

TUGAS AKHIR

PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PEKERJAAN GALIAN TEROWONGAN PENGELAK BENDUNGAN MBAY KABUPATEN NAGEKEO NUSA TENGGARA TIMUR MENGGUNAKAN *NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD*

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan

Program S1 Jurusan Teknik Sipil

Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung



Disusun Oleh :

ARNETTA YISKA ALISYA PUTRI

NIM : 30202300185

**FAKULTAS TEKNIK PRODI S1 TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG
2025**

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR

No: 19 / A.2 / SA – T / III / 2025

Pada hari ini tanggal **28** Agustus 2025 berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung perihal penunjukan Dosen Pembimbing Utama :

1. Nama : Eko Muliawan Satrio, ST., M.T
Jabatan Akademik : Lektor
Jabatan : Dosen Pembimbing Utama

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut di bawah ini telah menyelesaikan bimbingan Tugas Akhir:

Arnetta Yiska Alisyah Putri
NIM : 30202300185

Judul : PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PEKERJAAN GALIAN TEROWONGAN PENGELOAK BENDUNG MBAY KABUPATEN NAGEKEO NUSA TENGGARA TIMUR MENGGUNAKAN *NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD*

Dengan tahapan sebagai berikut :

No	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan dosen pembimbing	21/03/2025	
2	Seminar Proposal	14/07/2025	ACC
3	Pengumpulan data	16/07/2025	
4	Analisis data	02/08/2025	
5	Penyusunan laporan	08/14/2025	
6	Selesai laporan	08/19/2025	ACC

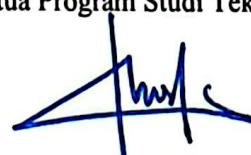
Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan

Dosen Pembimbing Utama



Eko Muliawan Satrio, ST., M.T

Mengetahui
Ketua Program Studi Teknik Sipil



Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng

LEMBAR PENGESAHAN

PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PEKERJAAN GALIAN TEROWONGAN
PENGELAK BENDUNGAN MBAY KABUPATEN NAGEKEO
NUSA TENGGARA TIMUR MENGGUNAKAN *NEW AUSTRIAN
TUNNELING METHOD*



Arnetta Yiska Alisyah Putri
NIM : 30202300185

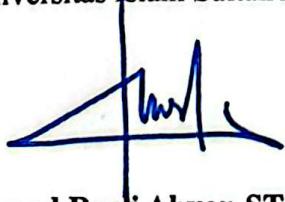
Telah disetujui dan disahkan di Semarang, 28 Agustus 2025

Tim Pengaji

1. **Eko Muliawan Satrio, ST., M.T**
NIDN: 0610118101
2. **Ir. Lisa Fitriyana, ST,M.Eng**
NIDN: 0631128901

Tanda Tangan

Ketua Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Islam Sultan Agung



Muhamad Rusli Ahyar, ST., M.Eng.
NIDN: 0625059102

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

NAMA : Arnetta Yiska Alisya Putri

NIM : 30202300185

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul : **PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PEKERJAAN GALIAN TEROWONGAN PENGEELAK BENDUNGAN MBAY KABUPATEN NAGEKEO NUSA TENGGARA TIMUR MENGGUNAKAN NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD** benar bebas dari plagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Semarang, Agustus 2025

Yang membuat pernyataan,



Arnetta Yiska Alisya Putri

NIM : 30202300185

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

NAMA : Arnetta Yiska Alisya Putri
NIM : 30202300185
JUDUL TUGAS AKHIR :PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PEKERJAAN GALIAN TEROWONGAN PENGELAK BENDUNGAN MBAY KABUPATEN NAGEKEO NUSA TENGGARA TIMUR MENGGUNAKAN NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan - bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijasah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Semarang, Agustus 2025
Yang membuat pernyataan,

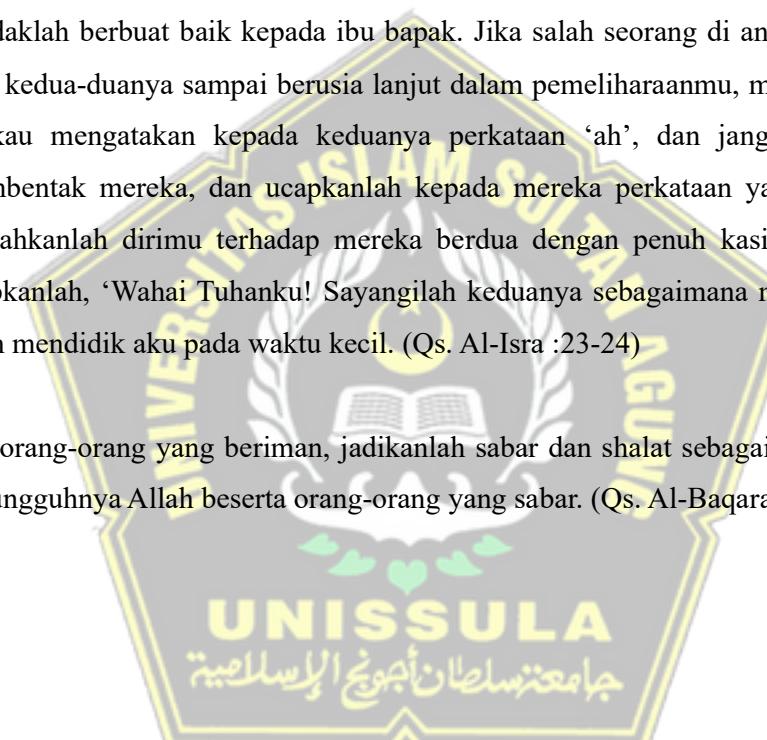


MOTTO

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

Dan Tuhanmu telah memerintahkan agar kamu jangan menyembah selain Dia dan hendaklah berbuat baik kepada ibu bapak. Jika salah seorang di antara keduanya atau kedua-duanya sampai berusia lanjut dalam pemeliharaanmu, maka janganlah engkau mengatakan kepada keduanya perkataan ‘ah’, dan janganlah engkau membentak mereka, dan ucapkanlah kepada mereka perkataan yang baik. Dan rendahkanlah dirimu terhadap mereka berdua dengan penuh kasih sayang dan ucapkanlah, ‘Wahai Tuhan! Sayangilah keduanya sebagaimana mereka berdua telah mendidik aku pada waktu kecil. (Qs. Al-Isra :23-24)

Hai orang-orang yang beriman, jadikanlah sabar dan shalat sebagai penolongmu. Sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar. (Qs. Al-Baqarah :153)



PERSEMBAHAN

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penyelis dapat menyelesaikan skripsi ini, Laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua saya, Ayah Bambang Pamungkas dan Ibu Umi Alisah atas doa dan dukungan yang diberikan.
2. Adik - adik saya Anggita Prameswari, Sekar Ayu dan Maryam Faiha yang selalu memberikan semangat selama mengerjakan tugas akhir ini serta Uti Soemarti yang memberikan dukungan berupa materi maupun moril.
3. Bapak Eko Muliawan Satrio, ST ., M.T selaku dosen pembimbing yang dengan tulus memberikan ilmu, bimbingan dan arahan hingga skripsi ini dapat terselesaikan.
4. Ibu Ir. Lisa Fitriyana, ST,M.Eng selaku dosen pembanding yang dengan tulus memberikan ilmu, semangat dan arahan hingga skripsi ini dapat terselesaikan.
5. Dosen - dosen Program Studi Teknik Sipil Unissula yang telah membagikan ilmunya.
6. Bapak Dwiky Pranarka, jajaran managemen serta teman-teman staf teknik Bendungan Mbay yang telah memberikan kesempatan bagi penulis agar dapat menyelesaikan studi kuliah S1 Teknik Sipil.
7. Kepada Anggita, Asyary, Savitri dan mas Umar yang tiada hentinya menyemangati penulis saat merasa jemu atau hampir menyerah. Serta kepada Raafi Nurdiansyah yang menjadi motivasi penulis menyelesaikan kuliah di tahun ini.
8. Teman - teman Teknik Sipil Angkatan 2023 yang tidak bisa saya sebut satu – persatu.

Arnetta Yiska Alisya Putri
NIM : 30202300185

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmatNya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Produktivitas Alat Berat Pekerjaan Galian Terowongan Pengelak Bendungan Mbay Kabupaten Nagekeo Nusa Tenggara Timur Menggunakan *New Austrian Tunneling Method*” guna memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung.

Penulis menyadari kelemahan serta keterbatasan yang ada sehingga dalam menyelesaikan skripsi ini memperoleh bantuan dari berbagai pihak, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., M. Hum selaku Rektor Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Dr. Abdul Rochim, ST., MT selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Muhammad Rusli Ahyar, ST., MT. Eng, selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Bapak Eko Muliawan Satrio, ST ., M.T selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan pengarahan, kesabaran dan bimbingan dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir.
5. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan baik isi maupun susunannya. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat tidak hanya bagi penulis juga bagi para pembaca.

Semarang, Agustus 2025

Arnetta Yiska Alisya Putri

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
ABSTRAK	xiii
BAB I PENDAHULUAN	15
1.1. Latar Belakang	15
1.2. Rumusan Masalah	15
1.3. Tujuan Penelitian	16
1.4. Manfaat Penelitian	16
1.5. Batasan Masalah	16
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	17
2.1. Umum	17
2.2. Tahapan Pekerjaan Pembangunan Terowongan Pengelak	18
2.2.1. Pekerjaan Persiapan	19
2.2.2. Pekerjaan Galian Tanah Terbuka	19
2.2.3. Pekerjaan Portal pada <i>Face Inlet</i>	20
2.2.4. Pekerjaan Galian Terowongan	20
2.2.5. Pekerjaan <i>Steel Support</i>	23
2.2.6. Pekerjaan <i>Primary Shotcrete</i>	24
2.2.7. Pekerjaan <i>Wiremesh</i>	25
2.2.8. Pekerjaan <i>Rockbolt</i>	25
2.2.9. Pekerjaan <i>Secondary Shotcrete</i>	26
2.3. Alat Berat yang Digunakan dalam Pembangunan Terowongan Pengelak ...	27
2.3.1. <i>Excavator Bakhoe</i>	27
2.3.2. <i>Dump Truck</i>	28
2.3.3. <i>Total Station</i>	29
2.3.4. <i>Bulldozer</i>	30
2.3.5. <i>Crawler Rock Drill</i>	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1. Diagram Alir Penelitian	33
3.2. Teknik Pengumpulan Data	34
3.3. Jenis dan Sumber Data yang Diperlukan	34
3.4. Metode Analisis dan Pengolahan Data	35

