi batuan dikembangkan berdasarkan sifat rekayasa untuk memecahkan masalah dan membuat keputusan yang baik dengan cepat, tetapi perhitungan yang lebih akurat memerlukan analisis empiris. Metode klasifikasi batuan yang terkenal dan banyak digunakan pada saat itu adalah *metode Rock Mass Rating (RMR)* yang dikenal sebagai geomekanika. Metode tersebut diperkenalkan oleh Bienawski (1972) dan Bienawski (1975), kemudian dikembangkan lebih lanjut sesuai dengan pengetahuan dari berbagai kasus dan disesuaikan dengan sistem prosedur standar saat ini (Bienawski, 1989). Metode klasifikasi berdasarkan sifat teknis batuan ini banyak dikenal dan digunakan untuk berbagai keperluan seperti: penggalian tambang, terowongan bawah tanah,

stabilisasi lereng, dll. Masing-masing diberi bobot atau nilai rating dan ditambahkan ke RMR keseluruhan.

Enam parameter yang digunakan dalam klasifikasi batuan dalam sistem RMR adalah:

1. Kuat tekan uniaxial batuan utuh (USC).
2. *Rock quality designation (RQD)*.
3. Spasi bidang dikontinuitas.
4. Kondisi bidang diskontinuitas.
5. Kondisi air tanah.
6. Orientasi/arah bidang diskontinuitas.

Metode klasifikasi ini membagi batuan menjadi wilayah yang berbeda dengan sifat yang sama berdasarkan enam parameter di atas, dan mengklasifikasikan batuan berdasarkan wilayah. Batas (Wilayah) tektonik biasanya disesuaikan untuk memperhitungkan perubahan geologi seperti sesar, perubahan kerapatan rekahan, dan perubahan jenis batuan. RMR ini dapat digunakan untuk terowongan, tanggul (*Embankments*) dan pondasi.

a. Kuat Tekan Uniaksial (UCS)

Kuat tekan bebas ditentukan dari inti batuan berdasarkan uji laboratorium yaitu uji kuat tekan bebas (UCS). Inti batuan dipilih karena penampakkannya yang utuh dan tidak terputus serta litologinya dipilih sebagai perwakilan daerah penelitian. Sampel yang diuji adalah silinder dengan rasio tinggi terhadap diameter (l/D) tertentu, yang sangat mempengaruhi nilai UCS yang diperoleh. Semakin besar rasio panjang terhadap diameter, semakin rendah kuat tekannya.

Sampel kemudian ditekan secara mekanis dari satu arah (*Uniaksial*). Pengujian

kuat tekan uniaksial dilakukan untuk mengetahui kuat tekan (σ_c), modulus elastisitas (E), dan rasio Poisson (ν) batuan. Saat menghitung nilai RMR, sifat kekuatan batuan utuh dibobot dengan nilai UCS (Kekuatan tekan bebas) atau nilai PLI (Indeks pemuatan titik).

Tabel 2.1 Klasifikasi Teknis Batuan Utuh

Deskripsi Kualitatif	UCS (MPa)	PLI (MPa)	Rating
Sangat Kuat Sekali (<i>Exceptionally Strong</i>)	>250	>10	15
Sangat Kuat (<i>Very Strong</i>)	100-250	4-10	12
Kuat (<i>Strong</i>)	50-100	2-4	7
Kuat Menengah (<i>Medium Strong</i>)	25-50	1-2	4
Lemah (<i>Weak</i>)	5-25		2
Sangat Lemah (<i>Very Weak</i>)	1-5	Penggunaan UCS lebih	1
Sangat Lemah Sekali (<i>Extremely Weak</i>)	<1	dianjurkan	0

Sumber: Bienawski, 1989

Tabel 2.2 Klasifikasi Kekuatan Batuan Berdasarkan Nilai *Uniaxial Compressive Strength* / UCS

Grade	Deskripsi	Identifikasi Lapangan	UCS (Mpa)
R6	Batuan Kuat Sekali	Percontoh hanya berupa chip menggunakan palu geologi	> 250
R5	Batuan Sangat Kuat	Percontoh membutuhkan banyak pukulan pukulan palu geologi untuk memecahkannya	100-250
R4	Batuan Kuat	Percontoh membutuhkan lebih sekali pukulan palu geologi untuk memecahkannya	50-100
R3	Batuan Kuat Menengah	Percontoh dapat dipecahkan dengan sekali pukulan palu geologi	25-50
R2	Batuan Lemah	Dapat dikelupas menggunakan pisau	5-25

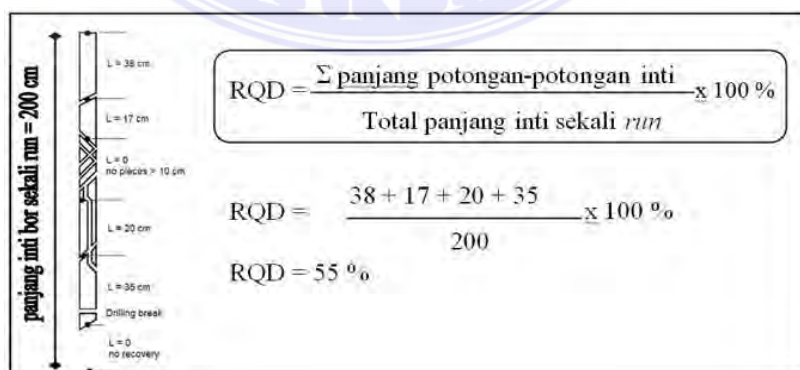
		secara hati-hati, titik lekukan dangkal menggunakan palu geologi	
R1	Batuan Sangat Lemah	Hancur dipukul menggunakan palu geologi dan dapat dikelupas menggunakan pisau	1-5
R0	Batuan Lemah Sekali	Dapat ditusuk menggunakan kuku tangan	0,25-1

Sumber: Hoek & Bray dalam Wyllie & Mah, 2004

b. *Rock Quality Designation (RQD)*

Cara sederhana dan cepat untuk menilai kualitas batuan berdasarkan keberadaan daerah diskontinu adalah dengan menghitung penunjukan kualitas batuan (RQD). Metode ini pertama kali digunakan oleh Dia et al. (1963) dan (Dear et al., 1967) dan (Dear et al., 1968). Ini pada awalnya digunakan sebagai metode penilaian kualitas batuan di terowongan berdasarkan deskripsi sampel batuan. Diperoleh dari Inti Bor (Core).

Menurut Deere dkk. (1967, Hoek, 1995), kualitas batuan dapat dinilai dengan menggunakan nilai RQD. Nilai RQD adalah tolok ukur kuantitatif berdasarkan deteksi inti bebas retak yang lebih besar dari 100 cm. RQD dapat didefinisikan sebagai pencapaian kualitas batuan yang baik.



Gambar 2.11 Mencari Nilai RQD
Sumber: Bienawski, 1989

Nilai RQD ditentukan dengan menghitung perbandingan panjang total inti sampel batuan raksasa yang panjangnya lebih dari 10 cm terhadap total inti batuan yang dihasilkan. Semakin tinggi persentase skor, semakin tinggi kualitas batu.

Tabel 2.3 Kualitas Massa Batuan Berdasarkan RQD

RQD	Kualitas Massa Batuan	Bobot
<25	Sangat jelek (<i>very poor</i>)	20
25 – 50	Jelek (<i>poor</i>)	17
50 – 75	Sedang (<i>fair</i>)	13
75 – 90	Baik (<i>good</i>)	8
90 – 100	Sangat Baik (<i>excellent</i>)	3

Sumber: Bienawski, 1989

c. Jarak Bidang Diskontinuitas (*Spacing of Discontinuities*)

Diskontinuitas adalah semua jenis titik lemah dan dapat berupa rekahan, sesar, strata dan lipatan, atau daerah diskontinuitas lainnya dalam massa batuan. Diskontinuitas tetap dapat terdiri dari tiga atau lebih rekahan berpasangan yang berpotongan untuk membagi massa batuan menjadi blok-blok yang lebih kecil, sehingga melemahkan massa batuan. Di lapangan yang diteliti, jarak diskontinuitas yang mengandung batuan lapuk memiliki pengaruh yang kuat terhadap kekuatan massa batuan di sekitarnya. Oleh karena itu, dalam konstruksi bangunan harus digunakan tumpuan sebagai tumpuan, karena batuan yang ditinjau tergolong lemah.

Tabel 2.4 Klasifikasi Jarak Kekar

Deskripsi	Spasi (m)	Rating
Sangat Lebar (<i>Very Wide</i>)	>2	20
Lebar (<i>Wide</i>)	0.6-2	15
Sedang (<i>Average</i>)	0.2-0.6	10
Rapat (<i>Close</i>)	0.06-0.2	8
Sangat Rapat (<i>Very Close</i>)	<0.06	5

Sumber: Bieniawski, 1989

d. Kondisi Bidang Diskontinuitas (*Condition of Discontinuites*)

Kondisi zona patahan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kekasaran, spalling, dan pelapukan batuan induk dan tanggul. Kekasaran dalam bidang merupakan komponen penting dari kekuatan geser, terutama pada sambungan yang dipindahkan atau diisi dengan bahan lain. Dalam pengamatan di tempat, kekasaran dapat diperoleh dengan memindai permukaan sambungan. Regangan adalah jarak vertikal yang mengisolasi batuan dinding rekahan yang tidak tertutup. Pengisi padat termasuk kalsit, klorit, tanah liat, lanau, dan kuarsa. Saat mengisi sambungan dengan material timbunan seperti batuan lapuk atau tanah, perlu dilakukan pengukuran ketebalan, jenis, dan kontinuitas material timbunan tersebut. Pengisi sambungan memiliki dampak yang signifikan pada kekuatan batuan karena bertindak sebagai perekat dan sebagai lapisan penyegel antara permukaan sambungan.

Batasan diskontinuitas terdiri dari 5 parameter tambahan:

1) Persistensi kekar

Persistensi digambarkan karena durasi diskontinuitas di dalam massa batuan. Panjang sambungan yang dimaksud menunjukkan berapa panjang sambungan yang diperiksa pada setiap titik. Contoh: Jika panjang sesar yang diverifikasi oleh

ahli geologi adalah 5 meter, maka dari tabel kita dapat melihat bahwa panjang sesar yang diverifikasi adalah 5 meter, yang dapat dalam rating 2.

Tabel 2.5 Klasifikasi Persistensi

Deskripsi	Panjang Kekar (m)	Rating
Persistensi Sangat Tinggi	>20	0
Persistensi Tinggi	10-20	1
Persistensi Menengah	3-10	2
Persistensi Rendah	1-3	4
Persistensi Sangat Rendah	<1	6

Sumber: ISRM, 1981

2) Kekasaran (*Joint Roughness*)

Kekasaran didefinisikan untuk menentukan bagaimana antarmuka bertindak sebagai penghalang antara blok atau mencegah geser di sepanjang antarmuka. Kekasaran dapat diamati di tempat. Kekasaran dapat diamati langsung di lokasi. Setelah mengetahui kondisi permukaan bidang kekar lalu perhatikan tabel dan sesuaikan.

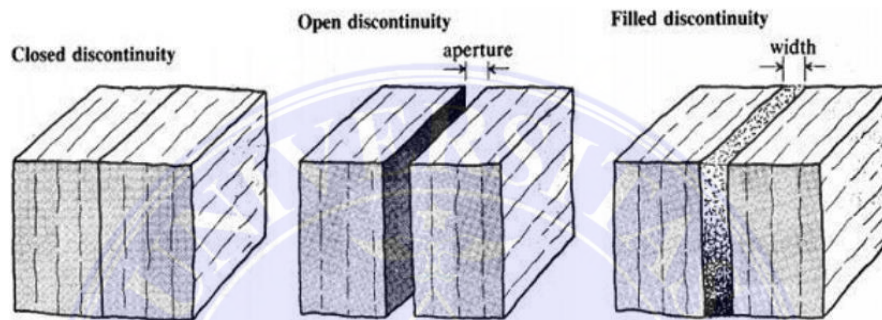
Tabel 2.6 Klasifikasi Kekasaran

Tingkat Kekasaran	Deskripsi	Bobot
Sangat Kasar (<i>Very Rough</i>)	Jika jenjang-jenjang yang terjadi dipermukaan bidang kekar hampir vertical	6
Kasar (<i>Rough</i>)	Jika kekasaran dapat dilihat dengan jelas dan apabila diraba masih terasa agak abrasif.	5
Kekasaran Rendah (<i>Slightly Rough</i>)	Jika kekasaran di permukaan bidang kekar baru dapat diketahui dengan jelas jika diraba dengan tangan.	3
Halus (<i>Smooth</i>)	Jika permukaan rekahan menjadi halus dan terasa halus ketika disentuh.	1
Licin (<i>Slickensided</i>)	Jika permukaan rekahan terlihat seperti poles.	0

Sumber: ISRM, 1981

3) *Aperture* atau pemisahan bukaan

Aperture dijelaskan karena lebar celah diskontinu yang mengontrol antarmuka. Pemisahan bukaan kekar biasanya sering terjadi di lapangan, baik yang besar maupun yang kecil. Dan pemisahan diukur pada jarak berapa, mengeksplorasi seberapa jauh bukaan umum dipisahkan oleh penjelajah dan ahli geologi.



Gambar 2. 12 Kondisi Bukaan Aperture Kekar
Sumber: ISRM, 1981

Perhatikan juga bahwa jenis pengisi apertur padat berisi pengisi apertur keras, sedangkan jenis lainnya berisi pengisi apertur yang lapuk (Lemah). Banyak bukaan retakan yang ditemui oleh ahli geologi di kedua lereng dan terowongan. Pengisian bukaan kekar yang lemah dapat dilihat juga batuan pengisinya berubah warnah dan pengisian nya bisa di hancurkan dengan tangan.

Tabel 2.7 Klasifikasi Deskripsi Kondisi Bukaan Kekar

Deskripsi	Lebar Bukaan	Rating
Tertutup	none	6
Sangat Terkunci Rapat	<0,1 mm	5
Sebagian Terbuka - Terbuka	0,1-1 mm	4
Terbuka-Terbuka lebar	1-5 mm	1
Sangat Lebar	>5 mm	0

Sumber: Bieniawski,1989

4) Isian (*Gouge*)

Karena diskontinuitas memiliki rongga, rongga ini dapat diisi dengan bahan lain, dan bahan pengisi biasanya terdiri dari pasir, kalsit, lempung, lanau, breksi, kuarsa, dan pirit. Didefinisikan sebagai pengisian rongga yang terisi, kekuatan geser bidang dapat terpengaruh.

Tabel 2.8 Pembobotan Kondisi Isian

Kondisi Isian	Rating
Tidak Ada (<i>None</i>)	6
Pengisian Keras (<i>Hard filling</i>) <5 mm	4
Pengisian Keras (<i>Hard filling</i>) > 5 mm	2
Pengisian Lunak (<i>Soft filling</i>) <5 mm	2
Pengisian Lunak (<i>Soft filling</i>) >5 mm	0

Sumber: Bieniawski, 1989

5) Pelapukan (*Weathering*)

Derajat pelapukan batuan di sekitar diskontinuitas mempengaruhi kekuatan geser dalam bidang dan kekuatan tarik. Ini karena pelapukan memutuskan ikatan antara partikel-partikel yang membentuk batuan.

Tabel 2.9 Pembobotan Klasifikasi Pelapukan

Kondisi Pelapukan	Rating
Tidak Lapuk (<i>Unweathered</i>)	6
Sedikit Lapuk (<i>Slightly Weathered</i>)	5
Lapuk (<i>Weathered</i>)	3
Sangat Lapuk (<i>Very Weathered</i>)	1
Hancur (<i>Destroyed</i>)	0

Sumber: Bieniawski, 1976

e. Kondisi Air tanah (*Groundwater Conditions*)

Saat menganalisis struktur terowongan, direkomendasikan untuk mengukur aliran air tanah dalam liter/menit per 10 meter panjang galian. Observasi lapangan digunakan dengan cara yang relatif sederhana. Artinya, setelah melihat dan menyentuh permukaan batu, kita dapat menggambarkan keadaan air tanah dalam hal: Kering (*dry*), Lembab (*moist*), basah (*wet*), menetes (*dripping*), mengalir (*flow*). Semakin tinggi kadar air batuan, semakin tinggi tekanan air pori.

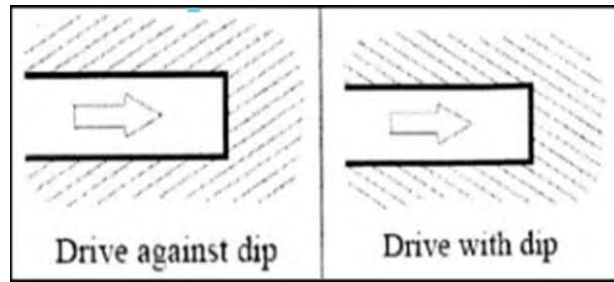
Tabel 2.10 Kondisi Air Tanah di Lapangan

Kondisi Airtanah	Bobot
Mengalir	0
Menetes	4
Basah	7
Lembab	10
kering	15

Sumber: Bieniawski, Z.T. 1989

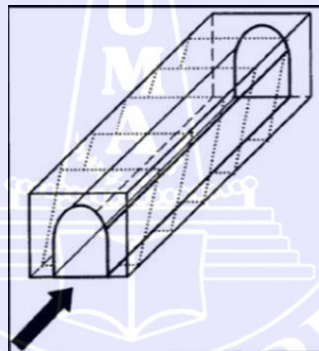
f. Orientasi Bidang Diskontinuitas

Arah diskontinuitas diwakili oleh gerakan (Tendangan) dan kemiringan. Pergerakan dicatat terhadap kutub utara magnet bumi, sedangkan kemiringan adalah sudut yang terbentuk antara bidang horizontal dan bidang yang memotong bidang miring. Sambungan dalam terowongan dikatakan baik jika posisi sambungan relatif tegak lurus terhadap sumbu terowongan dan buruk jika posisi sambungan relatif sejajar dengan sumbu terowongan. Misalnya, saat menggali terowongan atau membuka lereng, Anda mungkin perlu memperhatikan jahitan (Sambungan) yang menghadap bukaan, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah.