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	36
4.1. Data Umum Proyek.....	36
4.2. Pengamatan di Lapangan	36
4.3. Pekerjaan Galian Terbuka	37
4.4. Pekerjaan Proteksi.....	38
4.5. Pekerjaan Galian Terowongan Pengelak.....	39
4.5.1. Data Teknis Terowongan Pengelak	39
4.5.2. Tahapan Pelaksanaan Pekerjaan Galian Terowongan Pengelak	41
4.6. Data Volume Pekerjaan	43
4.7. Perhitungan Lapangan Produktivitas dan Waktu Alat Berat.....	44
4.7.1. Pekerjaan Galian Secara Mekanis.....	44
4.7.2. Pekerjaan Galian Secara Peledakan	46
4.8. Produktivitas di Lapangan dengan Alat Eksisting	48
4.9. Durasi Waktu dan Biaya Alternatif 1	49
4.10. Durasi Waktu dan Biaya Alternatif 2	49
4.11. Perbandingan Biaya dan Durasi Kondisi Alternatif terhadap Eksisting	52
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	54
5.1. Kesimpulan	54
5.2. Saran	55

DAFTAR PUSTAKA



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Kebutuhan Alat pada Pekerjaan Galian.....	19
Tabel 4.1. Durasi Hari Berdasar Alat Eksisting	48
Tabel 4.2. Biaya Sewa Alat Berat Per Jam	48
Tabel 4.3. Durasi Hari Berdasar Alternatif 1	49
Tabel 4.4. Simulasi Pembagian Jam Kerja Alternatif 2	51
Tabel 4.5. Durasi Hari Berdasar Alternatif 2	51
Tabel 4.6. Perbandingan Biaya dan Durasi Alternatif	51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Simulasi Fotogametri Kondisi Lapangan.....	19
Gambar 2.2. Desain Portal Inlet.....	20
Gambar 2.3. Skema Galian Metode <i>Top Heading and Bench</i>	21
Gambar 2.4. Tipikal Pot. Melintang dan Memanjang <i>Steel Support</i>	24
Gambar 2.5. Penyemprotan <i>Shotcrete</i>	25
Gambar 2.6. Pemasangan <i>Wiremesh</i>	25
Gambar 2.7. Pengeboran untuk Pemasangan <i>Rockbolt</i>	26
Gambar 2.8. Penyemprotan <i>Shotcrete</i>	27
Gambar 2.9. <i>Excavator</i> Komatsu PC 200.....	28
Gambar 2.10. Kapasitas Produksi <i>Excavator</i> PC 200.....	28
Gambar 2.11. <i>Dump Truck</i>	29
Gambar 2.12. Kapasitas Produksi <i>Dump Truck</i>	29
Gambar 2.13. <i>Total station</i>	30
Gambar 2.14. <i>Bulldozer</i>	31
Gambar 2.15. CRD	32
Gambar 3.1. Faktor Efisiensi Alat.....	35
Gambar 4.1. Lokasi Bendungan Mbay	36
Gambar 4.2. Potongan Memanjang Terowongan Pengelak	37
Gambar 4.3. Galian <i>Inlet</i> Terowongan Pengelak	37
Gambar 4.4. Denah <i>Inlet & Outlet</i> Terowongan Pengelak	38
Gambar 4.5. Pekerjaan <i>Shotcrete</i>	38
Gambar 4.6. Denah Bendungan Mbay	39
Gambar 4.7. Foto Udara Bendungan Mbay	40
Gambar 4.8. Tipikal terowongan Pengelak.....	40
Gambar 4.9. Demah Terowongan Pengelak.....	41
Gambar 4.10. Pembagian Segmen Galian	41
Gambar 4.11. Skema Galian Tahap 1	42
Gambar 4.12. Skema Galian Tahap 2	42
Gambar 4.13. Skema Galian Tahap 3.....	43

**PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PEKERJAAN GALIAN
TEROWONGAN PENGELAK BENDUNGAN MBAY KABUPATEN
NAGEKEO NUSA TENGGARA TIMUR MENGGUNAKAN
*NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD***

Abstrak

Pembangunan infrastruktur sumber daya air seperti bendungan merupakan upaya strategis dalam mendukung ketahanan pangan dan air di Indonesia. Salah satu komponen penting dalam pembangunan bendungan adalah terowongan pengelak (diversion tunnel) yang berfungsi untuk mengalirkan air sungai sementara selama proses konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis produktivitas serta efektivitas penggunaan alat berat pada pekerjaan galian terowongan pengelak Bendungan Mbay di Kabupaten Nagekeo, Nusa Tenggara Timur, dengan metode New Austrian Tunneling Method (NATM). Data penelitian diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara, serta dokumen proyek. Analisis dilakukan dengan menghitung produktivitas, durasi, serta biaya sewa alat berat pada kondisi eksisting dan alternatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi eksisting menghasilkan durasi pekerjaan selama 27 hari dengan biaya sewa sebesar Rp 335.106.072. Alternatif 1, dengan penambahan jam kerja menjadi dua shift, mampu mempercepat durasi menjadi 23 hari (percepatan 14,81%) dengan kenaikan biaya 15,32%. Alternatif 2, dengan tiga shift dan penambahan unit alat, mempercepat durasi menjadi 17 hari (percepatan 37,04%) dengan kenaikan biaya 31,78%. Kesimpulannya, Alternatif 1 lebih efisien secara biaya, sementara Alternatif 2 lebih unggul dalam percepatan waktu.

Kata kunci: Alat Berat, Bendungan Mbay, NATM, Produktivitas, Terowongan Pengelak

**PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PEKERJAAN GALIAN
TEROWONGAN PENGELAK BENDUNGAN MBAY KABUPATEN
NAGEKEO NUSA TENGGARA TIMUR MENGGUNAKAN
*NEW AUSTRIAN TUNNELING METHOD***

Abstract

The construction of water resources infrastructure such as dams is a strategic effort to support food and water security in Indonesia. One of the key components in dam construction is the diversion tunnel, which temporarily diverts river flow during the construction process. This research aims to analyze the productivity and effectiveness of heavy equipment used in the excavation works of the diversion tunnel at Mbay Dam, Nagekeo Regency, East Nusa Tenggara, using the New Austrian Tunneling Method (NATM). Data were obtained through field observation, interviews, and project documentation. The analysis was carried out by calculating the productivity, duration, and rental costs of heavy equipment under existing and alternative conditions. The results show that the existing condition required 27 days of work duration with a total equipment rental cost of IDR 335,106,072. Alternative 1, with two working shifts, reduced the duration to 23 days (14.81% faster) with an additional cost of 15.32%. Alternative 2, with three shifts and additional equipment units, reduced the duration to 17 days (37.04% faster) with an additional cost of 31.78%. In conclusion, Alternative 1 is more cost-efficient, while Alternative 2 provides better time acceleration.

Keywords : Mbay Dam, NATM, productivity, heavy equipment, diversion tunnel

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Pembangunan infrastruktur sumber daya air seperti bendungan memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung ketahanan air dan pangan nasional, terutama di wilayah yang memiliki tingkat curah hujan tidak merata seperti di Nusa Tenggara Timur. Salah satu proyek strategis yang sedang dikembangkan adalah Bendungan Mbay di Kabupaten Nagekeo, Nusa Tenggara Timur. Bendungan ini dirancang untuk menunjang kebutuhan irigasi, pengendalian banjir, penyediaan air baku, serta potensi pembangkit listrik tenaga mikrohidro di masa mendatang.

Pada proses pembangunan bendungan, salah satu bagian vital adalah terowongan pengelak (diversion tunnel) yang berfungsi untuk mengalirkan air sungai selama masa konstruksi, sehingga pekerjaan struktur utama bendungan dapat dilakukan dalam kondisi kering dan aman. Mengingat kondisi geologi di wilayah Nagekeo yang cukup kompleks serta pentingnya kestabilan lereng dan keselamatan kerja, pemilihan metode galian terowongan yang tepat menjadi sangat krusial. *New Austrian Tunneling Method (NATM)* merupakan salah satu metode konstruksi terowongan yang banyak digunakan di berbagai belahan dunia.. Metode ini memanfaatkan kekuatan massa batuan itu sendiri untuk mendukung kestabilan terowongan, dengan mengandalkan monitoring deformasi serta penguatan yang fleksibel dan adaptif terhadap kondisi lapangan.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang diatas, maka perumusan masalah dilakukan sebagai berikut :

1. Bagaimanakah produktivitas alat-alat berat memengaruhi proses pelaksanaan pekerjaan terowongan pengelak dengan metode *NATM*?
2. Bagaimanakan efektivitas alat yang tepat dalam menunjang proses pelaksanaan pekerjaan terowongan pengelak?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengidentifikasi produktivitas alat berat yang digunakan dalam proses pelaksanaan pembangunan terowongan pengelak sesuai jenis pekerjaannya.
2. Menganalisa efektivitas alat berat yang tepat dalam menunjang proses pelaksanaan pekerjaan terowongan pengelak.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

Manfaat penelitian dari tugas akhir ini adalah menganalisa produktivitas alat berat pada proses pekerjaan terowongan pengelak berdasarkan spesifikasi teknis dan metode pelaksanaannya.

1.5 BATASAN MASALAH

Dalam penyusunan penelitian tugas akhir ini, penulis menetapkan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Lingkup yang dibahas adalah proses pekerjaan galian terowongan pengelak menggunakan alat kerja mekanis.
2. Tidak membahas secara detail pekerjaan *blasting*.
3. Analisa perhitungan alternatif alat diterapkan pada pekerjaan galian terowongan segmen 1-7.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Metode Pelaksanaan (*Construction Method*) merupakan Teknik dalam melaksanakan pekerjaan konstruksi dengan mengikuti tahapan kegiatan yang rasional, realistik, serta memungkinkan untuk dilakukan dengan pemanfaatan sumber daya secara efektif (Peraturan Menteri, 2008).

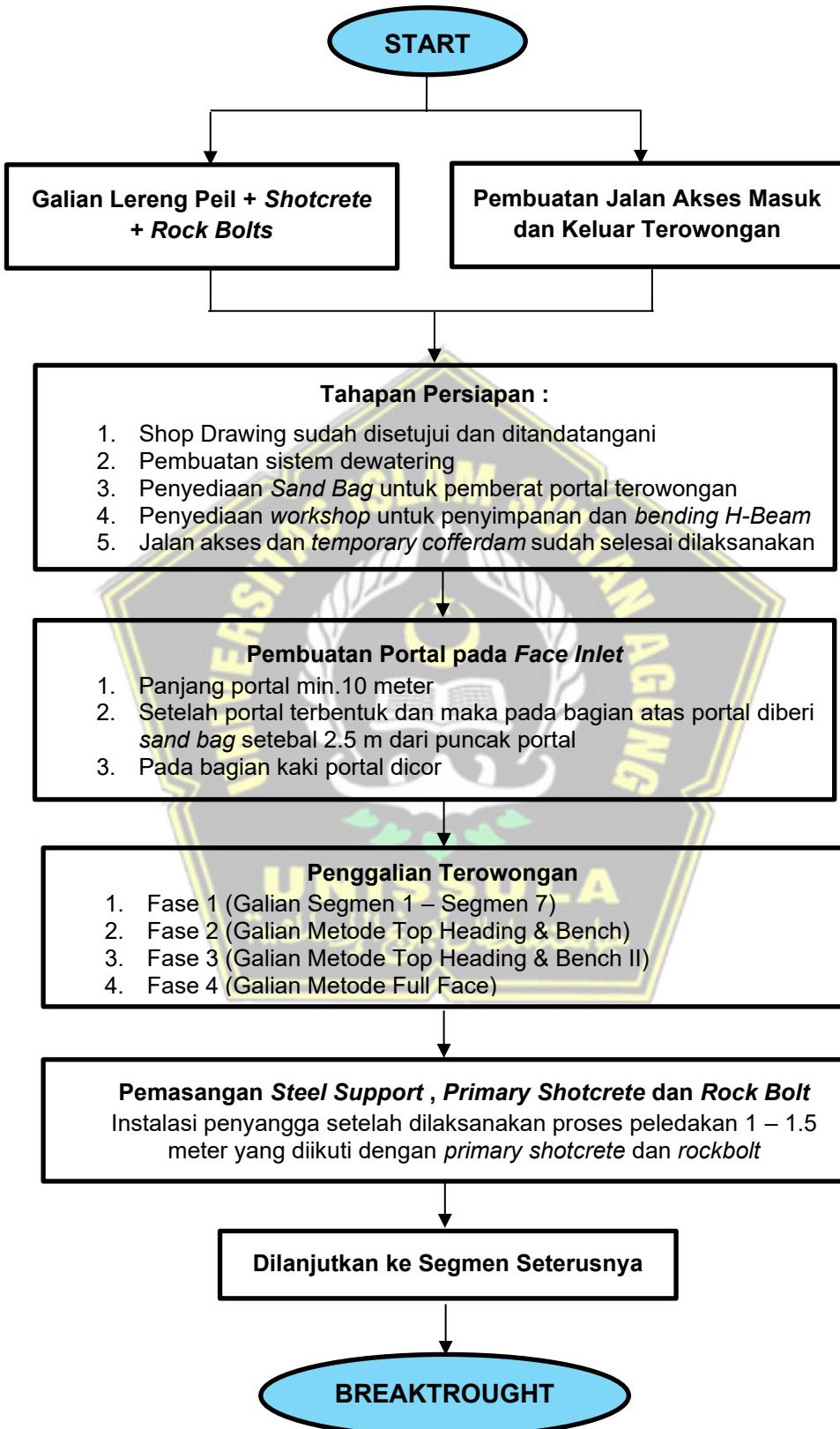
Bangunan pengelak adalah bangunan yang terdiri dari saluran pengelak dan bendungan pengelak. Bangunan ini berfungsi untuk mengalihkan sementara aliran sungai sehingga lokasi konstruksi bebas air. Saluran pengelak berfungsi sebagai penyalur debit sungai sementara, sedangkan bendungan pengelak berfungsi sebagai penghalang sementara aliran sungai sehingga lokasi konstruksi kering. Saluran pengelak dapat juga berfungsi sebagai bangunan pengatur air baku dan untuk jaringan irigasi. Terdapat dua jenis saluran pengelak yang dapat digunakan tergantung pada kondisi di lapangan (Bureau of Reclamation, 1987).

New Austrian Tunneling Method menurut Sauer (1988) didefinisikan sebagai metode pembentukan ruang bawah tanah dengan memanfaatkan berbagai teknik yang tersedia untuk meningkatkan kekuatan batuan maupun tanah, sehingga terowongan dapat mencapai kondisi stabil. Prinsip utama dalam konstruksi *NATM* adalah penggalian terowongan yang segera diperkuat dengan *shotcrete* dan *rockbolt* sebagai penopang sementara sebelum *pemasangan struktur lining* permanen.

Selanjutnya, sebagaimana dikembangkan oleh von Rabcewicz, Müller, dan Pacher pada periode 1957–1965, *NATM* dikenal sebagai pendekatan modern dalam konstruksi terowongan yang menitikberatkan pada pemantauan kondisi lapangan secara *real-time* serta pemanfaatan kekuatan alami massa batuan sebagai bagian dari sistem penyangga.

2.2 Tahapan Pekerjaan Pembangunan Terowongan Pengelak

Berikut merupakan tahapan pekerjaan dalam konstruksi terowongan pengelak :



2.2.1 Pekerjaan Persiapan

Pekerjaan persiapan mencakup kegiatan perencanaan serta pembangunan fasilitas sementara (*temporary facilities*) yang dibutuhkan dalam proses konstruksi terowongan (PT.PP, 2003). Agar pelaksanaannya optimal, diperlukan tahapan perencanaan yang mempertimbangkan aspek biaya, jadwal pekerjaan, hingga target capaian.



Gambar 2.1 Simulasi Fotogrametri Kondisi Lapangan
(Sumber:Dokumentasi Lapangan,2022)

2.2.2 Pekerjaan Galian Tanah Terbuka

a. Umum

Pekerjaan galian tanah merupakan aktivitas pemindahan material dari lokasi asal ke lokasi lain, termasuk ke *disposal* area sebagai area pembuangan. Pada proses ini, tanah digali guna membentuk kontur atau elevasi sesuai dengan rancangan desain terowongan pengelak (BWS NT II, 2021).

b. Alat yang dibutuhkan

Pada pekerjaan galian tanah dibutuhkan alat berat sebagai berikut :

Tabel 2.1 Kebutuhan Alat pada Pekerjaan Galian

No	Jenis Alat	Kapasitas	Fungsi
1	Excavator	0,9 m ³	Menggali dan mengangkut hasil galian
2	Dump Truck	20 ton	Memuat hasil galian
3	Total Station	-	Pengukuran
4	Bulldozer	15 ton	Menggali, mengumpulkan dan meratakan

(Sumber:Data Teknik PT. Brantas Abipraya,2022)

2.2.3 Pekerjaan Portal pada Face Inlet

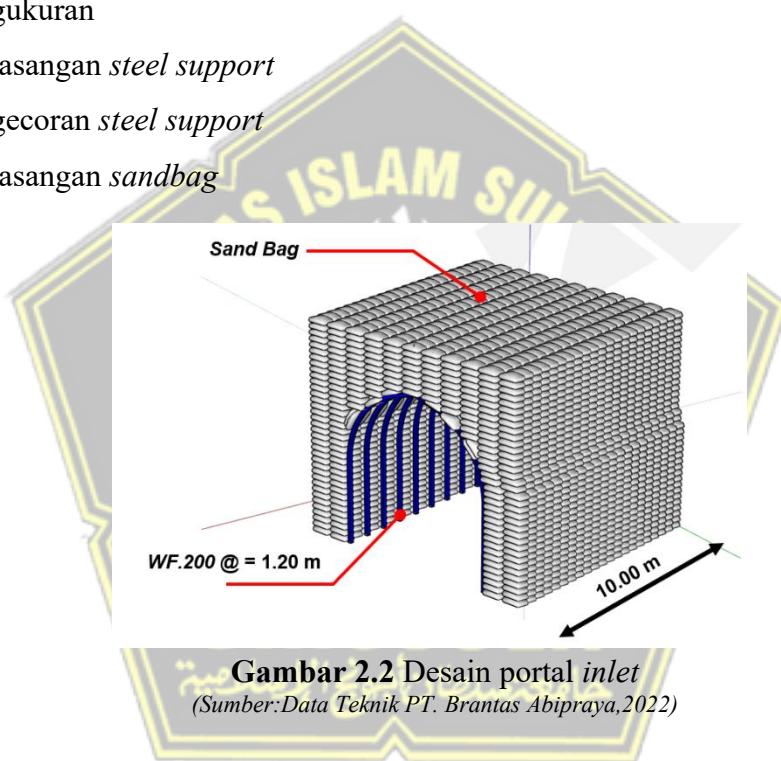
a. Umum

Kontruksi penyangga sementara berupa portal yang berfungsi sebagai perkuatan dan pengaman area *inlet-outlet* dari keruntahan/ longsoran material dari atas tebing ketika pelaksanaan konstruksi terowongan. Portal di pasang sejauh 10 meter dari *face* terowongan dengan jarak 1 meter tiap portalnya dan produksi *sandbag* di monitoring sampai ketinggian yang disepakati (Imam Fahrul, 2023).

b. Tahapan pekerjaan

Berikut tahapan pada pekerjaan portal:

- Pengukuran
- Pemasangan *steel support*
- Pengecoran *steel support*
- Pemasangan *sandbag*



2.2.4 Pekerjaan Galian Terowongan

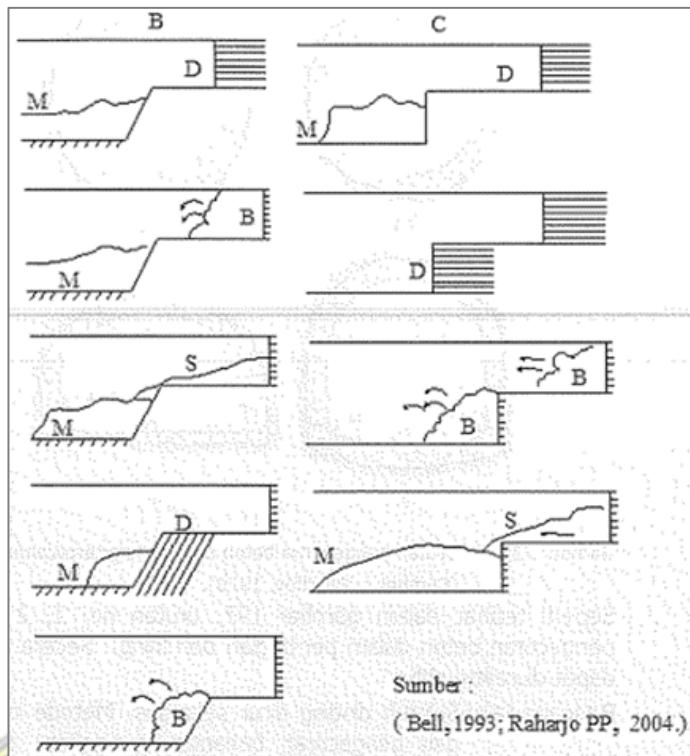
Pekerjaan penggalian terowongan meliputi pekerjaan (PT. PP, 2003) :

- a. Pekerjaan persiapan/*surveying*; meliputi pekerjaan *marking* dan pengukuran, pemanasan alat-alat, pembagian tugas pekerja, dll.
- b. *Drilling* merupakan pembuatan lubang untuk diisi dinamit dan dilaksanakan menurut pola yang sudah ditentukan
- c. *Charging* merupakan tahap pengisian dinamit dalam lubang bor dengan alat stick kayu $d = 30$ mm.