Gambar 2.13 Klasifikasi Model Penggalian Terhadap Kemiringan Kekar
 Sumber: Rai, Kramadibrata, dan Wattimena (2014)

Menurut Bieniawski dkk. (1981) dalam buku Rai et al. (2014) orientasi ia dapat dibagi menjadi dua jenis. Artinya, sambarannya sejajar dengan sumbu terowongan dan sambarannya tegak lurus terhadap sumbu terowongan. Gambar di bawah adalah contoh yang menunjukkan sambungan tegak lurus terhadap sumbu terowongan relatif terhadap arah pengeboran.



Gambar 2.14 Strike Kekar Tegak Lurus dengan Sumbu Terowongan dengan Arah Dip Melawan Arah Penggalian Sebesar 20°- 45°.
 Sumber: Rai, dkk (2014)

Tabel 2.11 Efek Jurus/Kemiringan Diskontinuitas di Dalam Terowongan

Arah Jurus Tegak Lurus Sumbu Terowongan				Arah Jurus Sejajar Sumbu Terowongan		Mengabaikan
Maju Searah Kemiringan		Maju Melawan Kemiringan		Terowongan		Jurus
Dip	Dip	Dip	Dip	Dip	Dip	Dip
45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	45°-90°	20°-45°	0°-20°
Sangat menguntungkan	Menguntungkan	Sedang	Tidak menguntungkan	Sangat tidak menguntungkan	sedang	sedang

Sumber: Bieniawski, 1989

Alat untuk menentukan kemiringan tanah adalah kompas geologi. Kompas geologi adalah alat teknis yang digunakan oleh ahli geologi untuk mengukur kemiringan suatu lereng guna menentukan arah dan besarnya sudut. Dengan menggunakan hasil kompas geologi, ahli geologi dapat menentukan apakah pembuatan terowongan akan sangat menguntungkan atau tidak.

Tabel 2.12 Penyesuaian Pembobotan Orientasi Diskontinuitas

Jurus dan kemiringan orientasi diskontinuitas	Sangat Aman	Aman	Sedang	Tidak Aman	Sangat tidak Aman
Terowongan	0	-2	-5	-10	-12
Pembobotan Pondasi	0	-2	-7	-15	-25
Lereng	0	-5	-25	-50	-60

Sumber: Agustawijaya, 2019

Tabel pembobotan orientasi Diskontinuitas di atas merupakan tabel pembobotan setiap bangunan konstruksi yang akan di bangun dimana pembobotan itu ada 3 yaitu terowongan, pondasi dan lereng. Pembobotan ini mempengaruhi jumlah hasil RMR (*Rock Mass Rating*) yang dihasilkan oleh para ahli geologi.

Tabel 2.13 Kelas Massa Batuan Berdasarkan Nilai RMR

Parameter	Deskripsi				
Rating	100 – 81	80 – 61	60 - 41	40 - 21	<20
Kelas massa batuan	Sangat baik (I)	Baik (II)	Sedang (III)	Buruk (IV)	Sangat buruk (V)
Stand-up time rata-rata	20 tahun untuk span 15m	1 tahun untuk span 10 m	1 minggu untuk span 5 m	10 jam untuk span 2,5 m	30 menit untuk span 1 m
Kohesi (kPa)	> 300	200 – 300	100 – 150	100 – 150	< 100
Sudut geser dalam	> 45°	40°- 45°	35° - 40°	30°- 35°	< 30°

Sumber: Agustawijaya, 2019

2.2.5 Sistem Penyanggaan Terowongan Dalam Hubungan Sistem RMR

Berdasarkan klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR), Bieniawski memberikan instruksi pengeboran dan penyimpanan batuan yang dikombinasikan dengan sistem RMR. Petunjuk ini berlaku untuk terowongan batu dengan lebar 10 meter, bentuk tapal kuda, tegangan normal kurang dari 25 MPa, metode pengeboran dan peledakan.

Desainer yang sangat muda mengetahui jenis dukungan yang digunakan dengan menguji massa batuan dengan metode RMR (*Rock Mass Rating*) dari setiap bagian terowongan menggunakan pedoman Bieniawski 1989.

Tabel 2.14 Petunjuk Untuk Penggalian dan Penyangga Terowongan Batuan dengan Klasifikasi RMR

Kelas Massa Batuan	Penggalian	Penyanggaan		
		Rock Bolt	Shotcrete	Steel Sets
Batuan sangat baik (Kelas I) RMR 81 – 100	<i>Full face</i> , dengan kemajuan 3 m.	Umumnya tanpa penyanggaan, adakalanya pengukuran dilakukan untuk memakai “ <i>spot bolting</i> ”		
Batuan baik (Kelas II) RMR 61 – 80	<i>Full face</i> , dengan kemajuan 1 - 1,5 m. Penyanggaan komplet 20 m dari face.	Lokalisasi, <i>bolt</i> pada atap sepanjang 3 m adakalanya dengan <i>wire mesh</i> .	50 mm di atap.	Tidak ada.
Batuan sedang (Kelas III) RMR 41 – 60	<i>Top heading</i> dan <i>bench</i> , dengan kemajuan 1,5 - 3 m.	<i>Bolt</i> sistematis panjang 4 m dengan spasi 1,5 – 2 m diatap dan didinding. Pada	50 – 100 mm di atap dan 30 mm di dinding (<i>sides</i>).	Tidak ada.

	Penyanggaan atap dibuat dimulai setelah dengan <i>wire</i> peledakan dan <i>mesh</i> . 10 m dari face.		
Batuan jelek (Kelas IV) RMR 21 – 40	Top heading dan bench, dengan kemajuan 1 – 1,5 m di top heading. Lakukan penyanggaan setiap 10 m penggalian dari <i>face</i> .	<i>Bolt</i> sistematis panjang 4 – 5 m dengan spasi 1 – 1,5 m di atap dan di dinding dengan <i>wiremesh</i> .	100 – 150 mm di atap dan 100 mm di dinding (<i>sides</i>). <i>Ribs</i> ringan – sedang dengan spasi 1,5 m.
Batuan sangat jelek (Kelas V) RMR <20	Multiple drifts dengan kemajuna 0,5 – 1,5 m di top heading. Buat penyangga setiap penggalian. <i>Shotcrete</i> segera dipasang setelah peledakan.	<i>Bolt</i> sistematis panjang 5 – 6 m dengan spasi 1 – 1,5 m di atap dan di dinding dengan <i>wire mesh</i> . Buat bolt di lantai (<i>Invert</i>).	150 – 200 mm di atap, 150 mm di dinding dan 50 mm pada <i>face</i> . <i>Ribs</i> sedang – berat dengan spasi 0,75 m dengan <i>steel lagging</i> dan <i>forepoling</i> .

Sumber: Bieniawski, 1989

2.2.6 Stand-Up Time

Metode ini diperkenalkan oleh Laufer pada tahun 1958. Dasar dari metode ini adalah bahwa terowongan didukung dengan bertambahnya bentang. Metode ini dapat digunakan dengan sangat baik untuk mengetahui evolusi klasifikasi

batuan di setiap pemboran. Ada beberapa faktor yang sangat mempengaruhi hasil *stand-up time*. Yaitu, arah sumbu terowongan, bentuk penampang, metode penggalian, dan metode penyanggaan. Masa pakai ditentukan oleh pembobotan RMR dan menunjukkan grade batuan yang dihasilkan.

Tabel 2.15 Arti Kelas Massa Batuan

No. Kelas	I	II	III	IV	V
<i>Stand up time</i> rata-rata & span	20 th, 15 m	1 th, 10 m	1 minggu, 5 m	10 jam, 2.5 m	30 menit, 1 m span

Sumber: Bieniawski, Z.T, 1989

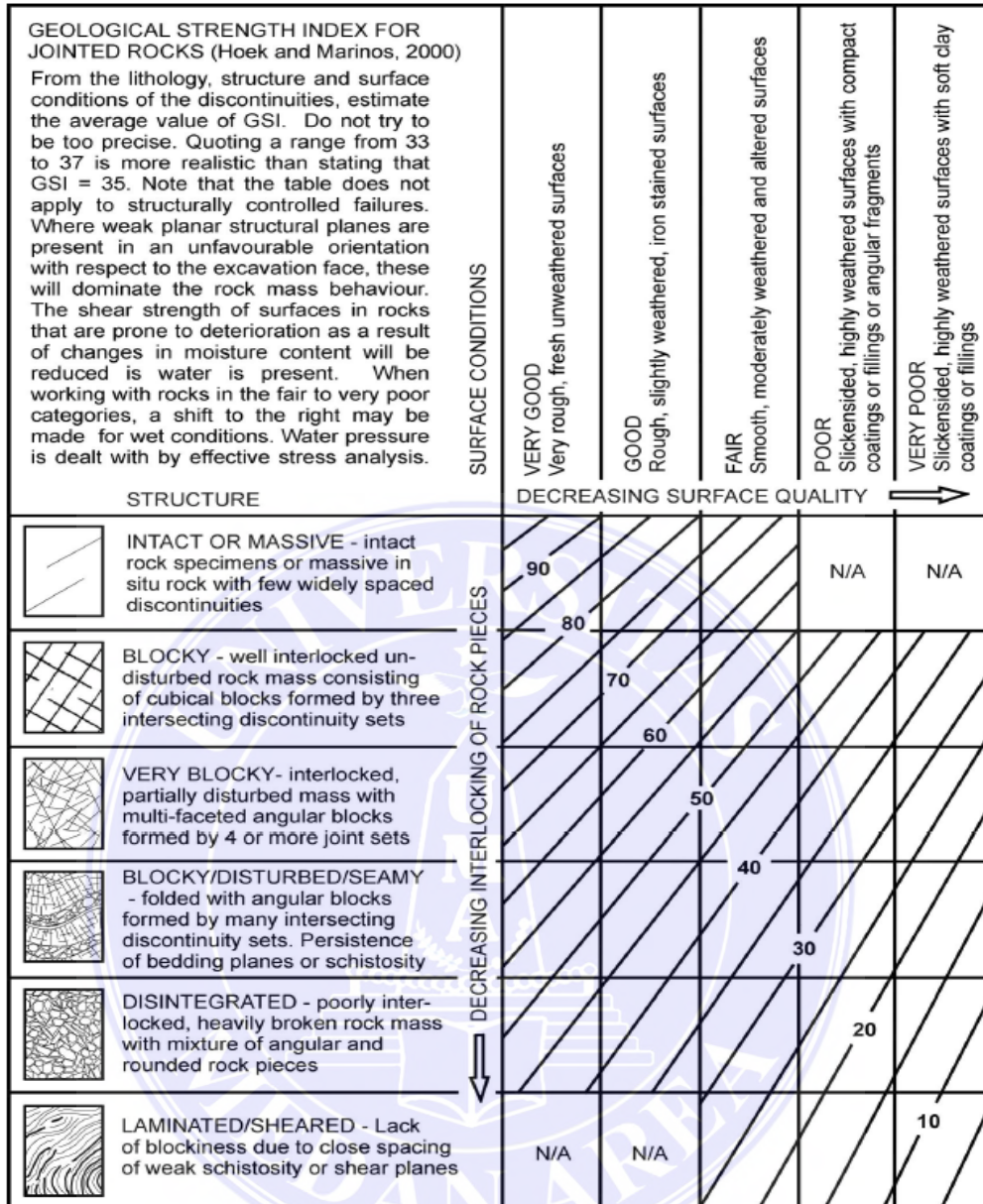
2.2.7 Geological Strength Index (GSI)

GSI merupakan standar evaluasi dari pengamatan geologi di lapangan. GSI dapat dihitung berdasarkan terjadinya pengamatan di lapangan atau berdasarkan klasifikasi RMR. Menurut Bieniawski 1989, GSI dapat dikonversi dari nilai RMR dengan relasi sebagai berikut:

$$GSI = RMR - 5$$

Hubungan diatas digunakan untuk nilai RMR >23, sedangkan untuk RMR <23 Barton et al's (1974) memberikan hubungan alternatif menggunakan parameter Q sebagai gantinya:

$$GSI = 9\text{Log}_e Q' + 44$$



Gambar 2.15 Perkiraan Nilai GSI untuk Setiap Kelas Massa Batuan
 Sumber: (Hoek, 1988)

Tabel 2.16 Kelas Massa Batuan Berdasarkan GSI

GSI Value	76 – 95	56 - 75	36 – 55	21 – 35	<20
Rock Mass Quality	Very Good	Good	Fair	Poor	Very Poor

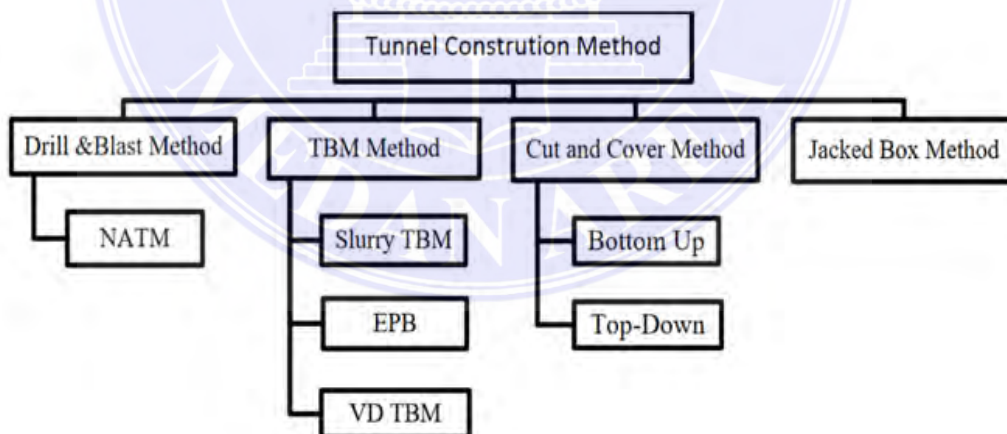
Sumber: Bieniawski, Z.T, 1989

2.2.8 Metode Pembangunan Terowongan

Jika Anda menggali terowongan tepat di bawah bukit, Anda pasti akan mengalami masalah. Ada beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan ketika memilih metode pengeboran terbaik. Pertimbangan harus diberikan pada ukuran dan bentuk terowongan yang direncanakan, berbagai komponen pendukung yang digunakan, kondisi tanah di lokasi, dan mesin yang tersedia. Berbagai metode konstruksi digunakan untuk konstruksi terowongan. Metode yang digunakan dalam proyek ini adalah *drill and blast* serta NATM (*New Austrian Tunneling Method*).

Ada dua jenis metode konstruksi terowongan dalam hal ini: metode bor dan ledakan dan metode NATM. Karena kondisi bebatuan bisa tergolong sangat baik dilapangan. Berikut adalah beberapa cara untuk membuat terowongan.

Tabel 2.17 Jenis Metode Pembangunan Terowongan



Sumber: PP-ANDESMONT KSO

A. *Drill and Blast/ Bor* dan Peledakan

Prinsip ini pertama kali dipraktikkan sekitar tahun 1627 oleh Tyrolean Kaspar Wendl dari tambang perak Banska Tiaunica. Pengeboran dan peledakan (*Drilling and blasting*) adalah kegiatan yang melibatkan penggunaan bahan peledak dan

proses terkontrol lainnya. seperti teknik peledakan tekanan gas. Area yang akan diledakkan pertama-tama dibor ke dalam retakan batu. Hal ini paling sering dilakukan di pertambangan, penggalian, dan teknik sipil seperti konstruksi bendungan, konstruksi terowongan, dan konstruksi jalan. Pengeboran dan peledakan saat ini menggunakan berbagai jenis bahan peledak dengan komposisi dan karakteristik kinerja yang berbeda. Peledak kecepatan yang digunakan pada batuan yang relatif keras akan memecah batuan, sedangkan peledak lambat digunakan pada batuan yang lebih lunak. Metode ini cocok untuk batuan berkekuatan rendah (Batu kapur, lempung, napal) atau batuan berkekuatan tinggi (Kuarsa, basal, gneiss, granit).

Oleh karena itu, proses pengeboran juga cocok untuk peledakan massa batuan karena sifatnya yang serbaguna. Batuan berkekuatan tinggi yang membutuhkan pengeboran dengan beban dinamis. *Metode drill and blast* adalah satu-satunya metode tunneling yang paling ekonomis dari dalam ke luar, menggunakan alat berat seperti *jumbo drill* untuk mencocokkan hasil penggalian dengan yang ada di lokasi.

Metode ini paling umum digunakan dalam penggalian dan pembuatan terowongan bawah tanah dan terdiri dari beberapa langkah seperti penggalian, pengisian lubang bor dan peledakan.