- d. *Blasting* merupakan proses peledakan dinamit yang telah terpasang sesuai pola *drilling* yang ada, menggunakan *blasting machine*.
- e. *Ventilating* merupakan penghembusan udara segar dari *blower* setelah selesai *blasting* untuk membersihkan udara dari asap dan gas yang ditimbulkan oleh peledakan.
- f. *Mucking* merupakan pekerjaan pembuangan material hasil *blasting* keluar *tunnel*, menggunakan alat-alat angkur seperti *wheel loader*, *dump truck* atau dengan lori maupun *conveyor*, tergantung kondisi setempat.
- g. *Scalling* yaitu membongkar batu-batu yang masih tersisa pada permukaan galian setelah *blasting*, yang dapat membahayakan. Pekerjaan ini dilakukan dengan menggunakan alat *backhoe* dan *dump truck*.
- h. *Shotcreting* dikerjakan setelah *scalling* sebagai konstruksi penyangga sementara terowongan, menggunakan alat khusus yang disebut juga *robot shotcrete* atau *aliva shotcrete placer*.
- i. *Rock bolting* yaitu *rock bolt* sebagai konstruksi penyangga sementara di samping *shotcrete*. Pemasangannya adalah dengan alat bor.

Metode Galian *Top Heading and Bench*

Metode *Heading and Bench* merupakan teknik penggalian terowongan dengan mendahuluikan penggalian pada bagian atas penampang, kemudian dilanjutkan dengan bagian bawah. Setelah bagian atas (*heading*) digali sepanjang 3–3,5 meter, barulah dilakukan penggalian bagian bawah (*bench cut*) hingga terbentuk penampang terowongan sesuai desain. Metode ini umumnya digunakan pada kondisi dengan *bridging capacity* yang rendah, khususnya pada *adit* berdiameter besar (Rai Made Aswata Rai, 1988).



Gambar 2.3 Skema Galian Metode *Top Heading and Bench*

Ket : D = *Drilling*

M = *Mucking*

S = *Scaling*

B = *Blasting*

Langkah metode *top heading and bench* (B)

1. Langkah pertama dalam metode *top heading and bench* (B) adalah melakukan pemboran horizontal pada bagian atas penampang terowongan sebagai persiapan sebelum peledakan dilakukan.
2. Langkah kedua yaitu peledakan bagian atas, di mana hasil dari pemboran tersebut diledakkan untuk membuka ruang galian pada bagian atas terowongan.
3. Selanjutnya, tahap ketiga adalah perataan (scaling), yaitu membersihkan dan meratakan permukaan hasil peledakan agar lebih stabil serta aman untuk pekerjaan berikutnya.
4. Pada langkah keempat dilakukan pemindahan hasil peledakan bagian atas, yaitu mengangkut material hasil galian ke lokasi pembuangan atau *disposal area*.

5. Kemudian, tahap kelima adalah pemboran vertikal pada bagian bawah, yang dilakukan sebagai persiapan untuk proses peledakan pada bagian bawah penampang terowongan.
6. Terakhir, pada langkah keenam dilakukan peledakan bagian bawah, sehingga seluruh penampang terowongan dapat terbentuk sesuai dengan desain yang telah direncanakan.

Langkah metode *top heading and bench (C)*

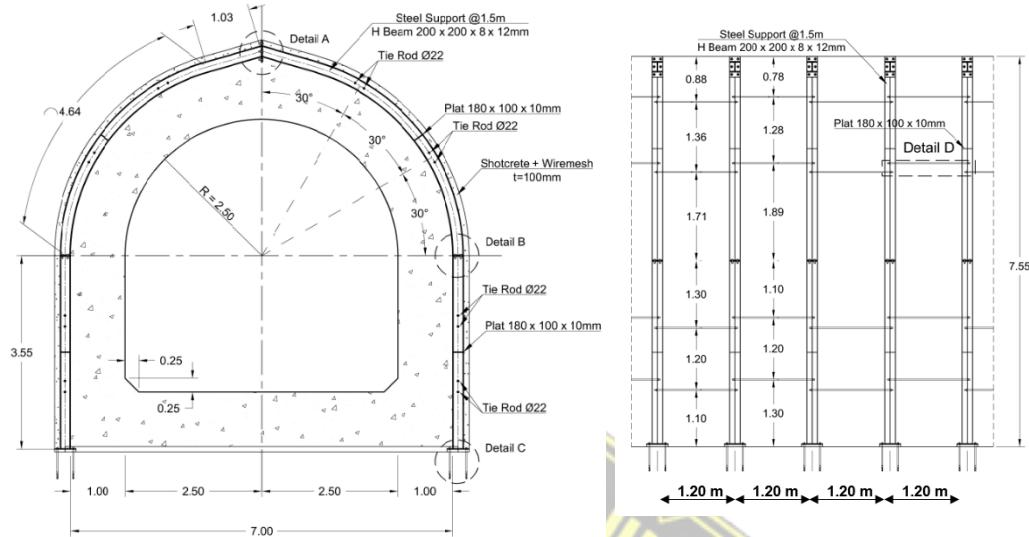
1. Langkah pertama dalam metode *top heading and bench (C)* adalah melakukan pemboran horizontal pada bagian atas terowongan sebagai persiapan untuk proses peledakan.
2. Langkah kedua yaitu pemindahan material hasil peledakan pada bagian bawah, agar area kerja tetap bersih dan dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya.
3. Selanjutnya, tahap ketiga adalah pemboran horizontal pada bagian bawah terowongan, yang dilakukan untuk mempersiapkan proses peledakan pada area tersebut.
4. Pada langkah keempat dilakukan peledakan secara bersamaan pada bagian atas dan bagian bawah, sehingga menghasilkan ruang galian yang lebih luas sekaligus mempercepat proses penggeraan.
5. Tahap kelima adalah perataan pada bagian atas terowongan, yakni membersihkan dan merapikan permukaan hasil peledakan agar lebih stabil.
6. Terakhir, langkah keenam yaitu pemindahan material hasil peledakan pada bagian atas dan bawah, sehingga area kerja kembali siap untuk tahapan konstruksi selanjutnya.

2.2.5 Pekerjaan *Steel Support*

Pemasangan *steel support* berfungsi sebagai penopang utama terowongan dari keruntuhan. Material yang digunakan yaitu WF yang dibentuk dengan bantuan *bending machine* sesuai dengan bentuk muka terowongan. Pemasangan *steel rib* dilakukan setiap selesai satu *cycle/* kedalaman penggalian (± 1.0 meter) (Imam Fahrul, 2023). Berikut tahapan pekerjaan pemasangan *steel support* :

- Pengukuran titik koordinat

- Pemasangan *join steel support*
- Pemasangan angkur
- Pengcoran pondasi *steel support*



Gambar 2.4 Tipikal Pot. Melintang dan Memanjang Steel Support
(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)

2.2.6 Pekerjaan Primary Shotcrete

Primary shotcrete berfungsi melapisi *face* terowongan dari reruntuhan tanah dan bebatuan terhadap *man power* atau alat di sekitar. Produksi material *shotcrete* menggunakan *carmix* dengan *mix design shotcrete*; *portland cement PCC*, agregat halus, agregat kasar, *admixture accelerator*, dan air. Untuk penyemprotan/ aplikasi dilakukan oleh pekerja menggunakan *shotcrete gun / nozzle* dan dibantu menggunakan *excavator bucket* yang sudah dilengkapi dengan keranjang *miner* dengan ketebalan 5 cm (Imam Fahrul, 2023).



Gambar 2.5 Penyemprotan *Shotcrete*
(Sumber: Dokumentasi Proyek, 2023)

2.2.7 Pekerjaan *Wiremesh*

Pemasangan *wiremesh* dibantu menggunakan *excavator bucket* yang telah dilengkapi keranjang *miner*. *Wiremesh* dipasang di antara *steel support* dan diperkuat dengan ikatan kawat. *Wiremesh* tidak menempel pada galian *face tunnel* (Imam Fahrul, 2023).



Gambar 2.6 Pemasangan *Wiremesh*
(Sumber: Dokumentasi Proyek, 2023)

2.2.8 Pekerjaan *Rockbolt*

Rockbolt merupakan penyangga aksial/aktif yang sangat diperlukan untuk mengurangi resiko runtuh pada terowongan. Material *rockbolt* yang digunakan adalah baja ulir dan mur dengan diameter 25mm. *Rockbolt* ditanam pada lubang bor dengan menggunakan material *grouting*, yaitu semen PCC ditambah air dengan

nilai *pull out* sesuai spesifikasi teknis (Imam Fahrul, 2023). Berikut tahapan pekerjaan *rockbolt*:



Gambar 2.10 Sequence Pekerjaan Pemasangan Rockbolt



Gambar 2.7 Pengeboran untuk Pemasangan Rockbolt

(Sumber: Dokumentasi Proyek, 2023)

2.2.9 Pekerjaan Secondary Shotcrete

Pekerjaan *secondary shotcrete* dilakukan dengan tujuan melapisi *wiremesh* sekaligus berfungsi sebagai tahap akhir (*finishing*) pada galian terowongan. Bahan *shotcrete* diproduksi menggunakan carmix dengan rancangan campuran (*mix design*) berupa semen *portland* PCC, agregat halus dan kasar, tambahan *admixture accelerator*, serta air. Proses aplikasinya dilaksanakan menggunakan *shotcrete gun/nozzle* dan dapat dibantu dengan *excavator bucket* yang dilengkapi keranjang minir, dengan ketebalan lapisan sekitar 10 cm. Salah satu keunggulan *shotcrete* yaitu kemampuannya berinteraksi langsung dengan massa batuan di sekitarnya. Suatu lapisan *shotcrete* yang "ditembakkan" pada permukaan batuan yang baru saja digali akan membentuk permukaan keras dan dengan demikian batuan yang kurang keras ditransformasikan menjadi suatu permukaan yang stabil dan keras (PT.PP, 2003).