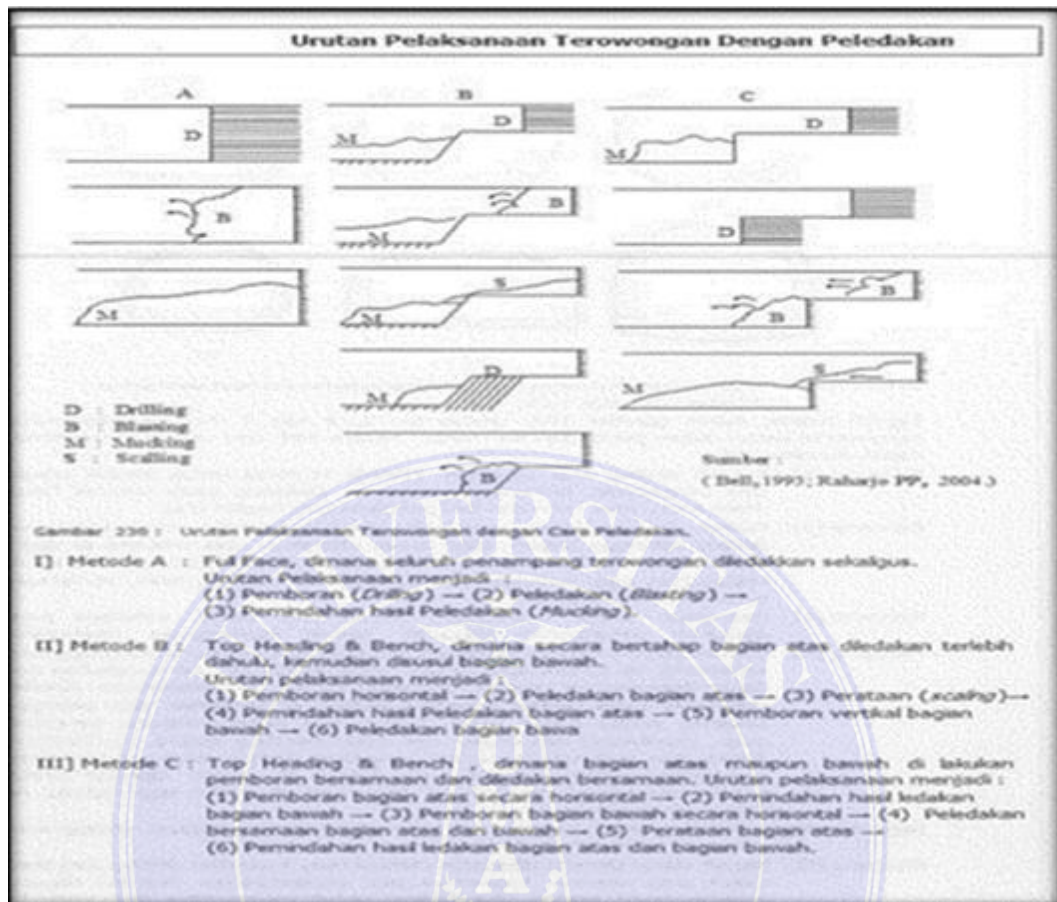
Metode konstruksi ini memiliki keunggulan fleksibel selama penggalian dan batuan pendukung seperti *shotcrete*, *wire mesh*, *rock bolts*, *steel rib* dan *grout*. Selain itu, karena metode pengeboran dan peledakan menggunakan peralatan pengeboran standar, waktu penyelesaiannya sangat singkat. Metode pengeboran dan peledakan kurang maju dibandingkan teknologi TBM. Dibandingkan dengan

metode *tunneling* TBM, metode penggalian dan peledakan lebih kecil tetapi memiliki biaya tenaga kerja keseluruhan yang lebih tinggi (*Girmscheid* dan *Schexnayder* 2002). Teknik pengeboran dan peledakan memiliki kelemahan dalam hal kebisingan, gas, debu dan serpihan yang beterbangan.

Metode *drill and blast* adalah metode peledakan muka terowongan. Dalam praktiknya, proses ini memiliki siklus *Drilling, Charging, Blasting, Mucking, scaling, Supporting dan Surveying* yang berkelanjutan. Siklus kegiatan diawali dengan *Drilling* atau mengebor dinding terowongan untuk membuat lubang sebagai wadah untuk menampung bahan peledak. Penentuan titik bor didasarkan pada kekerasan batuan (*Varshney, 2001*).

Selama pembongkaran, harus dikawal oleh TNI (Tentara Nasional Indonesia) untuk memastikan keamanan dan kesepian selama pembomboman terowongan. Pecahan atau bongkahan batu yang dihasilkan blasting akan di sortir material mana yang bisa digunakan dan material mana yang tidak baik digunakan.

Tabel 2.18 Urutan Pelaksanaan Galian dengan Metode Peledakan



Sumber: PP-ANDESMONT KSO

a. Konsep NATM (*New Austrian Tunneling Method*)

NATM adalah prosedur yang menggunakan semua metode yang tersedia untuk mewakili ruang bawah tanah dan memperkuat batu atau tanah itu sendiri sehingga terowongan dapat dipadatkan. Persyaratan untuk memperkuat batu dan tanah di terowongan adalah dengan menggunakan tindakan perlindungan seperti menempatkan *shotcrete* dan *rock bolt* sebagai penyangga sebelum membangun struktur lapisan. Pada dasarnya, NATM menggunakan kondisi batuan dan tanah di dalam terowongan. Dengan kata lain, ia bertindak sebagai struktur utama yang menopang kekuatan struktur terowongan, menstabilkannya menggunakan tekanan geologis batuan di sekitarnya.

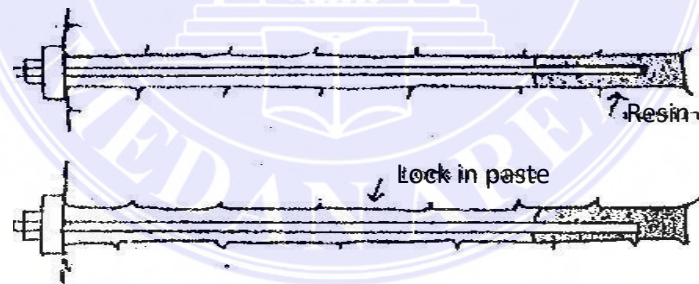
Dukungan yang digunakan dalam NATM adalah dukungan fleksibel bukan penyangga yang kaku (*Rigid*). Bahan pendukung yang digunakan untuk memperkuat struktur dinding sebelum konstruksi adalah yaitu beton semprot (*Shotcrete*), baut bautan (*Rockbolt*), penyangga baja (*Steel Rib*), dinding beton (*Concrete Lining*), dan *grouting*.

1) Baut Bautan (*Rockbolt*)

Menurut Singh (2006), baut batuan adalah batang baja penampang bulat yang digunakan untuk menopang massa batuan. Kekuatan baut biasanya diukur dengan pengujian tarik di tempat. Kekuatan baut batuan biasanya dilihat dari beberapa parameter seperti diameter, panjang dan jarak antar baut batuan.

a. *Tension Bolt* (Baut Tarik Batuan)

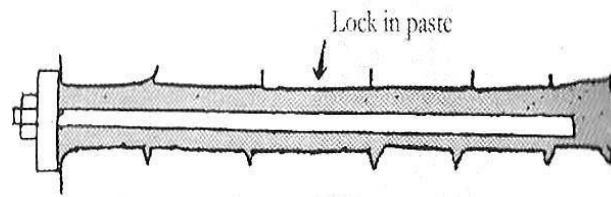
Jenis baut pengunci ini adalah baut pengunci aktif karena sudah dipres terlebih dahulu setelah dipasang.



Gambar 2.16 Lubang Bor Stabil (Baut Tarik Batuan)
Sumber: Hardjomuljadi, 2010

b. *Full Column Adhesive bolt* (*Baut Geser*)

Jangkar pengunci ini adalah jangkar pengunci pasif. Ini karena jangkar batuan ini bertindak (*Geser*) segera setelah deformasi batuan (*Deformasi radial* di dalam terowongan).



Gambar 2.17 Lubang Bor Stabil (Baut Geser)
Sumber: Hardjomuljadi, 2010

Bahan pengikat dan pengisi *rockbolt* dibedakan menjadi:

- *Resin*

Dalam hal ini dipakai yaitu bahan kimia yang ditempatkan dalam kemasan (*Tube*) berbentuk kapsul. Material ini dipakai pada kondisi batuan yang selalu basah atau lembab (*Moist*).

- *Inorganic Motar*

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

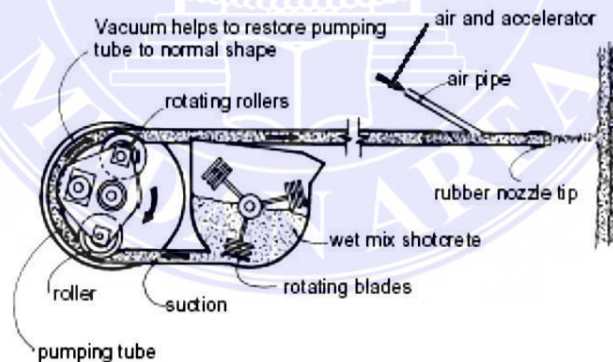
2) Beton Semprot (*Shotcrete*)

Beton semprot adalah campuran beton yang diaplikasikan dengan cara menyemprotkan campuran tersebut ke permukaan batuan pendukung atau pelindung. *Shotcrete* digunakan dalam konstruksi terowongan untuk menutup lubang konstruksi yang terbuka dan memperkuat rongga. *Shotcrete*, dalam kombinasi dengan elemen pendukung awal lainnya seperti *wiremesh* dan *steel support*, bertindak sebagai dukungan atau penyangga fleksibel untuk mencegah keruntuhan setelah peledakan.

Sifat *shotcrete* hampir sama dengan beton biasa, tetapi modulus elastisitasnya sedikit lebih rendah dari beton biasa. Setelah 28 hari, *shotcrete* sekeras beton yang dituangkan. Perendaman berikutnya akan meningkatkan kekuatan jika kelembaban yang cukup dipertahankan. Tergantung pada metode konstruksi, *shotcrete* dibagi menjadi dua jenis:

a. *Wet Shotcrete*

Shotcrete basah digunakan sebagai penguat kerja terbuka untuk portal terowongan. *Shotcrete* basah adalah campuran semen dan air yang disemprotkan dalam tabung. Keuntungan menggunakan *wet shotcrete* adalah dapat dicampur di tempat (*on-site kneading*) mengingat jarak dari pabrik ke tempat penggunaan sangat jauh dan transportasi ke tempat penggunaan membutuhkan waktu. Risiko pengerasan beton yang disemprotkan sangat tinggi, semakin mengurangi potensi limbah material.



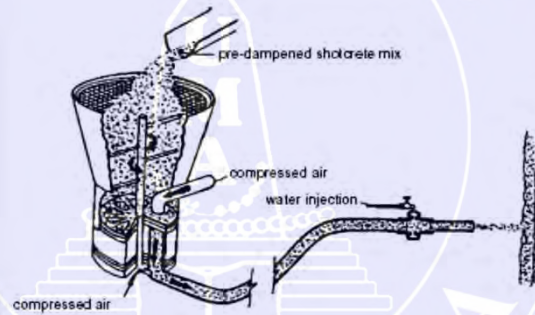
Gambar 2.18 Salah Satu Jenis Mesin Campuran *Wet Shotcrete*
Sumber: Agustawijaya, 2016

b. *Dry Shotcrete*

Bahan-bahan dicampur kering dan dilewatkan melalui tabung pencampur air. Metode ini digunakan untuk pekerjaan penyemprotan di terowongan yang

relatif basah dan dingin. Motivasi utama untuk menggunakan jenis *shotcrete* di terowongan adalah:

- Dinding terowongan akan mengeluarkan air, sehingga diharapkan tidak terjadi kelebihan air pada campuran.
- Karena ruang gerak yang terbatas di dalam terowongan dan area portal terowongan yang relatif kecil, implementasinya tidak memungkinkan pencampuran langsung. Jadi dalam hal ini *dry shotcrete* yang dicampur di *batching plant* adalah praktis dan ekonomis, karena material yang sudah tercampur kering dalam *transit mixer* tidak akan rusak/membatu dan tidak akan terpengaruh lamanya waktu penggunaan.



Gambar 2.19 Sketsa Sederhana Sistem Campuran *Dry Shotcrete*
Sumber: Agustawijaya, 2016

3) Wiremesh

Wire mesh yang umum digunakan termasuk *chailink mesh* dan *weld mesh*. *Chain link* digunakan untuk permukaan karena kekuatan dan fleksibilitasnya. *Weld mesh* yang diperkuat di sisi lain, terdiri dari kawat baja yang disusun dalam persegi panjang dan disolder pada sambungan untuk memperkuat dan memperkeras *shotcrete*. Dalam hal ini, *wire mesh* yang digunakan di Terowongan Lau-Simeme adalah *welded mesh*. Untuk membatasi kerikil agar tidak jatuh dan untuk memperkuat dan mengeraskan beton.

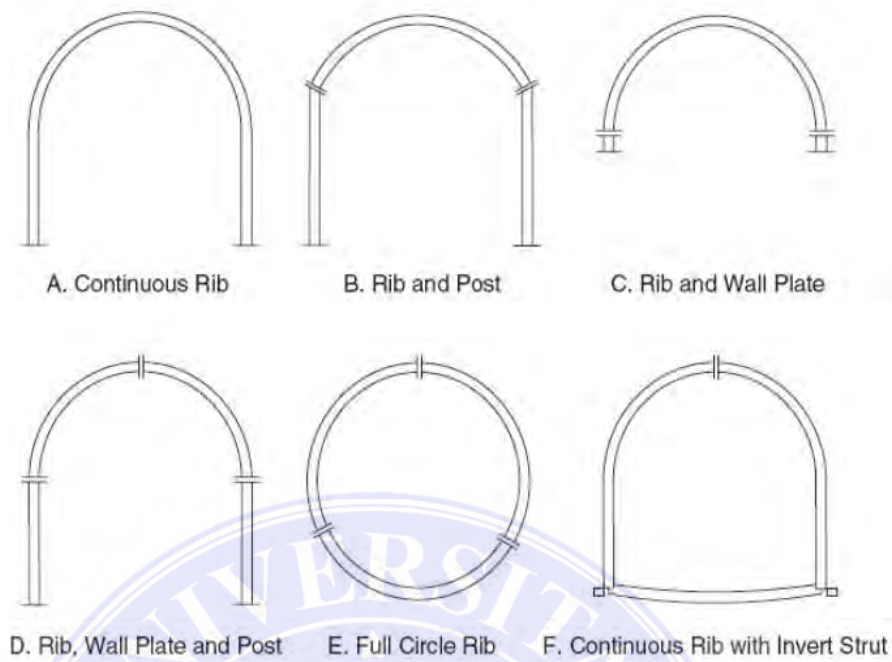
Dalam penulangan dengan wiremesh menurut beberapa spesifikasi dikelompokkan kedalam:

- *Light steel wiremesh*: diameter kawat = 1,40 mm, bukaan mesh 75 mm x 75 mm. Dipakai terutama proteksi permukaan galian dan terowongan.
- *Heavy steel wiremesh*: diameter kawat = 3,2 mm, bukaan mesh 100 mm x 100 mm. Dipakai sebagai struktur pelindung tebing dan dikombinasi dengan angkur batuan (*Rockbolt*).

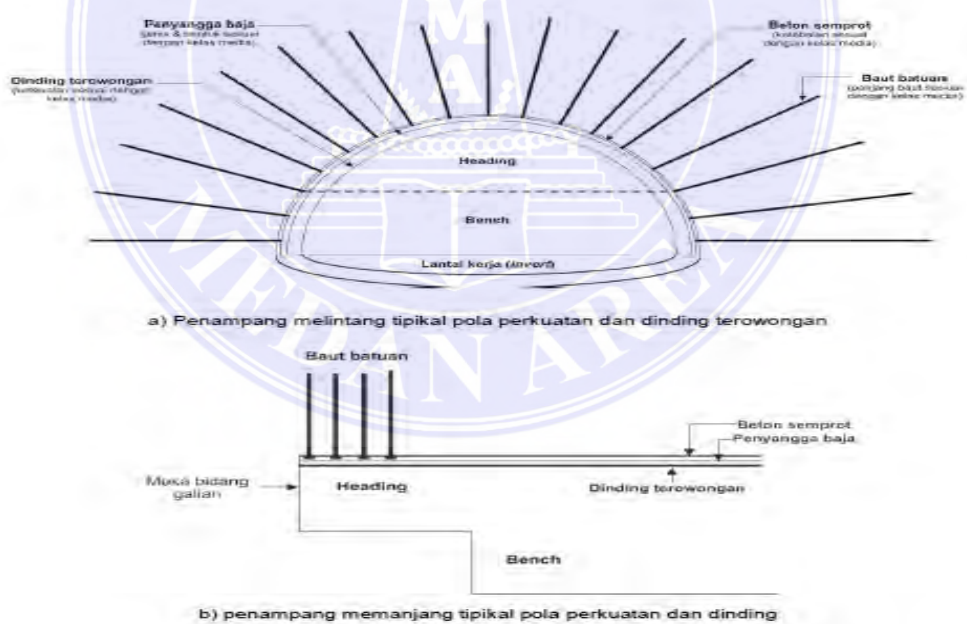
4) Penyangga Baja (*Steel Support*)

Penopang baja adalah jenis penopang terowongan baja yang berbentuk pelat besar, berbentuk seperti bentuk dimensi terowongan (Tapal kuda). *Steel support* digunakan dimana kondisi batuan sangat buruk (Rapuh). Pemasangan *Steel support* ini mempengaruhi kestabilan terowongan dengan memasang pengaku melintang (*Bar*) antara kolom baja dengan kolom baja lainnya.

Pemasangan kolom baja dilakukan bila kekuatan batuan diketahui sangat lemah. Oleh karena itu, seorang ahli geologi harus memverifikasi kekuatan batuan masing-masing STA yang akan dibor sehingga keruntuhan bisa ditopang dengan adanya penyangga yang terbukti dari pedoman Bieniawski 1989 untuk batuan yang diuji.



Gambar 2.20 Tipe Steel Rib
Sumber: Singh dan Rajnish, 2006



Gambar 2.21 Penampang Melintang dan Memanjang Tipikal Pola Perkuatan dan Dinding Terowongan
Sumber: Pedoman Metode Perencanaan Penggalan dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan, 2015

5) Dinding Beton (*Concrete Lining*)

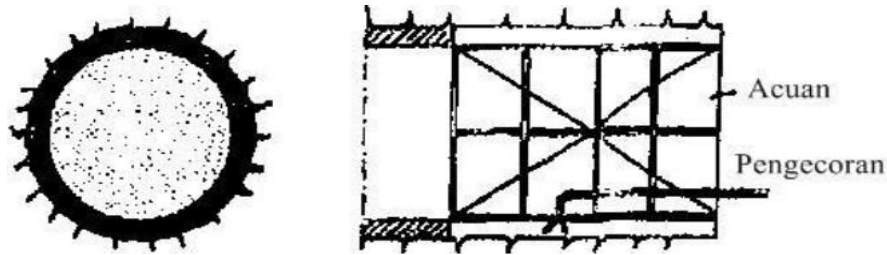
Terutama ketika membuat lapisan beton untuk terowongan, perawatan harus dilakukan untuk memastikan bahwa lapisan beton tidak rusak oleh beban. Dinding beton ini berfungsi untuk menopang tegangan batuan dan melindungi dari erosi. Tegangan dari luar (Air) dan dalam (Tanah) adalah tegangan tekan dan karena itu kurang penting. Tegangan akibat pembebanan batuan di dalam terowongan diserap oleh tumpuan awal.

Pengecoran beton pada dinding menggunakan bantuan alat sliding Form. Metode konstruksi *slipform* ini digunakan untuk memfasilitasi penuangan dinding dan untuk memastikan kualitas beton yang konsisten. Vibrator eksternal digunakan untuk membubarkan agregat sehingga tidak menumpuk di satu tempat selama penuangan.

Berikut beberapa ada beberapa tahap dalam melakukan pengecoran pada *concrete lining* yaitu sebagai berikut:

a) Bagian Bawah

Penuangan beton dari bawah terus dilakukan sampai semua bagian terisi penuh dengan beton, sampai dengan titik acuan yang dibuat sesuai rencana. Pengisian beton dari bawah ini dilakukan sampai beton benar-benar sudah dituang keseluruhan bagian sampai ke titik acuan yang sudah dibuat sesuai dengan desain. Pada saat berlangsungnya pengecoran bagian bawah akan menggunakan *vibrator* eksternal yang berfungsi untuk tidak terjadinya roga-roga kecil ataupun supaya material agregatnya dapat merata sampai ke semua sisi.

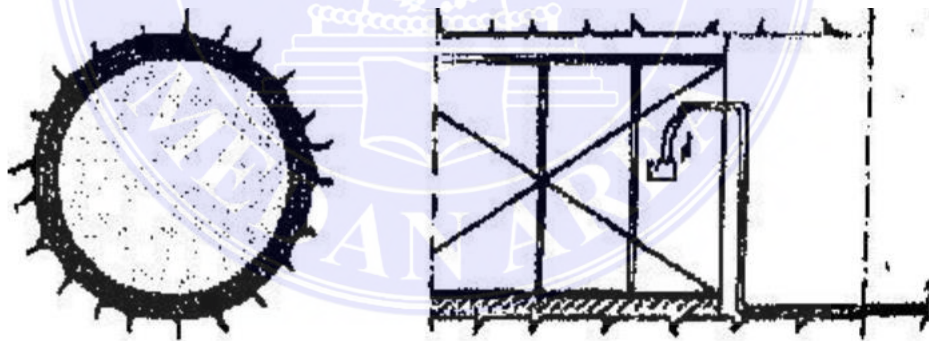


Gambar 2.22 Pengecoran Bagian Bawah
Sumber: Hardjomuljadi, 2010

b) Bagian Tengah

Pengisian bagian beton ini dilakukan pada bagian tengah cetakan. Dalam pengecoran ini yang perlu diperhatikan adalah keseimbangan tekanan pengecoran baik dari kiri maupun kanan acuan, sehingga jumlah material yang dipompa seimbang jumlahnya.

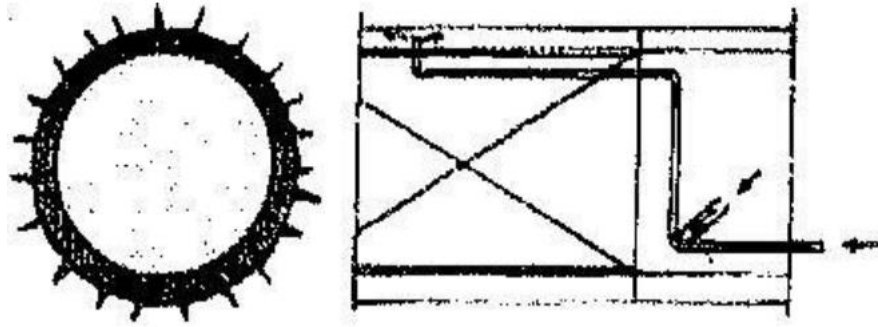
Setiap pengecoran baik dari bawah, tengah maupun atas harus dilakukan vibrator eksternal agar beton yang dituang merata dan tidak menghasilkan rongga atau retakan kecil.



Gambar 2.23 Pembetonan Bagian Tengah
Sumber: Hardjomuljadi, 2010

c) Bagian Atas

Pengisian beton bagian atas ini dilakukan melalui lubang yang terdapat di bagian atas dari acuan. Dalam hal ini, kecepatan tekanan dalam pengecoran akan berkurang dikarenakan bagian atas adalah bagian pengecoran yang tidak memerlukan tekanan pengecoran yang tinggi.



Gambar 2.24 Pembetonan Bagian Atas
Sumber: Hardjomuljadi, 2010

6) *Grouting*

Injeksi merupakan aspek terpenting dalam melakukan pekerjaan hidrolis pada umumnya dan konstruksi terowongan pada khususnya. Pekerjaan *grouting* dan *grouting* dilakukan pada batuan dasar dengan tujuan untuk memperbaiki sifat fisik (*Physical Properties*) konsolidasi *grouting* dan menghilangkan penurunan permeabilitas air dan rembesan (*Seepage*) yang disebabkan oleh air pegunungan pada *curtain grouting*.

Material ini paling sering digunakan dalam pekerjaan *grouting* terutama pada konstruksi terowongan berupa susu semen (*Cement milk*) dengan bahan tambahan berupa pasir dan *bentonit*, serta bahan tambahan (*Additive*) yang menambah atau mengurangi setting time.

Menurut Hardjomuljadi (2010), ada beberapa material penyusun yang digunakan dalam *grouting* antara lain:

a) *Portland Cement Slurry*

Material ini paling sering digunakan dalam operasi *grouting*, terutama konstruksi terowongan, berupa *cementmilk* dengan *aditif* (Tambahan) berupa pasir dan *bentonit*, serta *aditif* (Senyawa tambahan) yang menambah atau mengurangi waktu pengerasan.

b) *Chemical Grouting*

Senyawa kimia yang dicampur dengan air pertama-tama diterapkan pada celah-celah batu kecil atau batuan yang sangat lapuk dengan banyak pori-pori kecil, meninggalkan partikel-partikel tersuspensi dan tidak dapat ditembus. *Chemical grouting* yang paling banyak dipergunakan adalah sodium silicate (*Nasilicate*).

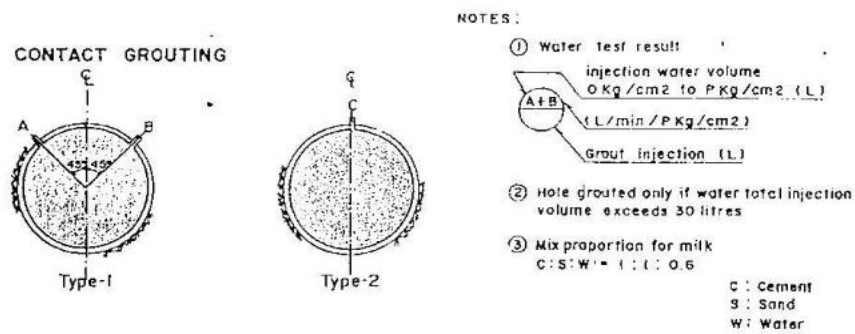
c) *Organic Resins*

Kelompok ini termasuk resin epoksi. Karena harganya yang mahal, jenis grouting ini jarang digunakan. Dalam pembuatan terowongan ia memiliki tiga jenis grouting tergantung fungsinya (Hardjomuljadi, 2010):

a. *Contact grouting*

Tujuan dari *grout* ini adalah untuk menyatukan lapisan dengan batuan sekitarnya, dengan cara mortar di dalam rongga antara lapisan dan permukaan shotcrete atau massa batuan. Bagian *invert* dan dinding samping terowongan, umumnya dapat terisi penuh dengan beton karena berat beton itu sendiri (Gravitasi) atau getaran yang diberikan oleh *vibrator*.

Khususnya pada bagian atas galian (*Crown*), meskipun beton ditempatkan dengan hati-hati, akan timbul rongga antara cangkang beton dan dinding/tanah galian batu. Rongga ini bertambah seiring dengan pengerasan dan penyusutan beton, sehingga penuangan kontak harus dilakukan bila beton telah mengeras setelah penuangan.

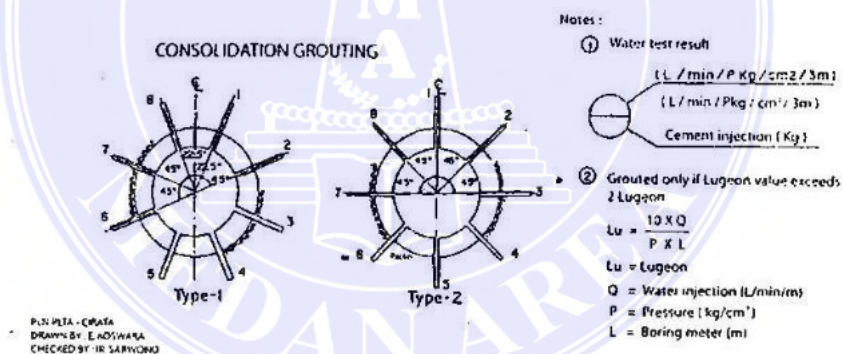


Gambar 2.25 Persyaratan *Contact Grouting*

Sumber: Hardjomuljadi, 2010

b. *Consolidation Grouting*

Tujuan utama injeksi konsolidasi adalah untuk memperbaiki sifat batuan dalam hal deformasi dan potensi kebocoran dengan menyuntikkan pasta semen atau montar ke dalam retakan batuan (*Fissure atau Joint*) di sekitar bagian terowongan.

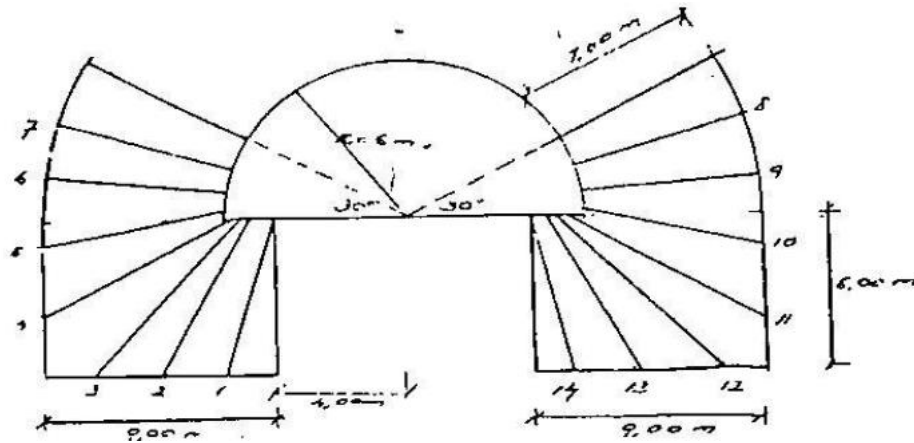


Gambar 2.26 Persyaratan *Consolidation Grouting*

Sumber: Hardjomuljadi, 2010

c. *Curtain grouting*

Tujuan *curtain grouting* adalah untuk menciptakan permukaan kedap air yang tegak lurus terhadap sumbu terowongan dan untuk memperpanjang aliran air (Infiltrasi air tanah), sehingga meningkatkan kedap air dari batuan dasar.



Gambar 2.27 *Curtain Grouting Upper Half*
Sumber: Hardjomuljadi, 2010

2.2.9 Kuat Masa Batuan

Menurut Martin, Kaiser dan McCreath (1998) dalam Munawar (2007), kegagalan *tunneling* dipengaruhi oleh ukuran batuan. Kegagalan sering disebabkan oleh perubahan tegangan dari mahkota, dinding samping, dan terowongan tunggal setelah penggalian selesai. Pada kedalaman menengah, keruntuhan diklasifikasikan sebagai keruntuhan lokal pada batas penggalian terowongan. Namun, jika kedalamannya cukup, keruntuhan terowongan akan terjadi di sekitar galian terowongan. Stabilitas terowongan juga dipengaruhi oleh faktor kedalaman dan metode tunneling yang digunakan.

Menurut Agustawajay (2011), persamaan *Coulomb* biasanya digunakan untuk material tanah gembur, yaitu partikel lunak yang biasanya bergerak saat terjadi keruntuhan. Kuat geser material ini membentuk garis patah yang menunjukkan hubungan antara tegangan normal dan kuat geser.

$$\tau = c + \sigma_n \phi \dots \dots \dots \text{(Pers. 2-1)}$$

Keterangan: τ = Kuat geser (MPa).
 c = Kohesi (MPa).

σ_n = Tegangan normal (MPa).
 ϕ = Sudut geser ($^\circ$).

Selanjutnya dalam persamaan ini, Agustawijaya (2011) menjelaskan bahwa nilai kuat geser (τ) bergantung pada nilai gaya kohesif (c), tegangan normal (σ), dan sudut geser (ν). Sudut kohesi dan geser menggambarkan sifat-sifat batuan dan tanah. Dalam kriteria keruntuhan *Mohr-Coulomb*, sangat penting untuk menentukan ekivalensi sudut gesekan dan nilai gaya kohesif untuk setiap massa dan regangan batuan. Rumus untuk sudut gesekan dan kohesi adalah:

$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-2)}$$

$$c = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1+a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+(6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/[(1+a)(2+a)]}} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-3)}$$

Untuk menentukan nilai σ'_{3n} dibutuhkan nilai $\sigma'_{3 maks}$. Nilai $\sigma'_{3 maks}$ untuk perencanaan terowongan dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\sigma'_{3 maks}}{\sigma'_{cm}} = 0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,91} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-4)}$$

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3 maks}}{\sigma_{ci}} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-5)}$$

- Keterangan:
- c = Kohesi massa batuan (k_N/m^2)
 - ϕ = Sudut geser dalam ($^\circ$)
 - σ_{ci} = Kuat tekan batuan uniaksial (k_N/m^2)
 - σ'_{3n} = Tegangan utama minor normal (k_N/m^2)
 - s, a dan m_b = Konstanta massa batuan.

Tabel 2.19 Nilai ρ Untuk Batuan Lunak

ρ	Deskripsi
1	Sangat baik (material batuan utuh)
0,2	Baik (batuan utuh namun terdapat beberapa <i>joint</i> dan <i>crack</i>)
0,02	Buruk (batuan hancur, mengalami pelapukan)

Sumber: Agustawijaya, 2011

Menurut Agustawijaya (2016), persamaan Hoek dan Brown awalnya dikembangkan untuk batuan keras yang mengalami rekahan. Model Kegagalan Rapuh dominan dan perilaku keruntuhan batuan ini. Namun, model keruntuhan biasanya menunjukkan karakter non-linier pada grafik tegangan utama terbesar dan tegangan utama terkecil, σ_1 dan σ_3 .

Dalam mengembangkan persamaan ini, Hoek dan Brown (1980) dalam Agustawijaya (2016) mempertimbangkan sejumlah besar data kekuatan dari berbagai jenis dan kedalaman batuan. Melalui trial and error, Hoek dan Brown merumuskan rumus empiris:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-6)}$$

dimana m dan s adalah konstanta yang bergantung pada sifat batuan. $s=1$ adalah material batu yang tidak terputus dan $s=0$ adalah material agregat. Tingkat m yang konsisten dari 7 untuk batuan karbonat hingga 25 untuk batuan beku dan metamorf (Brady dan Brown, 2004).

Konstanta m dan s dapat diambil dari klasifikasi batuan sistem RMR yang dikemukakan oleh *Bieniawski* (1989) (Brady dan Brown, 2004):

Untuk massa batuan terganggu:

$$\frac{m}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR-100}{14}\right) \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-7)}$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR-100}{6}\right) \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-8)}$$

Untuk massa batuan tidak terganggu:

$$\frac{m}{m_i} = \exp\left(\frac{RMR-100}{28}\right) \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-19)}$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR-100}{9}\right) \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-10)}$$

Tabel 2.20 Nilai m_i Untuk Batuan Lunak

<i>Rock type</i>	<i>Group</i>	<i>Rock</i>	<i>m_i</i>
<i>Sedimentary</i>	<i>Clastic</i>	<i>Breccia</i>	19
		<i>Sandstone</i>	17
		<i>Siltstone</i>	7
		<i>Claystone</i>	4
<i>Metamorphic</i>	<i>Foliated</i>	<i>Gneiss</i>	28
		<i>Schist</i>	12
		<i>Phyllites</i>	7
<i>Igneous</i>	<i>Pyroclastic</i>	<i>Breccia</i>	19
		<i>lapilli</i>	13
		<i>Tuff</i>	8

Sumber: Hoek et al, 2002

Hoek mengusulkan untuk mengganti parameter RMR oleh GSI, ketika massa batuan didominasi oleh struktur geologi. Dalam terminologi tegangan

utama terbesar (σ_1) dan tegangan terkecil (σ_3), bentuk persamaan Hoek-Brown dapat dilihat dalam persamaan berikut:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-11)}$$

$$\sigma_3 = k \cdot P_v \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-12)}$$

Dimana:

$$m_b = m_i \cdot \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right) \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-13)}$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right) \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-14)}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(\exp - \frac{GSI}{15} - \exp - \frac{20}{3} \right) \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-15)}$$

- Keterangan:
- σ_1 = Tegangan Utama Mayor (k_N/m^2).
 - σ_3 = Tegangan Utama Minor (k_N/m^2).
 - σ_{ci} = Kuat Tekan Material Batuan (k_N/m^2).
 - m_b, s, a = Parameter massa batuan.
 - D = *Disturbance factor* (0,8).
 - m_i, m = Nilai m untuk massa batuan utuh.
 - k = Koefisien Tegangan Lateral.
 - P_v = Tegangan Vertikal (MPa).
 - RMR = *Rock Mass Rating*.

2.2.10 Tegangan Batuan di Sekitar Terowongan

Berdasarkan persamaan (*Brady dan Brown, 1993*) untuk menghitung tegangan induksi pada atap terowongan (*Crown*) dan tegangan induksi pada dinding terowongan (*Wall*) terhadap batuan, diperoleh:

$$\text{Tegangan vertikal } p_v = \gamma h \dots\dots\dots \text{ (Pers. 2-16)}$$

$$\text{Tegangan horizontal } p_h = K p_v \dots\dots\dots \text{ (Pers. 2-17)}$$

- Keterangan: p_v = Tegangan Vertikal (MPa)
 p_h = Tegangan Horizontal (MPa)
 γ = Berat Isi Batuan (MN/m³)
 h = Kedalaman (m)
 K = Koefisien Tegangan Lateral

Persamaan ini dikenal dengan *Kirsch solution*. Untuk tegangan asal ganda, yaitu tegangan searah y sama dengan P, sedangkan searah x adalah k. P, distribusi tegangan di sekitar terowongan menjadi:

$$\sigma_r = \frac{P}{2} \left[(1+k) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-k) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] \dots\dots\dots \text{ (Pers. 2-18)}$$

$$\sigma_\theta = \frac{P}{2} \left[(1+k) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-k) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \dots\dots\dots \text{ (Pers. 2-19)}$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{P}{2} \left[(1-k) \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \right] \dots\dots\dots \text{ (Pers. 2-20)}$$

$$k = \left(\tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right)^2 \dots\dots\dots \text{ (Per. 2-21)}$$

- Keterangan: P = Tegangan vertikal (MPa).
 a = Jari-jari terowongan (m).
 r = Jari-jari terowongan (m).
 θ = Sudut antara sumbu vertical dengan garis r (°).
 k = Koefisien tegangan lateral.