Gambar 2.8 Penyemprotan *Shotcrete*

(Sumber: Dokumentasi Proyek, 2022)

2.3 Alat Berat yang Digunakan dalam Pekerjaan Pembangunan Terowongan

2.3.1 *Excavator Bakhoe*

Excavator merupakan alat mekanis yang berfungsi untuk menggali, memindahkan, sekaligus memuat material tanah tanpa harus sering berpindah lokasi (Sulistiono, 1996). Dalam pekerjaan galian tanah terbuka, tipe excavator yang umum dipakai adalah *backhoe excavator* merek Komatsu PC 200 dengan kapasitas bucket sebesar 0,97 m³. Bagian-bagian dari *excavator* adalah :

- a. *Travel unit*, merupakan bagian untuk berpindah (roda ban atau roda lantai).
- b. *Resolving unit*, adalah komponen yang dapat berputar dan menjadi pusat dari seluruh pergerakan alat. Bagian – bagian penting dari *resolving unit* adalah *cabi*, *control levers* dan *operator seat*.
- c. *Attachment* yang terpasang pada *excavator* memiliki beberapa jenis sesuai kebutuhan pekerjaan. Jenis – jenis *attachment* yang biasa digunakan adalah sebagai berikut:
 - *Shovels*
 - *Dragline*
 - *Backhoe*
 - *Clamshell*

Waktu kerja dan siklus *excavator* gerakan – gerakan *backhoe* dalam beroperasi ada empat macam, diantaranya adalah:

- Pengisian *bucket* (*load bucket*)

- Mengangkat dan *swing (swing loaded)*
- Membuang (*dumping*)
- Mengayun balik



Gambar 2.9 Excavator Komatsu PC 200

(Sumber:<https://products.unitedtractors.com>)

HYDRAULIC EXCAVATOR	
INPUT:	
1. TYPE EXCAVATOR	: PC200-6
2. BUCKET FACTOR	: Ringan
3. CYCLE TIME	
- Kedalaman & Kondisi Galian	: 0m - 2m (ringan)
- Sudut <i>Swing Bucket</i>	: 45° - 90°
- Tempat Pembuangan	: Dumpruck
4. JOB EFFICIENCY	
- Equipment Efficiency	: 0.80
- Operator Efficiency	: Terampil
- Natural Efficiency	: Terang, segar
OUTPUT:	
KAPASITAS PRODUKSI EXCAVATOR	: 83.00 m³/Hr (Loose Cubic Meter)

Gambar 2.10 Kapasitas Produksi Excavator PC 200

(Sumber:PT.PP,2003)

2.3.2 Dump Truck

Dump truck merupakan kendaraan berat yang dirancang untuk mengangkut dan menurunkan material dengan mekanisme hidrolik yang berfungsi untuk mengangkat bak muatan agar material dapat diturunkan dengan mudah. Mekanisme tersebut dikendalikan oleh pengemudi dengan mengaktifkan kontrol hidrolik.

Cara kerja *dump truck* :

- Proses pengangkutan material
- Perjalanan ke lokasi pembuangan

- Proses pembuangan material dengan sistem hidrolik
- Menurunkan bak kembali ke posisi awal



Gambar 2.11 Dump Truck
(Sumber: <https://jualalatberat.id/product/>)

DUMP TRUCK	
INPUT:	
1. DUMP TRUCK CAPACITY	: 11 Ton
2. LOADER EQUIPMENT	: Backhoe
3. EXCAVATION TYPE	: Common
4. CYCLE TIME	
- Hauling Distance (m')	: 2000
- Average speed of loaded truck (Km/Hr)	: 20
- Average speed of empty truck (Km/Hr)	: 40
5. JOB EFFICIENCY (Operating Condition)	: Baik sekali
OUTPUT:	
KAPASITAS PRODUKSI EXCAVATOR	: 14.67 m ³ /Hr (Loose Cubic Meter)

Gambar 2.12 Kapasitas Produksi Dump Truck
(Sumber: PT.PP,2003)

2.3.3 Total Station

Total station merupakan instrumen elektronik yang digunakan untuk mengukur sudut dan jarak, di mana seluruh fungsi tersebut terintegrasi dalam satu perangkat. Data hasil pengukuran dapat direkam melalui media penyimpanan, baik yang bersifat internal (on-board), eksternal seperti *field book*, maupun menggunakan *card*. Alat ini meminimalkan kesalahan pencatatan karena hasil tersimpan secara otomatis. Selain itu, *total station* mampu melakukan berbagai perhitungan langsung di dalam perangkat, seperti pengukuran jarak horizontal, beda elevasi, dan perhitungan lainnya. Perangkat ini juga mendukung pengoperasian program-program survei secara praktis (Darmawan, 2015).



Gambar 2.13 Total Station
(Sumber: <https://dndsurvey.id/p/>)

2.3.4 *Bulldozer*

Bulldozer merupakan salah satu jenis alat berat berbentuk traktor yang menggunakan roda rantai (*track*) dan dilengkapi dengan pisau atau *blade* di bagian depan. Mesin ini termasuk traktor dengan daya traksi tinggi. Fungsi utama *bulldozer* adalah untuk kegiatan seperti menggali, mendorong, menggeser, maupun menarik berbagai material (misalnya tanah, pasir, dan sebagainya). *Bulldozer* dapat beroperasi di area dengan kondisi berlumpur, berbatu, bergelombang, maupun di kawasan berhutan. Selain *blade* sebagai perlengkapan standar *bulldozer*, pada sisi belakang *bulldozer* bisa dipasang perlengkapan tambahan berupa :

- a. *Ripper* berfungsi untuk menghancurkan material yang sulit dibongkar hanya dengan *blade*. Alat ini sering digunakan dalam pekerjaan konstruksi jalan maupun pertambangan.
- b. *Winch* berguna untuk menarik material dan kerap dipakai dalam kegiatan penebangan kayu di hutan. *Bulldozer* dengan perlengkapan ini biasanya dipakai dalam pekerjaan *land clearing* untuk meratakan lahan, menggali, serta menumbangkan pohon.



Gambar 2.14 Bulldozer
(Sumber:<https://products.unitedtractors.com>)

BULLDOZER	
INPUT :	
1. TYPE BULLDOZER	: <input type="text" value="D6"/>
2. BLADE FACTOR	: <input type="text" value="Ringan"/>
3. HAULING DISTANCE (M')	: <input type="text" value="20"/>
4. JOB EFFICIENCY	
- Equipment Efficiency	: <input type="text" value="90%"/>
- Operator Efficiency	: <input type="text" value="Sedang"/>
- Natural Efficiency	: <input type="text" value="Terang, segar"/>
OUTPUT :	
KAPASITAS PRODUKSI BULLDOZER	: <input type="text" value="122.00"/> m ³ /Hr (Loose Cubic Meter)

Gambar 2.19 Kapasitas Produksi Bulldozer

(Sumber:PT.PP,2003)

2.3.5 Crawler Rock Drill (CRD)

Secara umum, prinsip kerja *Crawler Rock Drill* (CRD) mirip dengan *jack hammer*, yaitu melakukan pengeboran dengan cara berputar sambil memberikan pukulan atau hentakan ke permukaan batuan. Alat ini biasanya digunakan pada kondisi tanah atau struktur batuan yang sangat keras dan tidak memungkinkan untuk dibongkar dengan alat gali biasa. Secara umum cara kerja (*Crawler Rock Drill*) sama dengan *jack hammer*, yaitu berputar sambil memukul atau menumbuk. Penggunaan alat CRD (*Crawler Rock Drill*) dilakukan apabila kondisi struktur batuan keras terus menerus.

Penggunaan CRD banyak dijumpai pada pekerjaan konstruksi terowongan, tambang terbuka, hingga pembangunan pondasi dalam yang memerlukan penetrasi pada lapisan batuan keras. Sistem pergerakannya yang dilengkapi *crawler* (rantai berjalan) membuat alat ini lebih stabil dan mampu bekerja di medan yang tidak rata maupun curam.



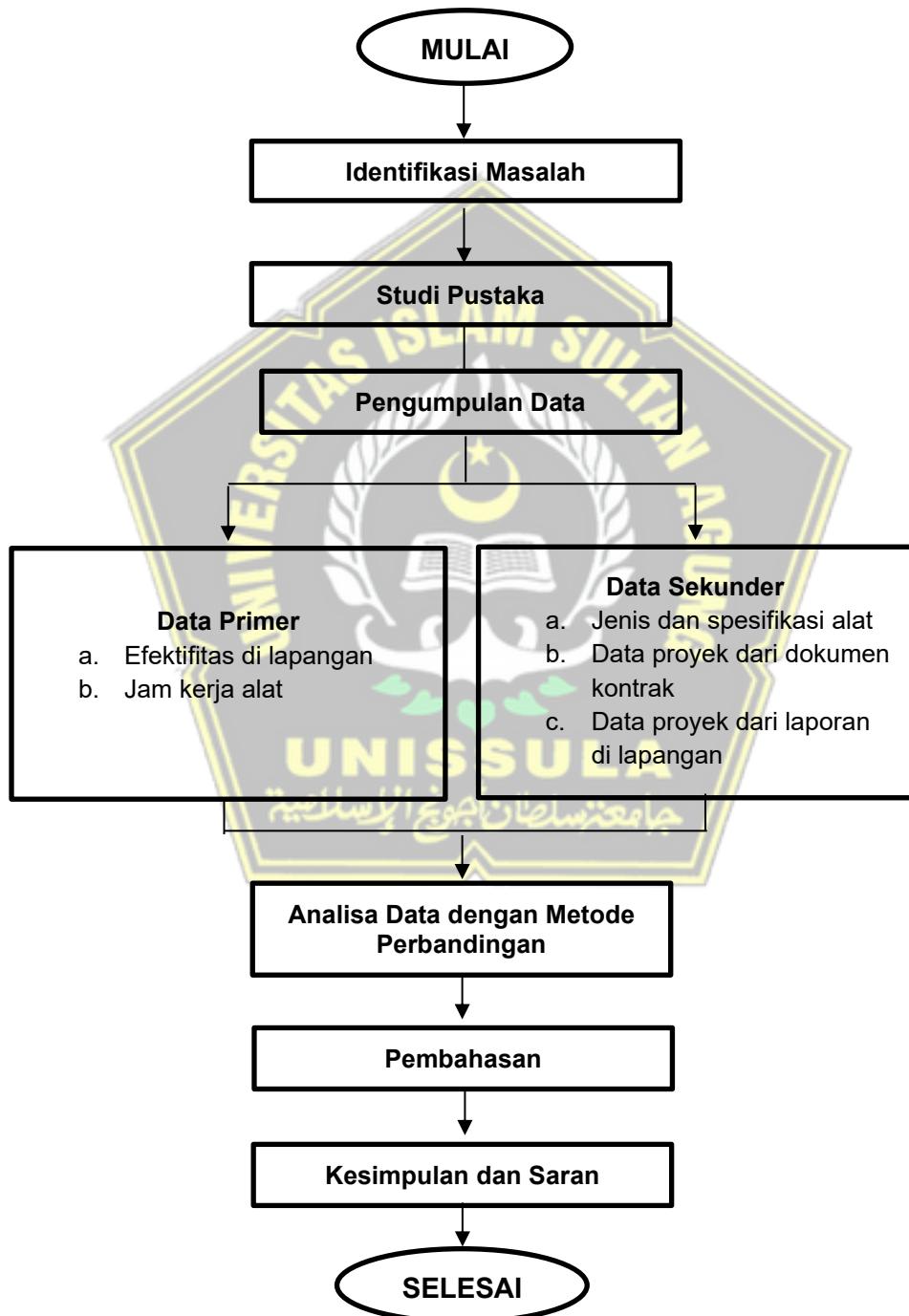
Gambar 2.13 CRD
(Sumber: <https://gemilangprimautama.co.id>)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

Penggunaan diagram alir penelitian bertujuan untuk acuan pelaksanaan agar sistematis dan mempermudah penelitian.