2.2.11 Analisis Perilaku Tegangan

Menurut Hoek (2008), Hoek dan Brown (1980), dan Brady dan Brown (2004) memberikan persamaan mengenai analisis perilaku tegangan untuk menghitung tegangan maksimum pada setiap penyangga dari *steel support*, *rockbolt*, *shotcrete* atau *concrete lining dan grouting* untuk terowongan.

Di bawah ini adalah persamaan tegangan maksimum untuk setiap sistem pendukung terowongan:

- a) Tegangan maksimum sistem penyangga *rockbolt*, menggunakan persamaan sebagai berikut (Hoek, 2008):

$$P_{sb maks} = \frac{T_{bf}}{S_l \cdot S_c} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-22)}$$

Sedangkan untuk menentukan kekauan (*Stiffness*) dari *rockbolt*, dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$k_{sb} = \frac{E_{sb} \cdot \pi \cdot (d_b)^2}{4 \cdot l \cdot S_l \cdot S_c} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-23)}$$

- Keterangan: d_b = Diameter *rockbolt* (m).
 l_b = Panjang *rockbolt* (m).
 E_{sb} = Modulus elastisitas *rockbolt* (MPa).
 S_c = Jarak pemasangan *rockbolt* (m).
 S_l = Jarak *rockbolt* secara longitudinal (m).
 T_{bf} = Kuat tekan *rockbolt* (MPa).

- b) Tegangan maksimum sistem penyangga *shotcrete*, menggunakan persamaan sebagai berikut (Hoek dan Brown, 1980):

$$P_s maks = \frac{1}{2} \sigma_{cc} \left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-24)}$$

Sedangkan untuk menentukan kekauan (*Stiffness*) dari *shotcrete*, dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$k_{sc} = \frac{E_c (r_i^2 - (r_i - t_c)^2)}{2(1 - \nu^2) (r_i - t_c) r_i^2} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-25)}$$

- Keterangan: $P_s max$ = Tegangan Maksimum Penyangga (MPa).
 σ_{cc} = *Uniaxial compressive strength of the concrete* (MPa).

- r_i = Radius terowongan (m).
- t_c = Tebal *shotcrete* (m).
- k_{sc} = Kekakuan *shotcrete* (MPa/m).
- E_c = Modulus elastisitas *shotcrete* (MPa).
- ν = Rasio poisson (m).

c) Tegangan maksimum sistem penyangga *concrete lining*, menggunakan persamaan sebagai berikut (Hoek dan Brown, 1980):

$$P_s \text{ maks} = \frac{1}{2} \sigma_{cc} \left[1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] \dots \dots \dots \text{ (Pers. 2-26)}$$

Sedangkan untuk menentukan kekakuan (*Stiffness*) dari *concrete lining*, dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$k_{sc} = \frac{E_c(r_i^2 - (r_i - t_c)^2)}{2(1 - \nu_c^2)(r_i - t_c)r_i^2} \dots \dots \dots \text{ (Pers. 2-27)}$$

- Keterangan:
- $P_s \text{ max}$ = Tegangan Maksimum Penyangga (MPa).
 - σ_{cc} = *Uniaxial compressive strength of the concrete* (MPa).
 - r_i = Radius terowongan (m).
 - t_c = Tebal *concrete lining* (m).
 - k_{sc} = Tebal *concrete lining* (m).
 - E_c = Modulus Elastisitas *concrete* (MPa).
 - ν_c = Poison rasio *concrete* (m).

d) Tegangan maksimum sistem penyangga grouting, menggunakan persamaan sebagai berikut (Hoek, 2008):

$$P_s \text{ maks} = \frac{T_{gf}}{S_l \cdot S_c} \dots \dots \dots \text{ (Pers. 2-28)}$$

$$k_{sg} = \frac{E_g \cdot \pi \cdot g^2}{4 \cdot l \cdot S_l \cdot S_c} \dots \dots \dots \text{ (Pers. 2-29)}$$

- Keterangan:
- T_{gf} = Kuat tekan *grouting* (MPa).
 - S_c = Jarak antar *grouting* menurut permukaan (m).

S_l = Jarak *grouting* menurut sumbu memanjang penggalian (m).

k_{sg} = Kekauan dari *grouting* (MPa/m).

E_g = Modulus Elastisitas *grouting* (MPa).

l_g = Panjang *grouting* (m).

d_g = Diameter lubang *grouting* (m).

2.2.12 Faktor Aman

Faktor keamanan *Mohr-Coloumb* (*Safety Factor*) menunjukkan sebagai nilai banding antar gaya yang menahan dan gaya yang bekerja, seperti yang ditampilkan dalam persamaan berikut:

$$SF = \frac{\text{Kekuatan}}{\text{Tegangan yang bekerja}} \dots\dots\dots \text{(Pers. 2-30)}$$

Faktor keamanan (SF) dapat diartikan sebagai rasio antara gaya resistansi (Menahan) dan gaya *switching*/gerakan. Umumnya faktor keamanan adalah 1,2 sampai 1,5 ($SF \geq 1,5$) atau lebih tinggi (Hardiyatmo, 2019).

Tabel 2. 21 Klasifikasi Kestabilan Lereng

Faktor Aman	Klasifikasi Kestabilan Lereng	Keterangan
$F > 1,5$	Stabil	Hanya gangguan besar dapat membuat ketidakstabilan
$1,25 < F > 1,5$	Kestabilan Sedang	Gangguan ketidakstabilan sedang dapat membuat ketidakstabilan
$1 < F > 1,25$	Agak Stabil	Gangguan ketidakstabilan minor dapat mengganggu stabilitas
$F < 1$	Tidak Stabil	Memerlukan perbaikan stabilitas lereng

Sumber: Hary Christady Hardiyanto, 2019

2.3 Rumus Trigonometri Sudut Rangkap

Rumus trigonometri memiliki beberapa bagian yang di antaranya yaitu rumus jumlah, rumus perkalian trigonometri, rumus jumlah dan perkalian trigonometri, rumus sudut rangkap dua, rumus sudut rangkap tiga, serta rumus setengah sudut dan persamaan trigonometri. Dalam rumus trigonometri, selain ada rumus jumlah dan selisih dua sudut untuk memperhitungkan nilai suatu sudut yang bukan sudut istimewa terdapat rumus trigonometri sudut rangkap. Seperti halnya rumus jumlah dan selisih dua sudut, rumus sudut rangkap dipergunakan untuk menentukan nilai fungsi trigonometri untuk sudut tanpa adanya alat bantu hitung seperti kalkulator atau tabel. Besar sudut yang dicari dengan sudut rangkap pada umumnya bukan merupakan sudut istimewa trigonometri.

Sudut yang termasuk dalam sudut istimewa antara lain 30° , 45° , 60° , 90° , dan beberapa sudut khusus lainnya. Contoh sudut tidak khusus adalah 75° , 105° , dan seterusnya. Rumus trigonometri sudut ganda memiliki tiga persamaan trigonometri yang melibatkan fungsi sin, cos, dan tan dari beberapa sudut sesuai dengan rumus berikut:

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha \dots\dots\dots \text{(Per. 2-31)}$$

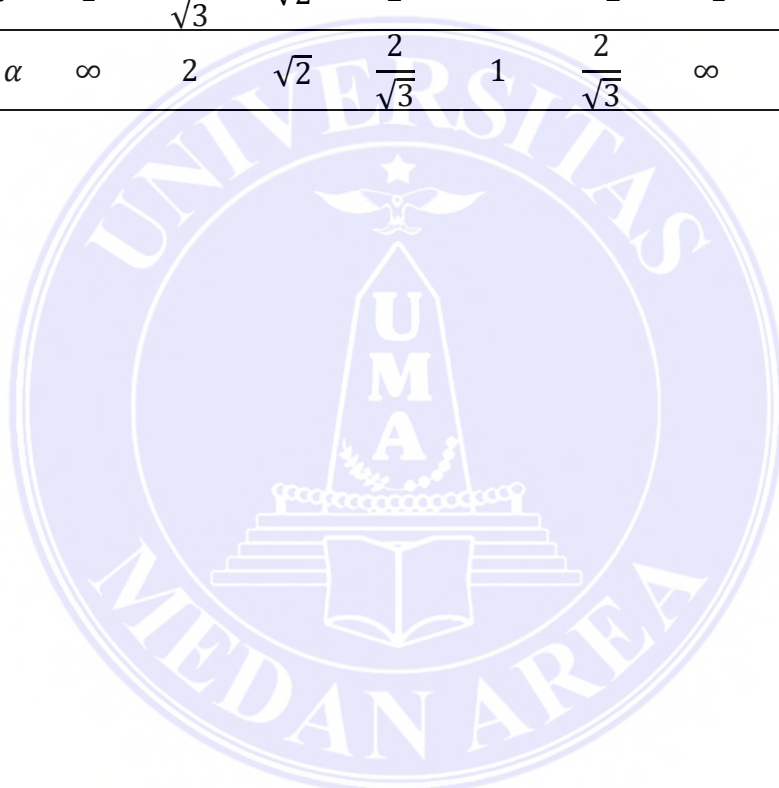
$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha = 1 - 2 \sin^2 \alpha = 2 \cos^2 \alpha - 1 \dots\dots\dots \text{(Per. 2-32)}$$

$$\tan 2\alpha = \frac{2 \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha} \dots\dots\dots \text{(Per. 2-33)}$$

Sudut rangkap biasanya dinyatakan sebagai sudut 2α . Rasio trigonometri sudut ganda, $\sin 2\alpha$, $\cos 2\alpha$, dan $\tan 2\alpha$, dapat dinyatakan dalam rasio trigonometri sudut tunggal. Nanti kita sebut rumus trigonometri yang mengandung sudut 2α dan sudut, rumus trigonometri sudut ganda.

Tabel 2. 22 Trigonometri Sudut Istimewa

α	0°	30°	45°	60°	90°	120°	180°	270°	360°
$\sin \alpha$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	0	-1	0
$\cos \alpha$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	-1	0	1
$\tan \alpha$	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$\sqrt{3}$	∞	$-\sqrt{3}$	0	∞	0
$\cot \alpha$	∞	$\sqrt{3}$	1	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	0	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	∞	0	∞
$\sec \alpha$	1	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{2}$	2	∞	-2	-1	∞	1
$\operatorname{cosec} \alpha$	∞	2	$\sqrt{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	1	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	∞	-1	∞



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Rencana lokasi pembangunan Bendungan Lau Simeme terletak di Desa Kuala Deka, Kecamatan Siburu-biru, Provinsi Deli Serdang, Sumatera Utara. Jarak dari Bandara Kualanamu ke lokasi proyek Desa Kuala Deka di Kec. Siburu-biru, berjarak $\pm 57,5$ km dengan kendaraan roda empat.



Gambar 3.1 Denah Lokasi Proyek
Sumber: PP-ANDESMONT KSO

3.2 Pelaksanaan Penelitian

Metode pelaksanaan penelitian ini menggunakan pendekatan sistematis. Ada juga peneliti yang berbeda yang mengikuti jalan yang berbeda untuk mencapai tujuan penelitian mereka. Beberapa menyajikan data numerik, sementara yang lain mengutip terlebih dahulu dalam bentuk teori.

3.2.1 Tahap Persiapan

Tingkat persiapan ini merupakan tingkat awal penyelidikan. Pada fase ini, Anda perlu mengumpulkan data, menemukan file SNI, melakukan penelitian,

melakukan penelitian eksplorasi, dan mengumpulkan data. Tahap penyusunan masalah adalah pengumpulan literatur untuk memperoleh informasi guna mendukung penelitian.

3.2.2 Survei Pendahuluan

Untuk mengetahui bagaimana keadaan kondisi proyek yang akan diteliti, akan dilakukan survei.



Gambar 3.2 Kondisi Terowongan Pengelak Bendungan Lau Simeme
Sumber: PP-ANDESMONT KSO

3.2.3 Pengumpulan Data

Data pendukung penelitian secara garis besar dapat dibagi menjadi: data primer dan data sekunder. Data primer adalah data aktual dari peneliti yang terjun langsung ke lapangan dan menguji sampel di laboratorium. Data sekunder adalah data lengkap (Final), tetapi dapat berupa laporan penyelesaian proyek yang tersedia dari instansi terkait atau hasil perhitungan penelitian sebelumnya.

Dalam penelitian ini, karena keterbatasan dan keadaan pandemi saat ini, peneliti hanya menggunakan data sekunder dari institusi terkait. Data yang diperoleh antara lain laporan geologi dan mekanika tanah, laporan statik, laporan

akhir, foto kondisi akhir lapangan, penampang terowongan memanjang dan melintang, tata letak bendungan Lau Simeme, dan beberapa jenis berisi gambar kerja berupa *soft file* terdiri dari dukungan untuk Sistem terowongan bendungan oleh Lau Shimeme. Selain itu, kami juga memperoleh hasil komputasi dari penelitian sebelumnya yang membahas tegangan di sekitar terowongan bendungan Lau Simeme.

Pada penelitian kali ini peneliti hanya menggunakan data sekunder dari instansi terkait dikarenakan keterbatasan dan kondisi pandemik saat ini. Data-data yang diperoleh antara lain laporan geologi dan mekanika tanah, laporan analisis struktur, laporan akhir, beberapa foto kondisi terkini di lapangan serta gambar kerja berupa *shop drawing* yang terdiri dari penampang memanjang dan melintang terowongan, layout bendungan lau simeme, dan beberapa tipe-tipe sistem penyangga pada terowongan bendungan lau simeme. Selain itu diperoleh pula hasil perhitungan dari penelitian sebelumnya yang membahas tentang tegangan di sekitar terowongan bendungan lau simeme.

Tabel 3.1 Ketinggian Batuan di Atas Terowongan

STA	h (m)	STA	h (m)	STA	h (m)
0+023.000	5.473	0+177.830	64.996	0+447.830	68.137
0+026.500	9.388	0+187.830	69.31	0+457.830	67.841
0+033.000	11.526	0+197.830	74.94	0+467.830	67.498
0+043.000	17	0+207.830	76.417	0+477.830	65.018
0+054.000	22.834	0+217.830	78.434	0+487.830	63.951
0+063.000	27.893	0+227.830	83.695	0+497.830	61.254
0+067.830	32.75	0+237.830	89.555	0+507.830	59.761

0+072.830	33.31	0+247.830	88.673	0+517.830	59.034
0+077.830	33.421	0+257.830	89.713	0+527.830	58.169
0+082.830	34.122	0+267.830	90.152	0+537.830	57.54
0+087.830	34.537	0+277.830	88.923	0+547.830	57.427
0+092.830	35.342	0+287.830	87.316	0+557.830	57.499
0+097.830	35.989	0+297.830	84.682	0+567.830	57.511
0+102.830	36.099	0+307.830	82.033	0+577.830	55.103
0+107.830	36.716	0+317.830	79.853	0+587.830	52.001
0+112.830	37.412	0+327.830	78.252	0+597.830	50.892
0+117.830	38.213	0+337.830	77.011	0+607.830	48.267
0+122.830	38.927	0+347.830	71	0+617.830	35.614
0+127.830	45.256	0+357.830	73.533	0+627.830	28
0+132.830	51.883	0+367.830	72.911	0+637.830	32.081
0+137.830	64.978	0+377.830	72.206	0+647.830	24.379
0+142.830	72.808	0+387.830	71.255	0+657.830	20.259
0+147.830	80.387	0+397.830	70.557	0+667.830	19.261
0+152.830	86.468	0+407.830	68.888	0+672.830	15.497
0+157.830	79.366	0+417.830	68.6	0+678.880	14.136
0+162.830	72.4	0+427.830	69.015	0+688.880	12.621
0+167.830	66.829	0+437.830	68.578	0+699.480	9.881

Sumber: PP-ANDESMONT KSO (*Surveyor*)

Dari hasil penelitian ini dilakukan analisis tegangan dengan perhitungan analitik. Analisis kekuatan batuan dihitung berdasarkan kriteria *Hoek-Brown*-nya, sedangkan *Kirsch Solution* digunakan untuk beban di sekitar terowongan.

Tabel 3.2 Hasil Analisis Kuat Massa Batuan

STA	Kuat Massa Batuan Pers. Hoek	
	(Mpa)	
	Atap	Dinding
0 +043	0,793	0,814

Sumber: Data Hasil Penelitian

Tabel 3.3 Data Batuan di Sekitar Terowongan

STA	Parametre	Atap A	Dinding C
	(0 +043)	$\gamma \left(\frac{MN}{m^3}\right)$	0.00201
h (m)		79	82,4
K		0,191	0,191
a (m)		3.4	3.4
r (m)		5.15	5.15
θ		90	0

Sumber: Data Proyek

Tabel 3.4 Hasil Analisis Tegangan di Sekitar Terowongan Menggunakan *Kirsh Solution*

Lokasi	Tegangan di Sekitar Terowongan (Mpa)		
	Atap	Dinding	
STA 0+043 (Inlet)	σ_r (MPa)	0,09966	0,18317
	σ_θ (MPa)	0,08251	0,67203
	$\sigma_{r\theta}$ (MPa)	0,00000	0,00000
	σ maks	0,09966	0,67203

Sumber: Data Hasil Penelitian

3.3 Analisa Data

Berdasarkan data sekunder yang diperoleh, analisis penyangga yang dilakukan meliputi:

- a) Memperhitungkan kuat massa batuan di sekitar terowongan dengan menggunakan persamaan *Hoek-Brown* (2-13), (2-14), (2-15), (2-16), (2-21), (2-17), (2-11).
- b) Memperhitungkan tegangan yang terjadi di daerah sekitar terowongan dengan persamaan *Kirsch Solution* (2-16), (2-18), (2-19), (2-20).
- c) Memperhitungkan tegangan maksimum dan kekauan (*Tiffnes*) dari *rockbolt*. Tegangan maksimum dan kekauan ditentukan berdasarkan persamaan (2-22) dan (2-23).
- d) Menentukan angka keamanan pada sistem penyangga *rockbolt* berdasarkan persamaan (2-30).
- e) Pertimbangkan tegangan maksimum dan kekakuan *shotcrete*. Tegangan dan kekakuan maksimum ditentukan berdasarkan persamaan (2-24) dan (2-25).
- f) Menentukan angka keamanan pada sistem penyangga *shotcrete* berdasarkan persamaan (2-30).
- g) Memperhitungkan tegangan maksimum dan kekauan (*Stiffnes*) dari *concrete lining*. Tegangan maksimum dan kekauan ditentukan berdasarkan persamaan (2-26) dan (2-27).
- h) Menentukan angka keamanan pada sistem penyangga *concrete lining* berdasarkan persamaan (2-30).
- i) Memperhitungkan tegangan maksimum dan kekauan (*Stiffnes*) dari *grouting*. Tegangan maksimum dan kekauan ditentukan berdasarkan persamaan (2-28) dan (2-29).
- j) Menentukan angka keamanan pada sistem penyangga *grouting* berdasarkan persamaan (2-30).

k) Rumus trigonometri sudut rangkap pada $\cos 2\alpha$ pada persamaan (2-32).

3.4 Bagan Penelitian

Bendungan Lau Simeme merupakan salah satu proyek nasional Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (Kemen PUPR) yang dilaksanakan oleh Direktorat Jenderal Sumber Daya Air melalui Balai Wilayah Sungai (BWS) Sumatera Wilayah II.

Tabel 3.5 Data Teknis Bangunan Pengelak

NO	Data Teknik Terowongan Pengelak	
1	Tipe	Tapal Kuda
2	Diameter	6.80 m
3	Panjang Terowongan	813.57 m
4	Kemiringan	1%
5	Debit Inflow (Q25)	542.41

Sumber: PP-ANDESMONT KSO

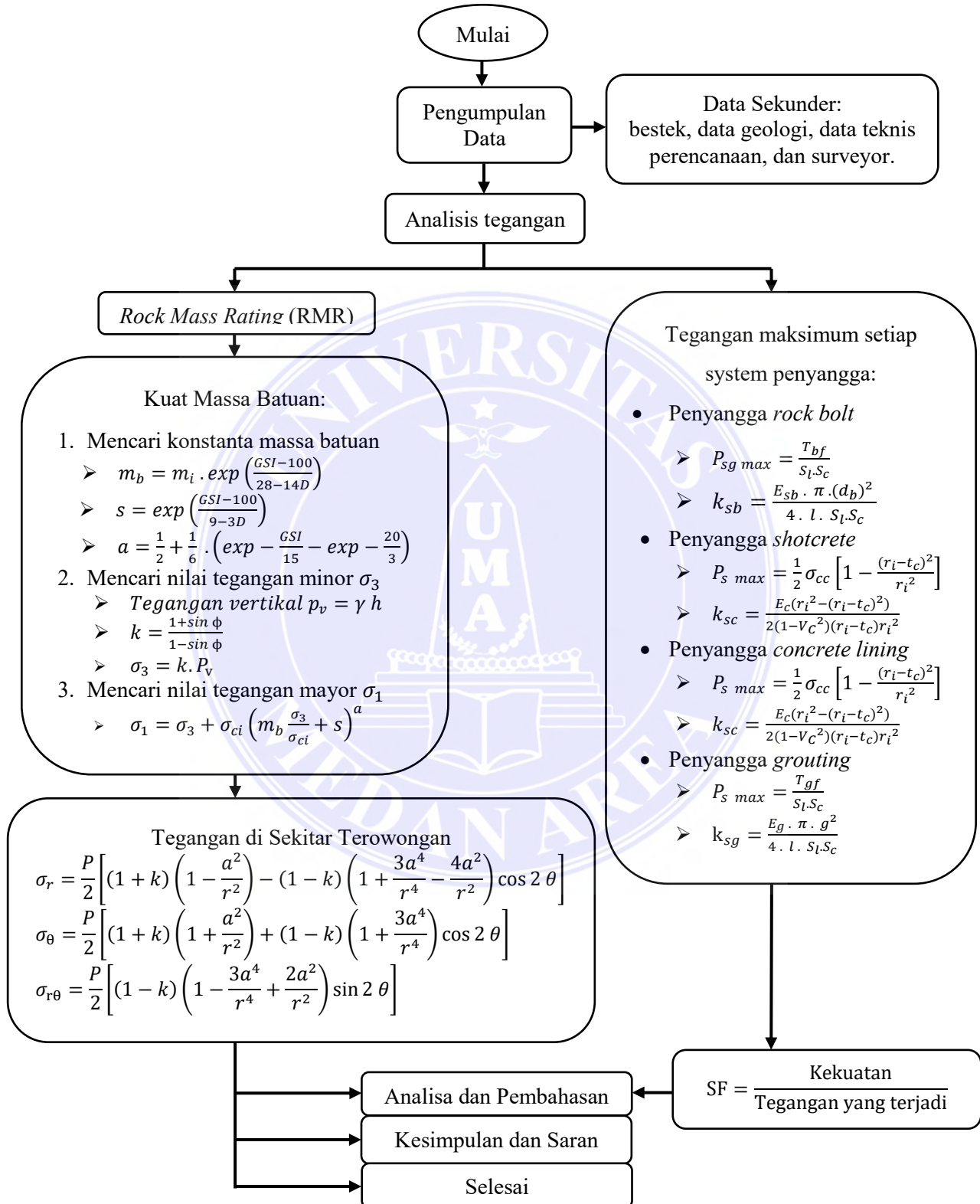
Desain terowongan alternatif adalah pintu masuk alternatif tipe *box culvert* dengan panjang 23 m, struktur alternatif jenis terowongan tapal kuda dengan panjang 718,55 m dan pintu keluar alternatif dengan panjang 72,02 m.

Untuk membangun bendungan, terlebih dahulu Anda perlu membangun beberapa bangunan seperti: bangunan pelimpah, biasa disebut *spillways*, bangunan pengambil, biasa disebut *inlet*; bangunan fallback (Pengelak) berupa tunnel atau terowongan dan bangunan lainnya. Pembangunan terowongan merupakan salah satu pekerjaan teknik sipil pertama yang harus diselesaikan sebelum pembangunan bendungan dilakukan. Konstruksi bangunan alternatif (Terowongan) adalah bangunan untuk mengalihkan air sungai selama pembangunan bendungan. Tak perlu dikatakan lagi, ketika melakukan pekerjaan penggantian, ketepatan dan kepatuhan yang ketat terhadap jadwal diperlukan agar

pekerjaan dapat berjalan sesuai rencana. Namun, tidak semua pekerjaan konstruksi biasanya berjalan sesuai rencana. Keterbatasan yang biasa ditemui di lokasi proyek antara lain pembebasan lahan, faktor cuaca, dan bahan bangunan.



Untuk memudahkan tahap penyusunan tugas akhir, maka dibuat bagan alir seperti yang terlihat pada gambar di bawah ini



Gambar 3. 3: Bagan Alir Penelitian

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Oleh karena itu, ketika menganalisis sistem pendukung hulu (*Inlet*) di STA 0+ 043.000, kami menyimpulkan bahwa sistem pendukung yang digunakan di sisi hulu terowongan adalah *rock bolts* dan *shotcrete*, berdasarkan pedoman Bieniawski (1989). Saya bisa. Klasifikasi batuan hulu juga termasuk batuan sedang (Kelas III) yang disurvei oleh ahli geologi, menghasilkan nilai RMR antara RMR 41 dan 60. Menurut perhitungan matematis, tegangan yang disebabkan oleh tumpuan (Penyangga) terowongan di sisi inlet adalah 11,758 MPa dan maksimum kekakuan adalah 41.221,137 MPa/m, sehingga faktor keamanan pada sisi inlet adalah 301,14 untuk atap dan 51,50 untuk dinding. Faktor keamanan terowongan secara keseluruhan adalah 1,5, sehingga terowongan bendungan Lau-Simeme dianggap aman.

5.2 SARAN

Survei ini menggunakan teknik Rock Mass Rating (RMR) untuk memastikan kualitas batuan di daerah penelitian. Untuk penyelidikan lebih lanjut, disarankan untuk menggunakan metode kualitas / *Quality* (Q) atau indeks massa batuan / *Rock Mass Index* (RMI) sebagai referensi untuk mendapatkan nilai kualitas batuan yang lebih baik di dalam terowongan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggiet Roro Sakapakerti (2020), dalam “*Analisis Pengaruh Kuat Geser Massa Batuan terhadap Waktu Tunggu (Stand-up Time) Terowongan Pengelak Beringin Sila, Kabupaten Sumbawa*”
- Anang Wibowo., (2020). Trigonometri Analitik, Ponogoro
- Air, K. P. (2011). Pedoman Perencanaan Dan Pelaksanaan Konstruksi Terowongan Untuk Bendungan. Jakarta: Direktorat Jendral Sumber Daya Air.
- Bramara Dwi Mahayana (2017). Metode Pelaksanaan Terowongan Pengelak Bendungan Tukul Kabupaten Pacitan Jawa Timur, Surabaya
- Bahan Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil NOMOR: 30/SE/M/2015 mengenai Pedoman Perencanaan Penggalian Dan Sistem Perkuatan Terowongan Jalan Pada Media Campuran Tanag-Batuan.
- Chikalistyanti Sudrajat (2020), mengambil tugas akhir tentang “*Analisis Sistem Penyangga Pada Terowongan Pengelak Bendungan Beringin Sila Di Kabupaten Sumbawa*”, Mataram
- Dwi Setiya Ningsih (2015), Rumus Trigonometri
- Siswanto, Dyah Anggraini., “*Perbandingan Klasifikasi Massa Batuan Kuantitatif: Q, RMR, dan RMI., Universitas diponegoro*”, Semarang.
- PT. Persero (PP). 2003. Buku Referensi Untuk Kontraktor Bangunan Gedung dan Sipil. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama
- Putera dkk (2019) dalam “*Penggunaan Metode Empirik Sebagai Penentu Penyangga Terowongan Pengelak Bendungan Beringin Sila,*
- Quratu’ Aeni (2014) mengambil judul penelitian tentang “*Perilaku Tegangan Pada Massa Batuan Yang Menggunakan Sistem Penyangga Grouting Pada Terowongan Pengelak Bendungan Pandan Duri Swangi Di Lombok Timur*”, Mataram.
- Wika Kontraktor, PT. 2013. Dokumen Metode Pelaksanaan Terowongan Pengelak Waduk Bendo. Ponorogo.
- Yuyun Yunita., Analisis Sitem Penyangga Pada Terowongan Mila Di Rababaka Kompleks Kabupaten Dompu, Mataram 2016.

LAMPIRAN

NO	URAIAN PEKERJAAN	SAT	VOLUME	Bobot %
III PEKERJAAN BANGUNAN PENGELAK				
3.3 PEKERJAAN TEROWONGAN PENGELAK				
PEKERJAAN TANAH		m ²	11,930.46	0.059
3/06	Land Clearning dan Grubbing	m ³	36,234.07	0.320
3/07	Galian biasa diangkut sejauh 2 Km (diangkut ke di sposal)	m ³	25,560.76	0.549
3/08	Galian Batuan mekanis diangkut maksimum 1 Km (diangkut ke stockpile)	m ³	51,131.14	9.120
3/09	Galian Terowongan (blasting)			
3.4 PEKERJAAN PENUNJANG DAN PROTEKSI				
3/10	Pekerjaan Shotcrete tebal 10 cm	m ²	16,085.57	1.512
3/11	Pemasangan besi wiremesh 100 x 100 x 5 mm termasuk aksesoris	m ²	16,085.57	0.280
3/12	Rock Bolt (grouted)	m	4,551.00	0.172
3/13	Steel Rib Support (H-125x125x6.5x9)	kg	169,783.78	1.700
3.5 PEKERJAAN GROUTING				
3/14	Drilling untuk Grouting	m	11,485.00	1.551
3/15	Grouting termasuk material dan peralatan	ton	157.05	0.078
3/16	Backfill Grouting Material	m ³	2,679.91	2.205
3/17	Drilling untuk Pilot dan Check Hole			
3/17.1	Drilling untuk Pilot dan Check Hole 0-10 m	m	1,964.00	0.279
3/18	Water Test/ Permeability test 7 tekanan	Nos	720.00	0.029
3/19	Water Test/ Permeability test 1 tekanan	nos	20.00	0.001
3.6 PEKERJAAN BETON				
3/19.1	Beton K-300 Type B (untuk plugging)	m ³	739.20	0.202
3/20	Beton K-225 Type B (untuk terowongan)	m ³	21,194.45	6.666
3/21	Beton K-225 Type A	m ³	790.80	0.195
3/22	Besi Tulangan Ulir	kg	1,373,987.63	3.800
3/23	Bekisting Besi (Sliding Form)	m ²	33,388.80	2.834
3/24	Waterstop, W=320 mm	m	1,376.80	0.038
3/25	Dowel Bar D22	kg	2,532.00	0.007
3/26	Beton K-175	m ³	584.50	0.130
3/27	Weep hole D16	bh	28.00	0.000


UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

Document Accepted 30/5/23

Access From (repository.uma.ac.id)30/5/23

 BALA BANGUNAN HIDRAULIK DAN GEOTEKNIK KEAIRAN LABORATORIUM MEKANIKA BAHAN DAN BATUAN Jl. Ir. H. Juanda No. 93 Bandung, 40135 Telp/Fax : 022-2516374 Email : lab.batuan_pusair@yahoo.com				Summary - Rock Bendungan Lau Simeme																							
				INDEX PROPERTIES											ULTRASONIC VELOCITY					UNCONFINED COMPRESSIVE STRENGTH		TRIAXIAL		PERMEABILITY			
				SAMPLE				Natural	Natural	Saturat.	Absorpt/	Dry	Deg. Of	Porosity	Ap.	TRUE	Void	COMPR. W	SHEAR. W	POIS. RAT.	YOUNG'S MOD.	MODULUS. RIG	Natural		C	φ	K
				No.	ID	DEPTH (m)		LITHOLOGY	Density	Water	Density	ST. Water	Density	Saturated	n	Spec.	Spec.	P	S	(U)	(E)	(G)	σC	E (Axial)			
From	To	d	Content			s	%		d	S	%	Gravity	Gravity	e		(VP)	(VS)								(E)	(G)	kg/cm ²
1	DH.1	17,00	18,00	-	2,209	8,14	2,292	12,20	2,043	66,67	24,93	2,0429	2,7214	0,332	3,603,55	1,478,16	0,3989	1,32E+05	4,73E+04	126,137	1,05E+04	23,79	30,66				
2	DH.1	79,00	80,00	-	2,052	14,49	2,114	17,93	1,792	80,81	32,14	1,7922	2,6411	0,474	2,460,48	1,138,43	0,3638	7,44E+04	2,73E+04	123,114	9,07E+03	4,26	42,84				
3	DH.2	5,00	6,00	-	1,287	14,92	1,689	50,84	1,120	29,34	56,94	1,1200	2,6011	1,322	1,868,40	1,002,80	0,2977	4,58E+04	1,77E+04	64,053	4,96E+03	4,38	39,79				
4	DH.2	71,00	72,00	-	1,678	15,90	1,910	31,93	1,448	49,80	46,22	1,4475	2,6918	0,860	2,057,76	1,025,18	0,3349	5,84E+04	2,19E+04	150,204	8,85E+03	38,69	23,57				
5	DH.3	96,00	-	-	1,596	11,85	1,895	32,86	1,427	36,05	46,88	1,4266	2,6856	0,883	1,712,61	844,48	0,3394	3,69E+04	1,38E+04	56,894	4,11E+03	5,85	29,34				
6	DH.7	7,00	8,00	-	1,666	10,75	1,954	29,89	1,504	35,98	44,96	1,5042	2,7328	0,817	2,483,87	1,170,61	0,3572	6,04E+04	2,22E+04	101,948	6,74E+03	6,18	18,05				
7	DH.7	29,00	30,00	-	1,357	21,14	1,710	52,68	1,120	40,12	59,01	1,1201	2,7328	1,440	1,493,62	766,75	0,3211	2,44E+04	9,24E+03	43,877	3,03E+03	1,65	27,38				
8	DH.9	28,00	-	-	1,937	11,59	2,108	21,49	1,735	53,90	37,30	1,7354	2,7679	0,595	1,800,00	961,24	0,3005	4,34E+04	1,67E+04	74,544	6,46E+03	0,86	46,05				
9	DH.9	49,00	-	-	2,220	6,61	2,306	10,72	2,083	61,64	22,32	2,0826	2,6811	0,287	2,445,50	941,61	0,4130	5,01E+04	1,77E+04			50,78	9,20				
10	DH.9	51,00	-	-	1,670	10,98	1,942	29,08	1,504	37,76	43,75	1,5045	2,6746	0,778	2,824,19	1,145,66	0,4015	7,92E+04	2,82E+04	128,567	8,44E+03						
11	DH.9	79,00	-	-	2,077	12,22	2,176	17,52	1,851	69,72	32,44	1,8512	2,7401	0,480	3,590,00	1,329,63	0,4205	1,20E+05	4,22E+04	268,764	1,55E+04	65,87	19,26				
12	DH.9	80,00	-	-	2,041	14,44	2,095	17,48	1,783	82,61	31,17	1,7832	2,5906	0,453	2,421,26	1,191,86	0,3401	8,35E+04	3,12E+04	169,987	1,27E+04						
Total Testing				12											12					11		10		0			
REMARK :				Penyelia Lab. Mekanika Batuan & Bahan (Iwan Prasetya, ST)																							