3.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan beberapa metode yaitu :

a.Observasi

Observasi merupakan salah satu metode pengumpulan data dalam penelitian kualitatif yang dilakukan dengan cara mengamati langsung perilaku, aktivitas, serta kondisi di lapangan penelitian. Pengamatan ini bisa dilakukan secara terstruktur maupun tidak terstruktur dengan tujuan memperoleh informasi yang rinci dan akurat mengenai fenomena yang diteliti. Melalui observasi, peneliti dapat memahami fenomena secara langsung, melihat bagaimana perilaku, interaksi, serta konteks lingkungan memengaruhi fenomena tersebut. Dengan demikian, observasi memungkinkan peneliti memperoleh data yang lebih mendalam mengenai perilaku, situasi, maupun interaksi yang mungkin sulit diperoleh melalui metode pengumpulan data lainnya.

b.Wawancara

Wawancara adalah teknik pengumpulan data pada penelitian kualitatif yang dilakukan melalui interaksi langsung antara peneliti dengan responden dalam kurun waktu tertentu. Tujuannya adalah menggali informasi yang lebih rinci, mendalam, serta terperinci mengenai pandangan, pengalaman, persepsi, maupun sikap responden terhadap topik penelitian. Dengan wawancara, peneliti dapat memahami secara lebih mendalam pemahaman serta perspektif responden terhadap fenomena yang sedang dikaji.

3.3 Jenis dan Sumber Data yang Diperlukan

3.3.1 Data Primer

Data primer didapatkan menggunakan data proyek dan wawancara kepada informan yang dipilih, adapun data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Efektifitas di lapangan
- Jam kerja alat

3.3.2 Data Sekunder

Data sekunder, yaitu data yang diperoleh dari instansi terkait, studi-studi yang pernah dilakukan. Data sekunder berfungsi sebagai pendukung data primer. Data yang diambil meliputi :

- Jenis alat dan spesifikasi proyek
- Data proyek yang diambil dari dokumen kontrak
- Data proyek dari laporan di lapangan

3.4 Metode Analisis dan Pengolahan Data

Setelah tahap pengumpulan data, dilakukan proses pengolahaan data dan analisa sehingga mendapatkan hasil dari tujuan penelitian. Berikut analisis data yang dilakukan :

a. Analisis Produktivitas Alat Berat

Analisis produktivitas alat berat dilakukan untuk mendapatkan kombinasi yang paling menguntungkan dari segi waktu dan biaya. Hitungan ini nantinya dapat dikonversi menjadi koefisien alat untuk mengerjakan galian sebesar 1 m³.

Kondisi Kerja	Faktor efisiensi
Mudah	0,83
Sedang	0,8
Agak Sulit	0,75
Sulit	0,7

Gambar 3.1 Faktor Efisiensi Alat

(Sumber: Permen PUPR No.01 Th 2022)

b. Durasi Pekerjaan

Produktivitas sebuah alat dapat memengaruhi lamanya durasi pekerjaan. Durasi pekerjaan dapat dihitung setelah perhitungan volume dan produktivitas alat didapat.

c. Analisis Biaya Pekerjaan

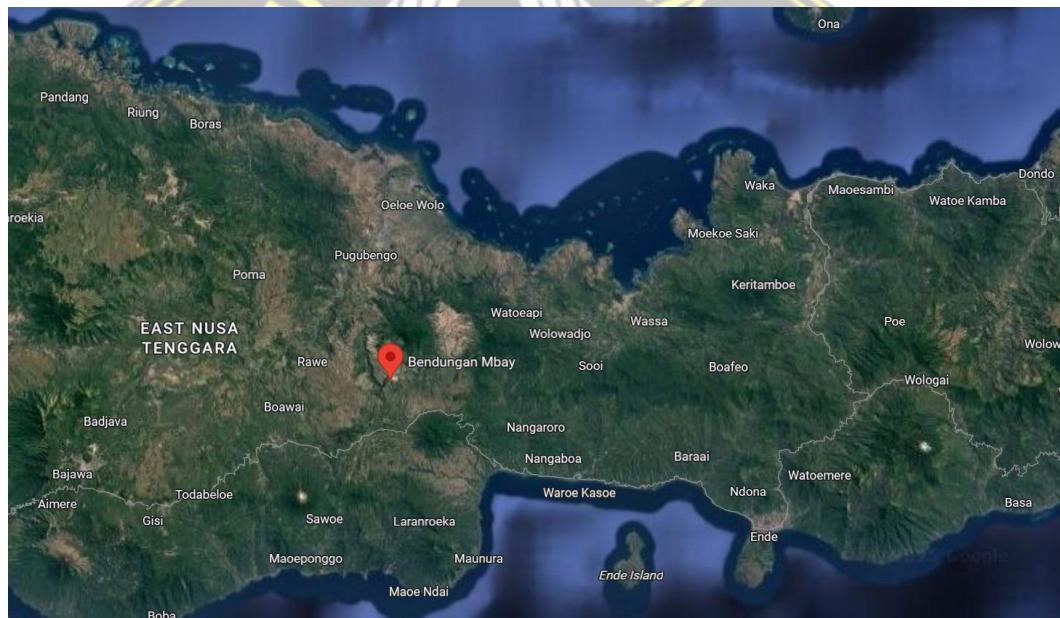
Analisis biaya merupakan hasil akhir dari penelitian setelah mendapat perhitungan durasi dan biaya sewa alat berat digunakan.

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Umum Proyek

Nama Proyek	: Proyek Pembangunan Bendungan Mbay Paket-2
Lokasi	: Kabupaten Nagekeo, Provinsi Nusa Tenggara Timur
Pengguna Jasa	: SNVT Pembangunan Bendungan II BBWS Nusa Tenggara II
Penyedia Jasa	: PT. Brantas Abipraya (Persero)
Konsultan Supervisi	: PT. Indra Karya (Persero)-Rancang Semesta-Sabana KSO
Waktu Pelaksanaan	: 2021-2025
Koordinat	: Lintang Selatan (Latitude) $8^{\circ} 41' 51''$ S (-8.69739°) Bujur Timur (Longitude) $121^{\circ} 16' 40''$ E (121.27782°)



Gambar 4.1 Lokasi Bendungan Mbay
(Sumber: <https://www.google.com/maps>, 2025)

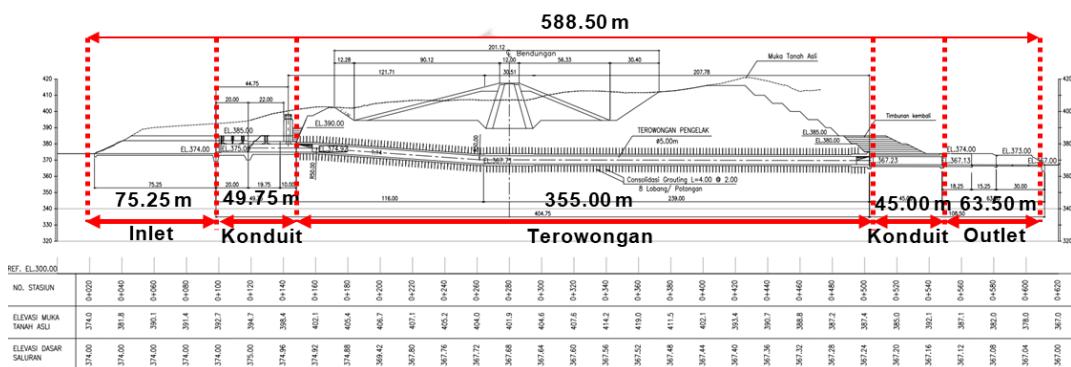
4.2 Pengamatan di Lapangan

Pengamatan dilakukan pada area *inlet-outlet* terowongan dan *quarry stockpile*. Pengamatan bertujuan untuk mengetahui waktu *excavator* saat mengisi *dumptruck*, dan waktu siklus pada saat *dumptruck* beroperasi. Jarak dari *inlet-outlet* menuju *quarry stockpile* sejauh 500-1000 meter.

Metode pelaksanaan galian terowongan pengelak secara garis besar terdiri dari dua pekerjaan, yaitu pekerjaan galian dan pekerjaan proteksi.

4.3 Pekerjaan Galian Terbuka

Pekerjaan galian terbuka merupakan pekerjaan yang dilakukan di lokasi terbuka *inlet* dan *outlet* terowongan, dimana hasil pekerjaan galian dipindahkan ke *stockpile area* (tempat pembuangan material). Galian dilakukan secara bertahap sesuai elevasi dan dimensi yang telah direncanakan, dengan memperhatikan kestabilan lereng serta sistem *drainase* sementara.