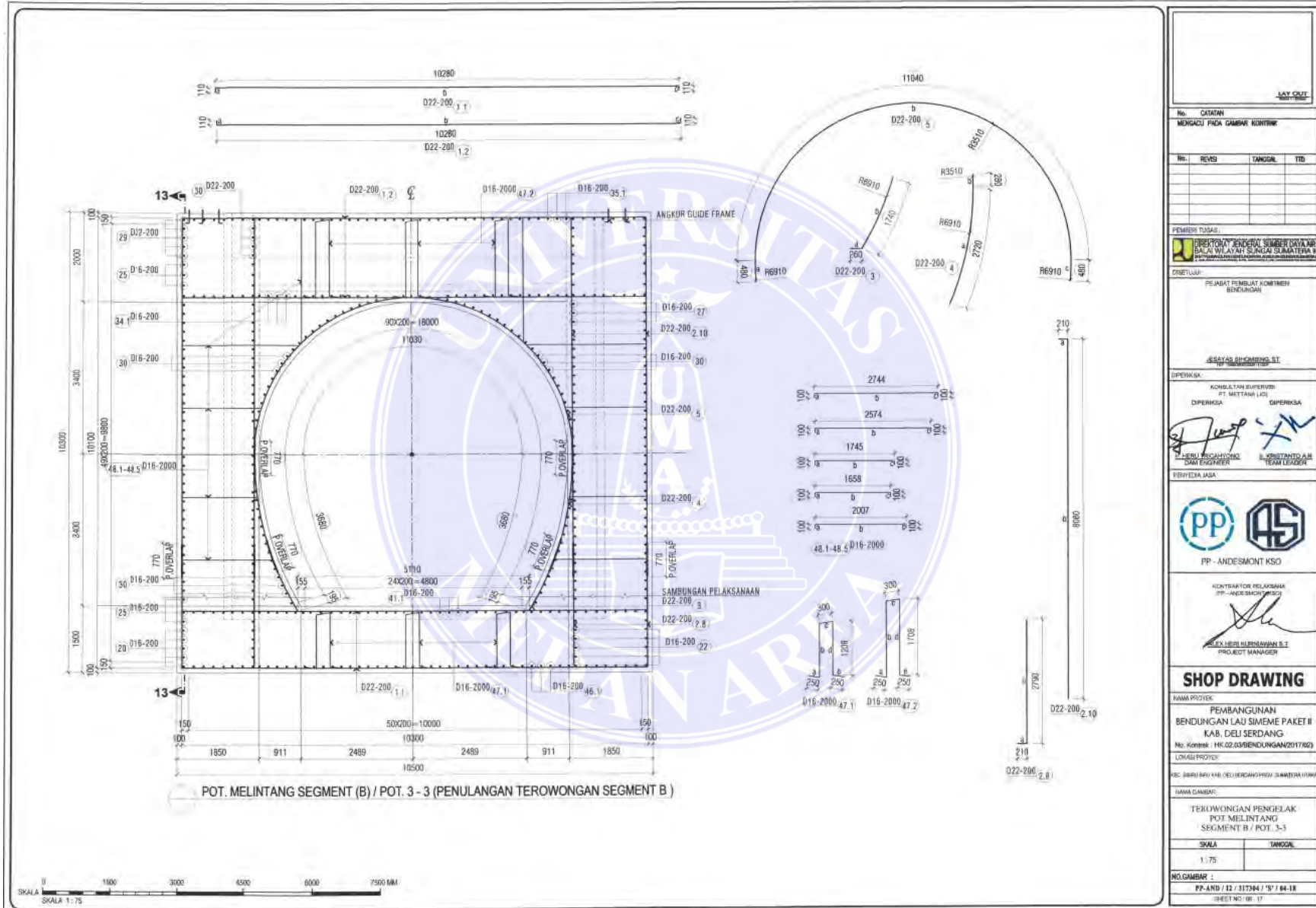
PROJECT		Lau Simeme Dam		DEPTH		80 M		ELEVATION		0															
LOCATION		Tunnel Route		COORDINATE		X : 0.000 Y : 0.000		INCLINATION		Vertical		DRILLING RIG		TOHO UD-1											
AVERAGE CORE REC.		100 %		DATE		FROM : 0-Jan-00 TO 0-Jan-00		DRILLER		Nurul Benu		LOGGED		Agus WH											
DEPTH (m)	DATE	ROCK UNIT	DESCRIPTION LITOLGYC	COLUMN SECTION	DESCRIPTION	ROCK GRADE	GROUND WATER LEVEL (m)	CORE RECOVERY			R . Q . D			S P T					WATER PRESSURE TEST		DEPTH (m)				
								(%)	cm	%	(%)	cm	%	N - Value	PERMEABILITY COEFFICIENT	Lu									
1		TANAH PELAPUKAN	Lempung Pasiran Kerikilan		0.00-4.00 m, lempung pasiran, coklat kemerahan sampai abu-abu gelap, lunak dan licin kalau basah, hasil pelapukan batupasir tufa, plastisitas rendah, licin kalau kena air, relatif lolos air, pada bagian atas ditemukan akar tanaman.			100	cm	%															
2						100	cm	%																	
3						100	cm	%																	
4						100	cm	%																	
5		BATUAN GUNUNGAPI MENTAR	Batupasir Tufa		4.00-13.50 m, batupasir tufa bersisipan dengan batulanau, lapuk kuat, abu-abu sampai keputihan, masih tampak struktur batuan asal, klas batuan (D) atau sangat lunak dan lapuk kaut, semi lolos air dengan (k) antara 7.38E-05 - 9.65E-05			100	cm	%															
6						100	cm	%																	
7						100	cm	%																	
8						100	cm	%																	
9						100	cm	%																	
10						100	cm	%																	
11						100	cm	%																	
12						100	cm	%																	
13						100	cm	%																	
14						100	cm	%																	
15		BATUAN GUNUNGAPI MENTAR	Breksi Turf		13.50-21.50 m, breksi vulkanik, segar, masadasar pasir tufaan, abu-abu, terpotong oleh bidang retakan tertutup dan terbuka, jarak rekahan 5-100 cm, sudut rekahan 10°-50°, diberberapa tempat bidang rekahan berwarna kecoklatan, tingkat kekerasan sedang sampai keras (CL-CM), RQD antara 50 sampai 100% (k antara 7.38E-05 - 1.65E-04 atau Lu antara 10.80 - 24.14).			100	cm	50	%														
16						100	cm	70	%																
17						100	cm	90	%																
18						100	cm	90	%																
19						100	cm	100	%																
20		BATUAN GUNUNGAPI MENTAR	Batupasir Tufa		21.50-30.00 m, batupasir tufa (abu-abu putih), bersisipan dengan batulanau (abu-abu gelap), segar, masadasar pasir tufaan, abu-abu terpotong oleh bidang retakan tertutup dan terbuka, jarak rekahan 5-100 cm, sudut rekahan 20°-50°, diberberapa tempat bidang rekahan berwarna kecoklatan, tingkat kekerasan sedang sampai keras (CL-CM), RQD antara 70 sampai 100%, kedap sampai semi kedap air dengan (k antara 1.82E-05 - 8.01E-05 atau Lu antara 2.66 - 11.72).			100	cm	80	%														
21						100	cm	90	%																
22						100	cm	100	%																
23						100	cm	90	%																
24						100	cm	100	%																
25						100	cm	90	%																
26						100	cm	100	%																
27						100	cm	90	%																
28						100	cm	100	%																
29						100	cm	70	%																

Uji Laboratorium
 1. Uniaksial coppresion test
 2. Ultrasonic velocity test
 3. Triaxial compression test

PROJECT		Lau Simeme Dam		DEPTH		80 M		ELEVATION		0							
LOCATION		Tunnel Route		COORDINATE		X: - Y: -		INCLINATION		Vertikal							
AVERAGE CORE REC.		100 %		DATE		FROM: 0-Jan-00 TO: 0-Jan-00		DRILLER		Nurul Benu							
								LOGGED		Agus WH							
DEPTH (m)	DATE	ROCK UNIT	DESCRIPTION LITOLGYC	COLUMN SECTION	DESCRIPTION	ROCK GRADE	GROUND WATER LEVEL (m)	CORE RECOVERY (%)			R. Q. D (%)			S P T N - Value	WATER PRESSURE TEST PERMEABILITY COEFFICIENT K (cm/sec) LUGEON VALUE, Lu	DEPTH (m)	
								25	50	75	25	50	75				100
31			Batupasir Tufa		30.00-32.00 m, batupasir tufa (abu-abu putih), bersisipan dengan batulanau (abu-abu gelap), segar, masadasar pasir tufaan, abu-abu, terpolong oleh bidang retakan tertutup dan terbuka, jarak rekahan 5-100 cm, sudut rekahan 20°-30°.	CL-CM		100	cm	100	%					31	
32								100	cm	100	%				k : 1.79E-04	32	
33			Breksi Tuf		32.00-35.00 m, breksi tuf, segar, masadasar pasir tufaan, abu-abu, terpolong oleh bidang retakan tertutup dan terbuka, jarak rekahan 10-100 cm, sudut rekahan 10°-50°, diberapa tempat bidang rekahan berwarna kecoklatan, tingkat kekerasan sedang sampai keras (CL-CM), RQD antara 50 sampai 100%(k antara 7.38E-05 - 1.65E-04 atau Lu antara 10.80 - 24.14).	CL-CM		100	cm	70	%				Lu : 26.14	33	
34								100	cm	70	%						34
35								100	cm	90	%						35
36					35.00-60.00 m, batupasir tufa (abu-abu putih), bersisipan dengan batulanau (abu-abu gelap), segar, masadasar pasir tufaan, abu-abu, relatif masif, tingkat kekerasan sedang sampai keras (CL-CM), RQD antara 90 sampai 100%, relatif kedap air dengan (k antara 2.56E-05 - 3.73E-05 atau Lu antara 3.75 - 5.46), yang berbatasan dengan breksi tufa agak lolos air dengan Lu 16.80			100	cm	60	%						36
37					Permukaan airtanah berada pada kedalaman 59 m dibawah elevasi lubang bor.			100	cm	90	%				k : 1.15E-04	37	
38								100	cm	100	%				Lu : 16.80	38	
39								100	cm	100	%						39
40								100	cm	100	%						40
41								100	cm	100	%						41
42								100	cm	90	%				k : 2.56E-05	42	
43								100	cm	100	%				Lu : 3.75	43	
44								100	cm	100	%						44
45								100	cm	100	%						45
46								100	cm	90	%						46
47								100	cm	100	%				k : 2.69E-05	47	
48								100	cm	100	%				Lu : 3.94	48	
49								100	cm	100	%						49
50								100	cm	100	%						50
51								100	cm	90	%						51
52								100	cm	100	%				k : 2.51E-05	52	
53								100	cm	100	%				Lu : 3.67	53	
54								100	cm	100	%						54
55								100	cm	100	%						55
56								100	cm	100	%						56
57								100	cm	100	%				k : 3.73E-05	57	
58								100	cm	90	%				Lu : 5.46	58	
59								100	cm	90	%						59
60								100	cm	90	%						60

PROJECT		Lau Simeme Dam		DEPTH		80 M		ELEVATION		0													
LOCATION		Tunnel Route		COORDINATE		X : - Y : -		INCLINATION		Vertikal													
AVERAGE CORE REC.		100 %		DATE		FROM : 0-Jan-00 TO 0-Jan-00		DRILLER		Nurul Benu													
								LOGGED		Agus WH													
DEPTH (m)	DATE	ROCK UNIT	DESCRIPTION LITOLGYC	COLUMN SECTION	DESCRIPTION	ROCK GRADE	GROUND WATER LEVEL (m)	CORE RECOVERY (%)			R. Q. D (%)			S P T N - Value					WATER PRESSURE TEST PERMEABILITY COEFFICIENT K (cm / sec) LU GEON VALUE, Lu		DEPTH (m)		
								25	50	75	25	50	75	10	20	30	40	50					
61					60.00-80.00 m, batupasir tufa (abu-abu putih), bersisipan dengan batulanau (abu-abu gelap), segar, masadasar pasir tufaan, abu-abu relatif masif, tingkat kekerasan sedang sampai keras (CL-CM), RQD antara 40 sampai 100%, sampai kedalaman 75 m relatif kedap air dengan (k antara 1.78E-05 - 3.49E-05 atau Lu antara 2.60 - 5.11), dari 75 m sampai 80 m terdapat banyak retakan sehingga agak lolos air dengan Lu 15.76	CL-CM		100	cm	100	%											61	
62									100	cm	100	%											62
63									100	cm	60	%											63
64									100	cm	100	%											64
65									100	cm	100	%											65
66									100	cm	100	%											66
67									100	cm	100	%											67
68									100	cm	60	%											68
69									100	cm	100	%											69
70									100	cm	100	%											70
71									100	cm	100	%											71
72									100	cm	60	%											72
73									100	cm	100	%											73
74									100	cm	100	%											74
75									100	cm	100	%											75
76									100	cm	90	%											76
77									100	cm	50	%											77
78									100	cm	100	%											78
79									100	cm	40	%											79
80									100	cm	100	%											80
81					END OF DRILLING				cm		%										81		
82									cm		%										82		
83									cm		%										83		
84									cm		%										84		
85									cm		%										85		
86									cm		%										86		
87									cm		%										87		
88									cm		%										88		
89									cm		%										89		
90									cm		%										90		

Uji Laboratorium
 1. Uniaksial coppersion test
 2. Ultrasonic velocity test
 3. Triaxial compression test.