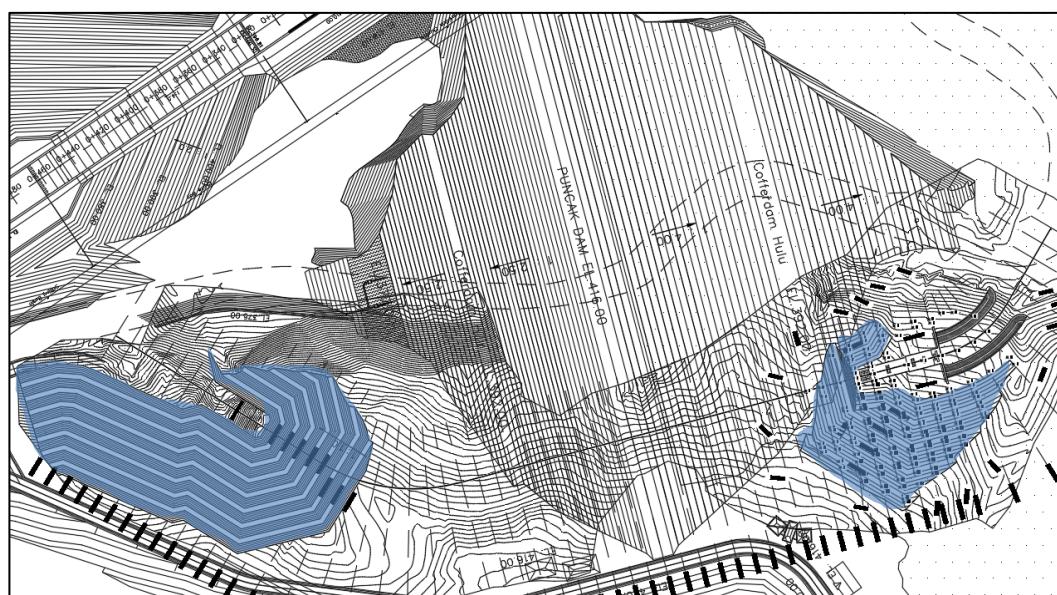
Gambar 4.2 Potongan Memanjang Terowongan Pengelak
(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)



Gambar 4.3 Galian Inlet Terowongan Pengelak
(Sumber:Dokumentasi Lapangan,2022)

4.4 Pekerjaan Proteksi

Pekerjaan proteksi terowongan pada area *inlet* dan *outlet* bertujuan untuk memperkuat struktur terowongan di kedua ujung bukaan, serta melindungi dari potensi erosi, longsoran, dan kerusakan akibat aliran air atau beban tanah. Proteksi ini penting untuk menjamin kestabilan dan kelancaran fungsi terowongan secara menyeluruh.



Gambar 4.4 Denah Inlet & Outlet Terowongan Pengelak
(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)



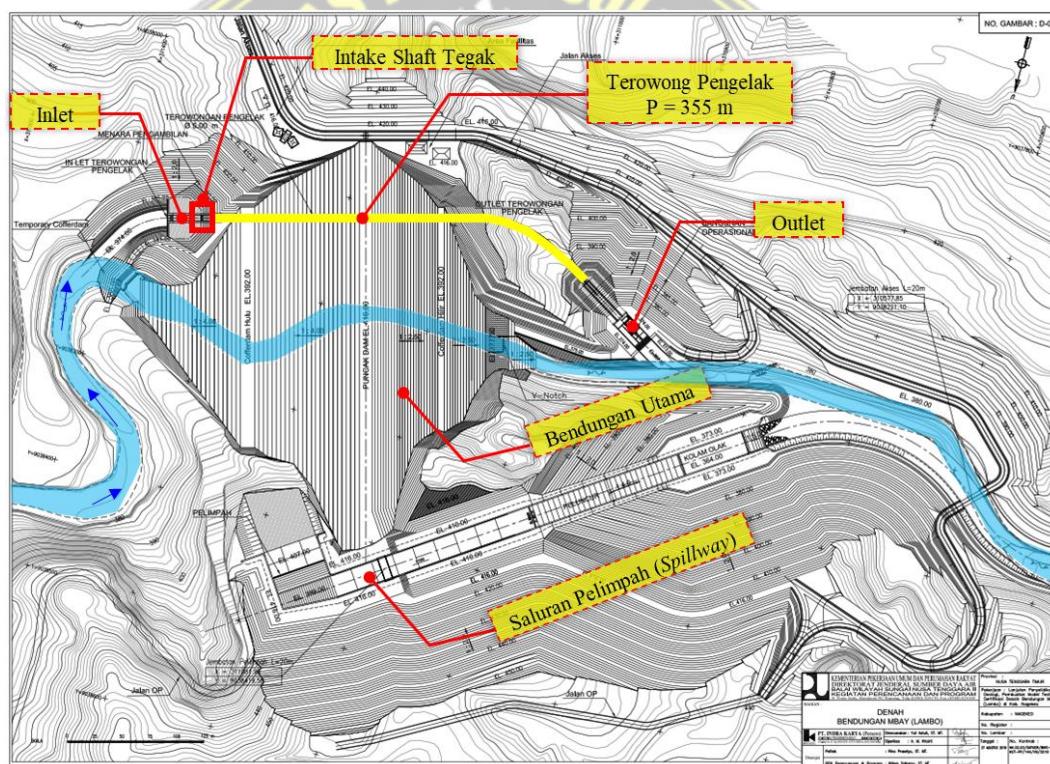
Gambar 4.5 Pekerjaan Shotcrete
(Sumber: Dokumentasi Lapangan, 2022)

4.5 Pekerjaan Galian Terowongan Pengelak

Pelaksanaan pekerjaan galian terowongan pengelak dilakukan setelah selesai pekerjaan persiapan yang meliputi pekerjaan galian terbuka di lokasi *inlet* maupun *outlet* dan proteksi tebing.

4.5.1 Data Teknis Terowongan Pengelak

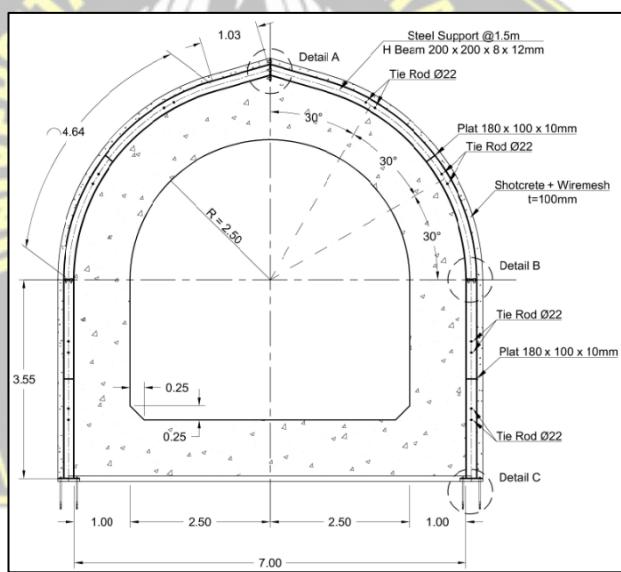
Lokasi	: Sisi kiri bendungan utama
Panjang Terowong	: 355.00 m
Dimensi Terowong	: Ø 5.00 m
Elevasi Terowong	: Hulu El. +375.00 m Hilir El. + =367.23 m
Debit Inflow	: 398.40 m ³ /det
Kapasitas Outflow	: 241.96 m ³ /det
El. MAB	: El. +398.97 m



Gambar 4.6 Denah Bendungan Mbay
(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)



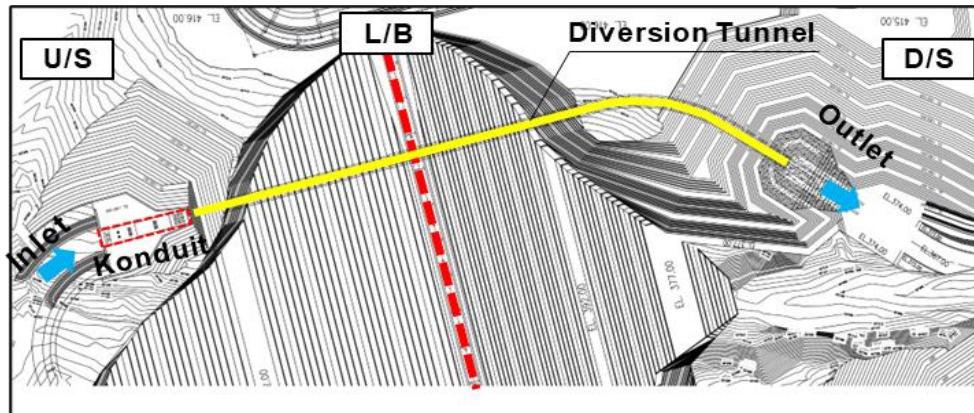
Gambar 4.7 Foto Udara Bendungan Mbay
(Sumber:Dokumentasi Lapangan,2025)



Gambar 4.8 Tipikal Terowongan Pengelak
(Sumber:Data Teknik PT. Brantas Abipraya,2022)

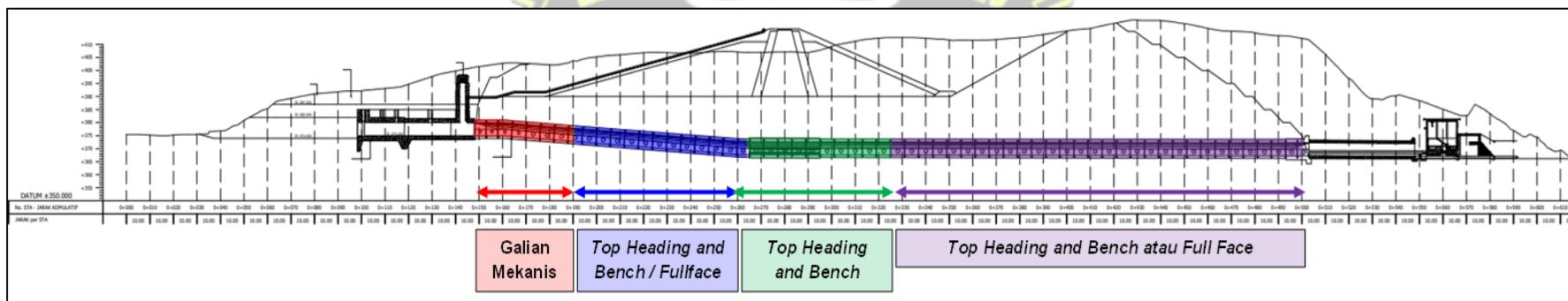
4.5.2 Tahapan Pelaksanaan Pekerjaan Galian Terowongan Pengelak

Pelaksanaan pekerjaan galian terowongan pengelak dilakukan dengan skema sebagai berikut :



Gambar 4.9 Denah Terowongan Pengelak

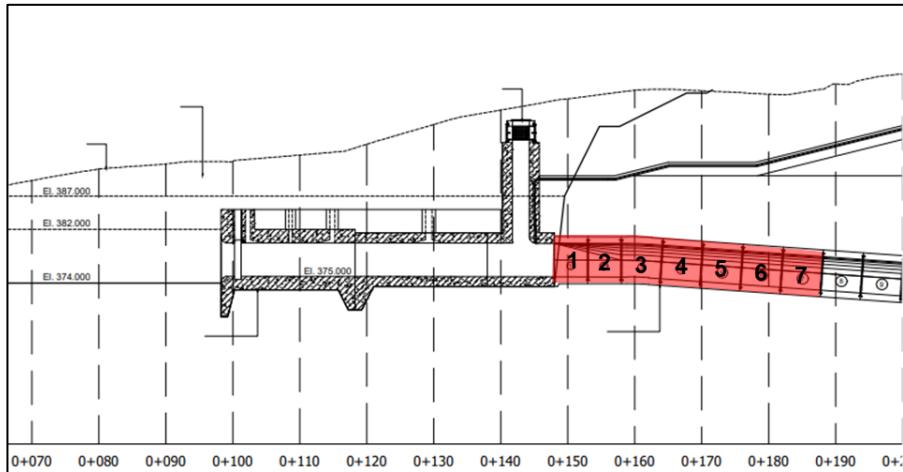
(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)