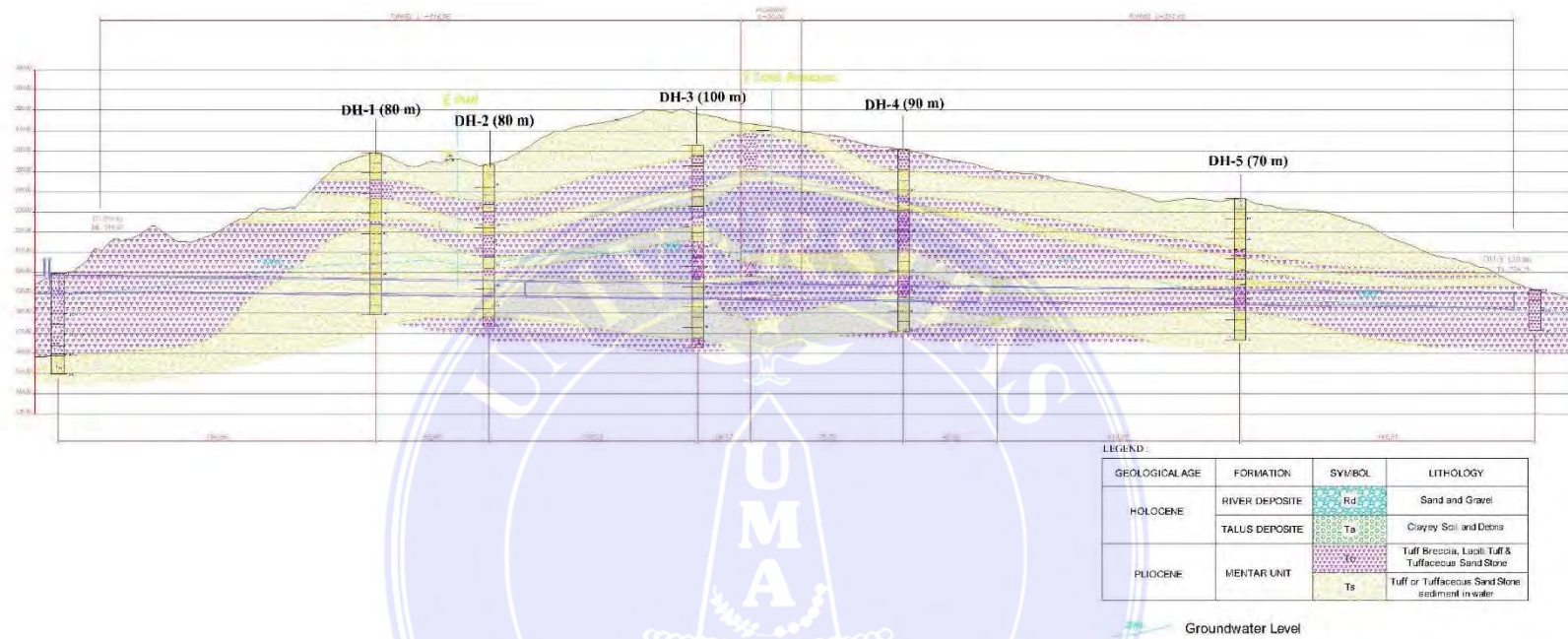


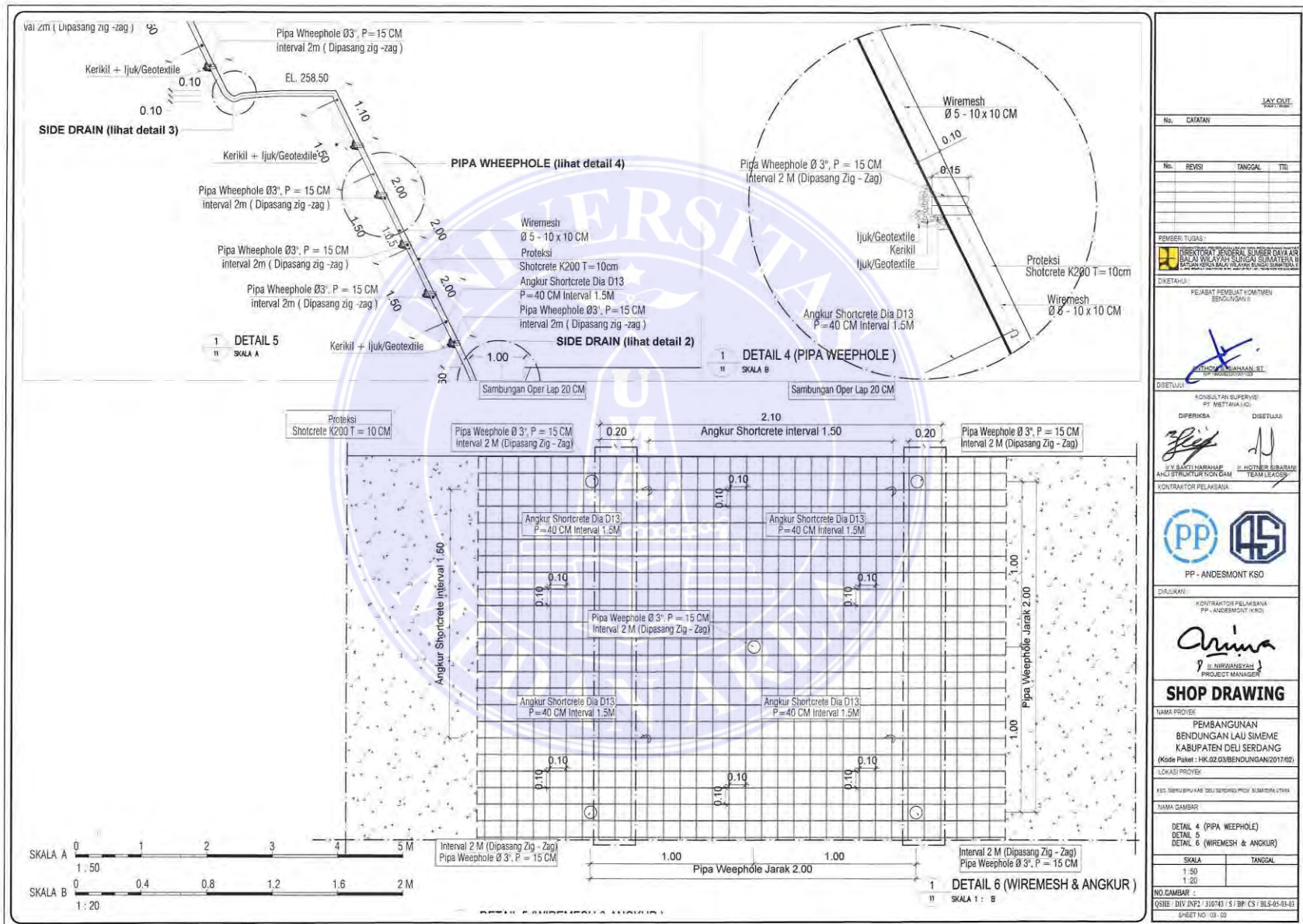
LAY OUT			
No. CATATAN			
MENGACU PADA GAMBAR KONTINYE			
No.	REVISI	TANGGAL	TTD
PEMERIKSA:			
 DIREKTORAT JENDERAL SUMBER DAYA AIR BALAI WILAYAH SUNGAI SUMATERA V Jl. H. Burhanudin, Palembang, Sumatera Selatan 30132			
DIBUAT OLEH:			
PEJABAT PEMBUKUT KOMITMEN BENDUNGAN			
SEKAYU BENDUNGAN ST			
DIPERIKSA:			
KONSULTAN SUPERVISI PT. MITTANI LAU			
DIPERIKSA:		DIPERIKSA	
 HELI HIDAYAT CIVIL ENGINEER		 KRISTANTO TEAM LEADER	
REVISI/JASA			
 PP-ANDES MONT KSO			
KONSULTAN FOR RELAKSASIA PP-ANDES MONT KSO			
 ALEX HELI HURNAWAN S.T. PROJECT MANAGER			
SHOP DRAWING			
NAMA PROJEK			
PEMBANGUNAN BENDUNGAN LAU SIMEME PAKET II			
KAB. DELI SERDANG			
No. Kontr. : HR.02.BENDUNGAN/2017/62			
LOKASI PROJEK			
Kec. Sibero Sibero Kab. Deli Serdang Prov. Sumatera Utara			
NAMA GAMBAR			
TEROWONGAN PENGLAK POT. MELINTANG			
SEGMENT B / POT. 3-3			
SKALA	TANGGAL		
1:75			
NO. GAMBAR			
PP-AND / 12 / 317344 / S / 04-18			
SHEET NO. 08 / 17			

UNIVERSITAS MEDAN AREA

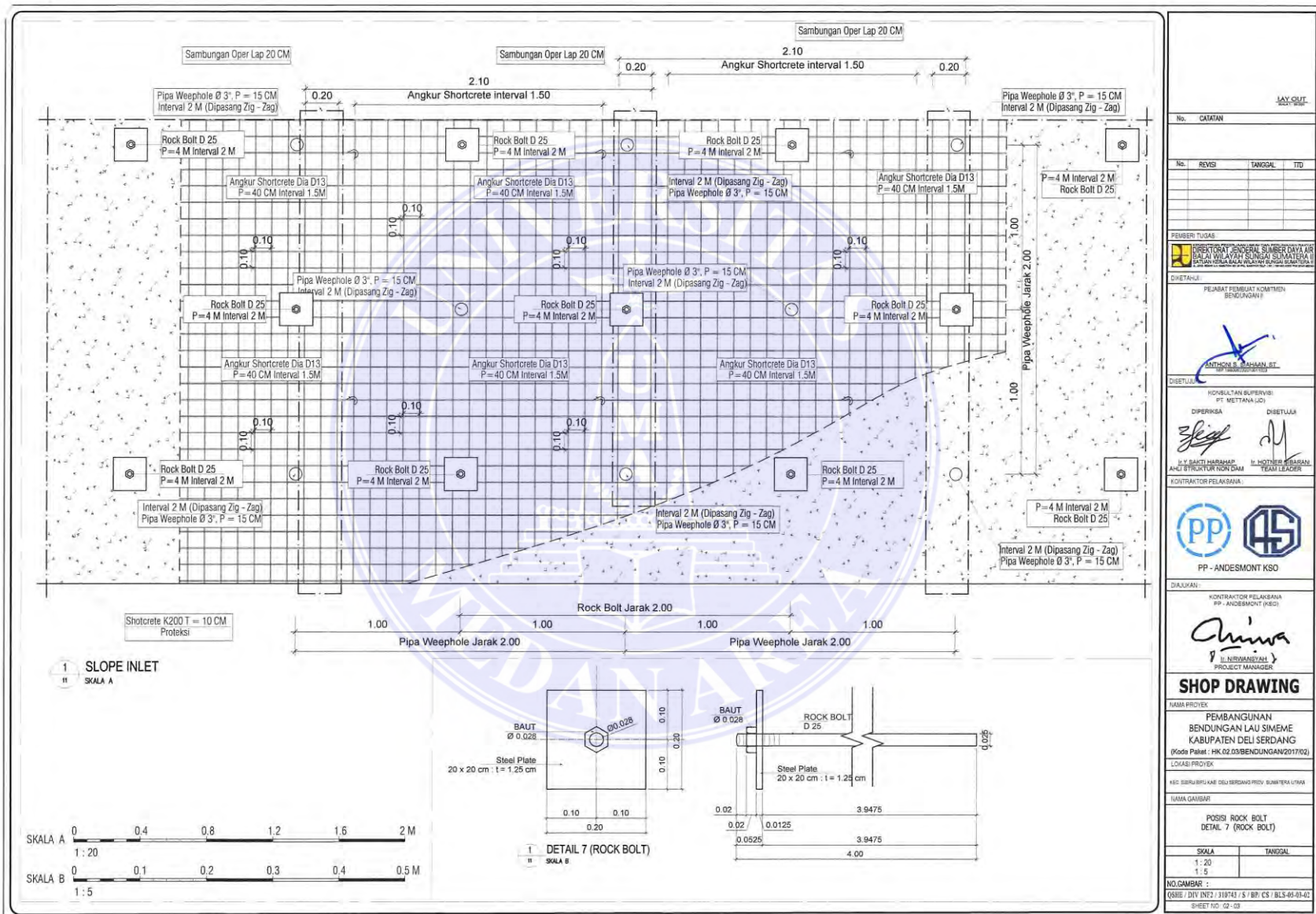
© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

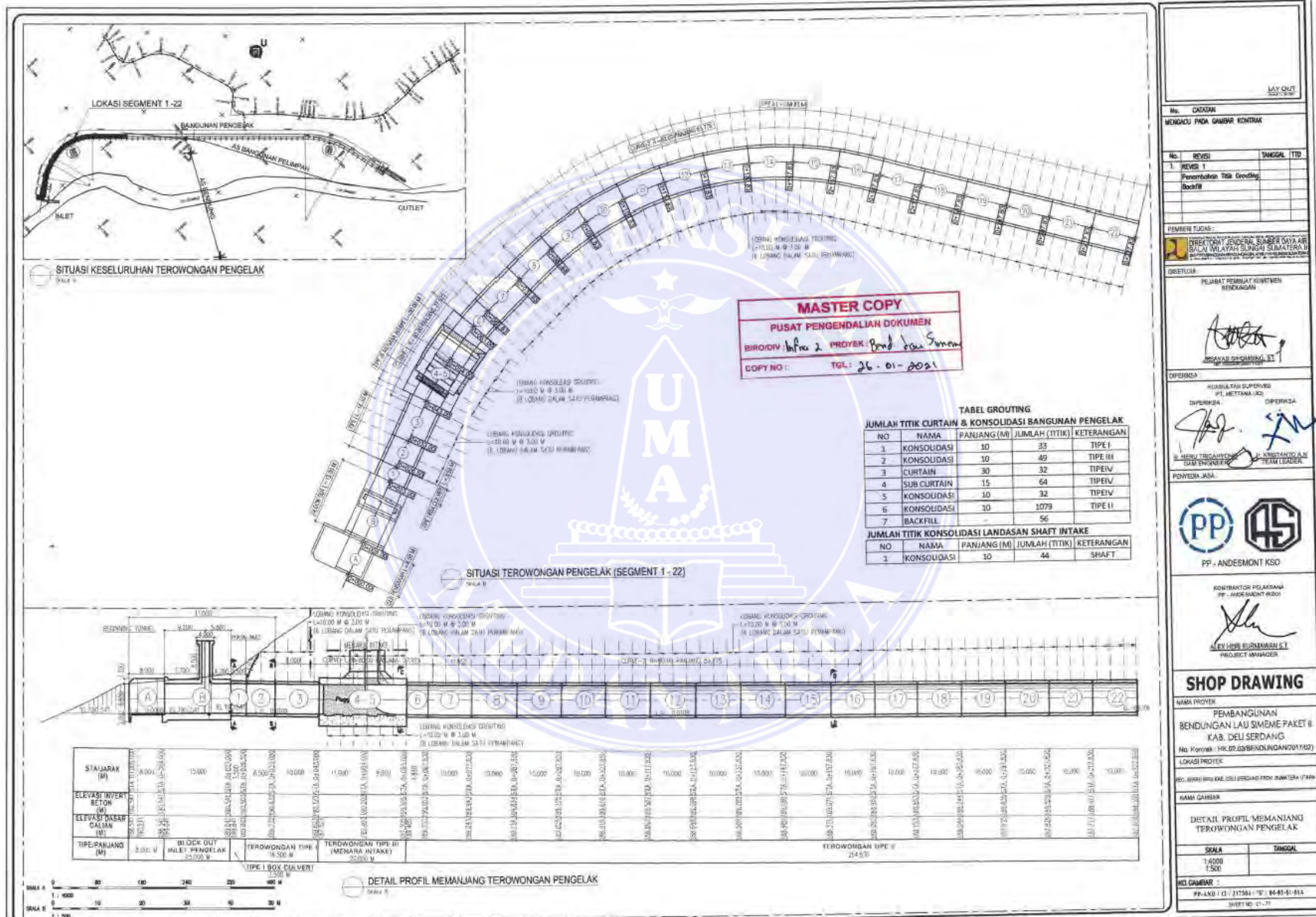




LAY OUT	
No.	CATATAN
No.	REVISI TANGGAL TTD
MEMBER TUGAS :	
DIREKTORAT JENDERAL SUMBER DAYA AIR BALAI WILAYAH SURABAYA SATUAN PELAKSANAAN KAWASAN BANGUNAN TUNEL	
DIREKTORI :	
PEJABAT PELAKSANAAN BENDUKUNGAN	
 Ir. Y. SAKTI HARAHAP AHLI STRUKTUR TUNEL	
 Ir. HOTNER SIBARAM TEAM LEADER	
DISETJUI :	
KONSULTAN SUPERVISI PT. METALINDO	
DIPERIKSA	DISETJUI
 PP - ANDESMONT KSO	
DILAKUKAN :	
KONTRAKTOR PELAKSANA PP - ANDESMONT KSO	
 Arima Ir. NURGANESYAH PROJECT MANAGER	
SHOP DRAWING	
NAMA PROJEK :	
PEMBANGUNAN BENDUNGAN LAU SIMEME KABUPATEN DELI SERDANG (Kode Paket : HK.02.03.BENDUNGAN2017/02)	
LOKASI PROJEK :	
KES BERKURUPAN KAS DELI SERDANG PROV. SUMATERA UTARA	
NAMA GAMBAR :	
DETAIL 4 (PIPA WEEPHOLE) DETAIL 5 DETAIL 6 (WIREMESH & ANGKUR)	
SKALA	TANGGAL
1:50	
1:20	
NO. GAMBAR :	
(SHE : DIV INF2 : 310743 / S / BP / CS / BLS-05-03-03)	
SHEET NO. 103.00	



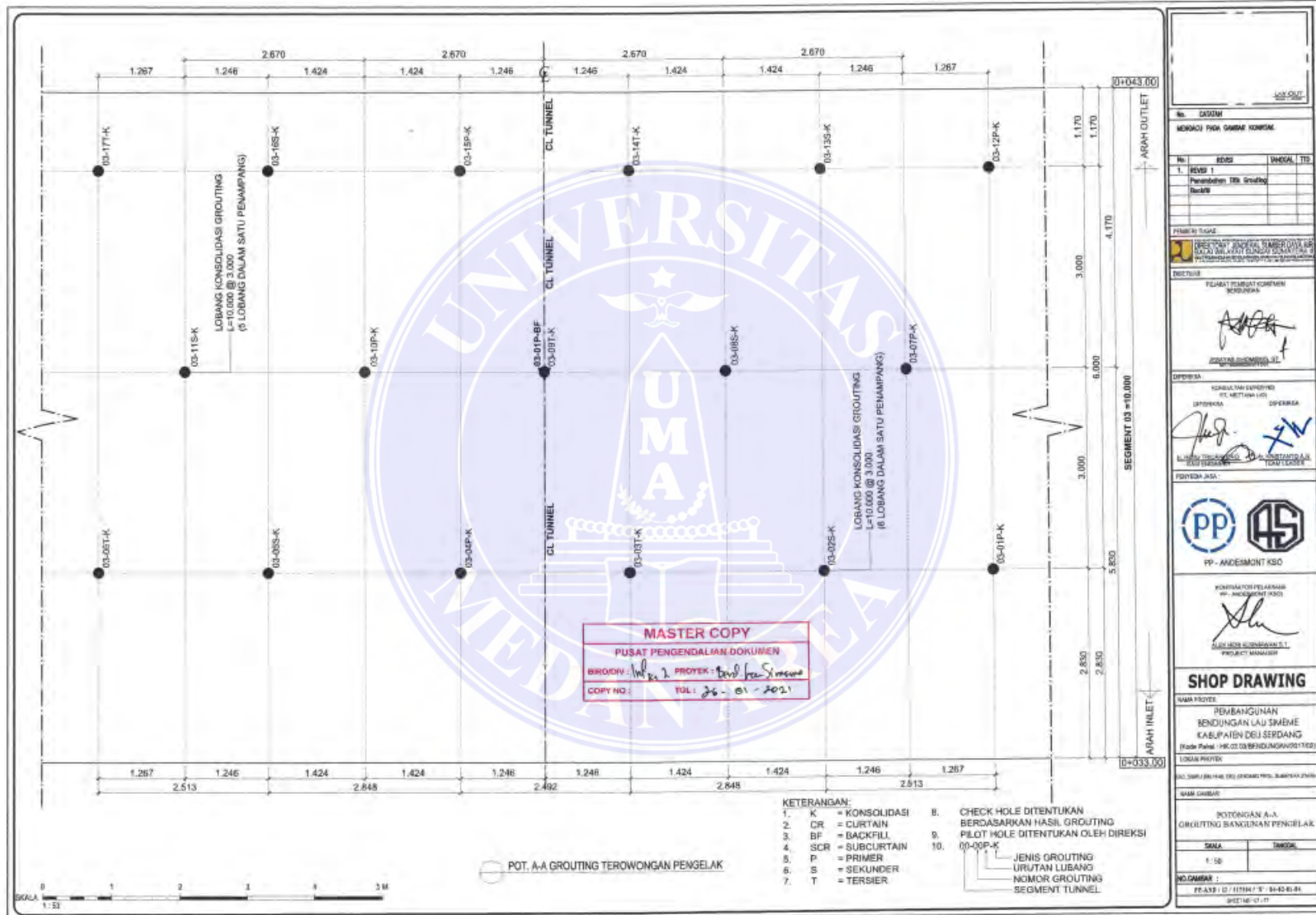
LAY-OUT			
No.	CATATAN		
No.	REVISI	TANGGAL	TTD
PEMBERI TUGAS			
DIREKTORAT JENDERAL SUMBER DAYA AIR BALAI WILAYAH SENGAY SERDANG I BANTAN KELAMAKAN WILAYAH RANGKAIAN BANTAN I BANTAN WILAYAH RANGKAIAN BANTAN			
DIREKTORI			
PELABAT PEMULUT KOMITMEN BENDUGUNAN P			
			
DIREKTORI			
KORPORASI SUPERVISI: PT. METTANA LIDI			
DIPERIKSA		DIBETULI	
			
KONTRAKTOR PELAKSANA			
			
DIAJUKAN:			
KONTRAKTOR PELAKSANA: PP - ANDES MONT (PUSK)			
			
SHOP DRAWING			
NAMA PROJEK			
PEMBANGUNAN BENDUGAN LAU SIMEME KABUPATEN DELI SERDANG (Kode Paket : HK.02.03/BENDUGAN/2017/02)			
LOKASI PROJEK			
KES. SERBUKBUKAR DELI SERDANG PROV. SUMATERA UTARA			
NAMA GAMBAR			
POSISI ROCK BOLT DETAIL 7 (ROCK BOLT)			
SKALA	TANGGAL		
1:20			
1:5			
NO. GAMBAR :			
04HE / DIV INF2 / 310741 / S / BP / CS / BLS-60-01-01			
SHEET 110 / 121-03			



UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area



UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area