Gambar 4.10 Pembagian Segmen Galian Terowongan Pengelak

(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)

- Detail Galian Tahap 1

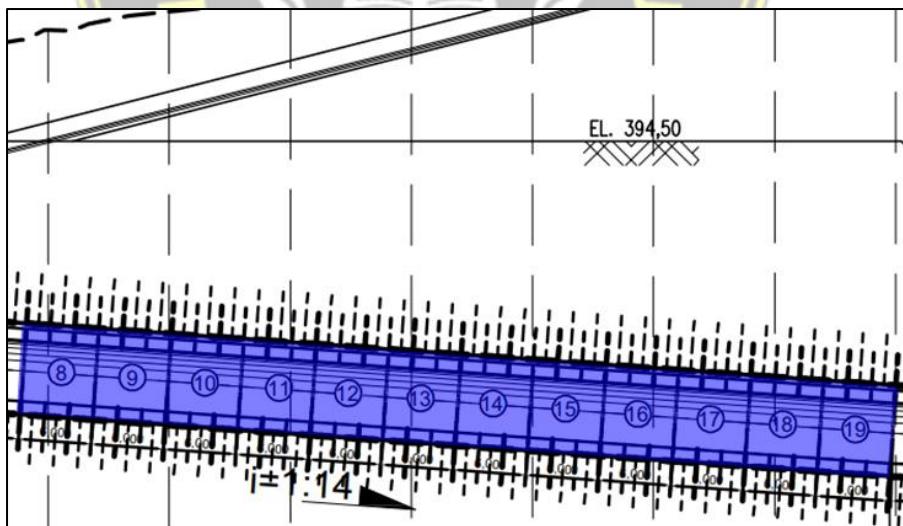


Gambar 4.11 Skema Galian Tahap 1

(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)

Dilakukan pada 7 segmen awal, dengan metode galian mekanis dengan menggunakan alat *excavator/breaker* hal ini bertujuan untuk menjaga kestabilan kondisi lereng yang tipis didepan *face inlet*.

- Detail Galian Tahap 2

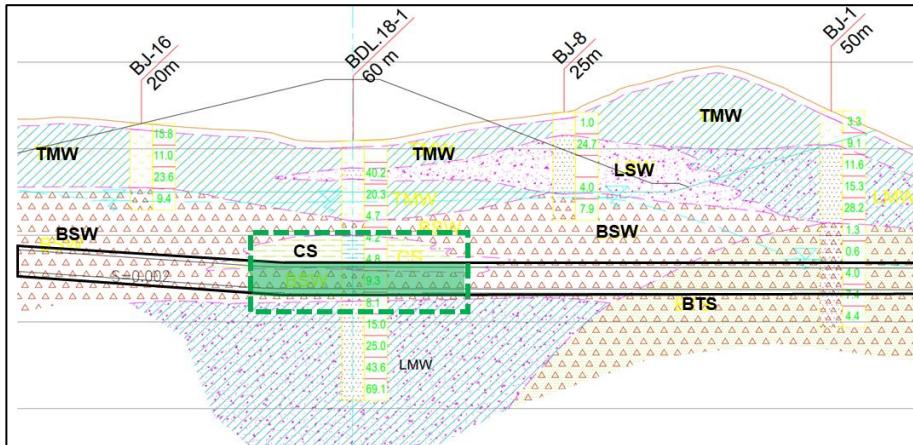


Gambar 4.12 Skema Galian Tahap 2

(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)

Metode penggalian pada segmen 8 – segmen 19 dilakukan dengan metode *top heading and bench* atau *full face*, namun hal ini tergantung dari hasil singkapan batuan aktual dilapangan dan justifikasi *geologist*.

- Detail Galian Tahap 3



Gambar 4.13 Skema Galian Tahap 3

(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)

Pada galian segmen 3 berdasarkan data investigasi tahun 2019 pada bagian segmen 3 dijumpai lenses sisipan pada lapisan batuan breksi berupa batu lempung tufaan (CS). Berdasarkan hasil investigasi tahun 2019 mempunyai sifat fisik kompaksi buruk, lunak, terdapat fragmen pasir halus, dan semen lempung. Jika dibandingkan dengan batu breksi lapisan batu lempung tufaan memiliki tingkat kekerasan lebih kecil (lebih lunak). Sehingga dapat dicurigai pada lapisan tersebut ada potensi keruntuhan.

Untuk menghindari adanya potensi keruntuhan maka untuk metode penggalian dengan menggunakan *top heading and bench* yang pembagian segmennya dapat dibagi menjadi 4 bagian sehingga daya ledak yang dihasilkan tidak terlalu besar atau bahkan memungkinkan dengan menggunakan *forepoling*. namun untuk lebih jelasnya akan dijustifikasi pada saat pelaksanaan dilapangan

4.6 Data Volume Pekerjaan

Volume pekerjaan diperoleh berdasarkan gambar kerja pada proyek Pembangunan Bendungan Mbay di Kabupaten Nageko. Diketahui bahwa :

- Volume pekerjaan galian terbuka = 320.600 m³
- Volume pekerjaan galian terowongan = 156.100 m³
- Volume pekerjaan *shotcrete* = 32.100 m²

4.7 Perhitungan Lapangan Produktivitas dan Waktu Alat Berat

4.7.1 Pekerjaan Galian secara Mekanis

a. Excavator/Backhoe, 1.2 m³

Kapasitas Bucket	= 1,20 m ³
Faktor Bucket	= 1,00 (mudah)
Faktor efisiensi alat	= 0,83 (baik)
Faktor konversi bahan (asli-lepas)	= 0,90 (normal)
Waktu siklus	= 0,60 menit
- Waktu menggali, swing, memuat dll	= 0,35 menit
- Waktu swing kembali dll	= 0,25 menit
Kapasitas Produksi / jam	= $(V \times F_b \times F_a \times 60) / (T_s \times F_k)$

Permen PUPR28-2016 hal 67

$$\begin{aligned} &= 110,67 \text{ m}^3 \\ \text{Produksi per hari} &= 7 \times 110,67 \text{ m}^3 \\ &= 774,69 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

b. Excavator/Breaker, 1.3 ton

Kapasitas breaker	= 0,80 m ³
Beban	= 1,32 m ³
Berat excavator	= 18,50 ton
Berat total	= 19,82 ton
Koefisien traksi	= 0,55
Reaksi kritis	= 10,90 ton
Waktu maju (W _p)	= 4,00 menit
Waktu mundur (W _j)	= 3,00 menit
Waktu pecah batuan lapuk, dll	= 1,20 menit
Total waktu (W _s)	= 8,20 menit
Produksi per jam	= $60/W_s$
	= 7,32
Produksi per hari	= $7 \times 7,32 \text{ m}^3$
	= 51,24 m ³ /hari

c. Dump Truck, 10 ton

Kapasitas bak	= 10,00 ton
Berat volume bahan (lepas)	= 1,60 ton/m ³
Faktor efisiensi alat	= 0,83 (baik)
Kecepatan rata-rata bermuatan	= 20,00 km/jam
Kecepatan rata-rata kosong	= 30,00 km/jam
Faktor konversi bahan	= 0,90 (normal)

Pengangkutan ke stockpile

Waktu siklus	= 10,77 menit
- Waktu memuat	= 3,77 menit
- Waktu tempuh isi	= 3,00 menit
- Waktu tempuh kosong	= 2,00 menit
- Waktu lain-lain	= 2,00 menit
Kapasitas Produksi / jam	= $(V \times Fa \times 60) / (D \times Ts \times Fk)$

Permen PUPR28-2016 hal 34

Produksi per hari	= 32,13 m ³
	= $7 \times 32,13 \text{ m}^3$
	= 224,91 m ³ /hari

d. Bulldozer, 21 ton

Faktor pisau (blade)	= 0,90 (sedang)
Faktor efisiensi kerja	= 0,83 (baik)
Kecepatan mengupas	= 3,00 km/jam
Kecepatan mundur	= 5,00 km/jam
Kapasitas pisau	= 2,89 m ³
Faktor kemiringan (grade)	= 1,00
Jarak gusur	= 0,02 km
Waktu Siklus	= 0,74 menit
- Waktu gusur	= 0,40 menit
- Waktu kembali	= 0,24 menit
- Waktu lain-lain	= 0,10 menit
Kapasitas Produksi / jam	= $(q \times Fb \times Fm \times Fa \times 60) / (Ts \times Fk)$

Permen PUPR28-2016 hal 25

	= 194,49 m ³
Produksi per hari	= 5 x 194,49 m ³
	= 972,45 m ³ /hari

4.7.2 Pekerjaan Galian secara Peledakan

a. *Excavator/Backhoe, 1.2 m³*

Kapasitas Bucket	= 1,20 m ³
Faktor Bucket	= 1,00 (mudah)
Faktor efisiensi alat	= 0,75 (agak sulit)
Faktor konversi bahan (asli-lepas)	= 0,90 (normal)
Waktu siklus	= 0,75 menit
- Waktu menggali, swing, memuat dll	= 0,45 menit
- Waktu swing kembali dll	= 0,30 menit
Kapasitas Produksi / jam	= $(V \times F_b \times F_a \times 60) / (T_s \times F_k)$

Permen PUPR28-2016 hal 67

Produksi per hari	= 80,00 m ³
	= 7 x 80,00 m ³
	= 560,00 m ³ /hari

b. *Dump Truck, 10 ton*

Kapasitas bak	= 10,00 ton
Berat volume bahan (lepas)	= 1,60 ton/m ³
Faktor efisiensi alat	= 0,83 (baik)
Kecepatan rata-rata bermuatan	= 20,00 km/jam
Kecepatan rata-rata kosong	= 30,00 km/jam
Faktor konversi bahan	= 0,90 (normal)

Pengangkutan ke stockpile

Waktu siklus	= 16,21 menit
- Waktu memuat	= 3,77 menit
- Waktu tempuh isi	= 5,00 menit
- Waktu tempuh kosong	= 4,00 menit
- Waktu lain-lain	= 2,00 menit
Kapasitas Produksi / jam	= $(V \times F_a \times 60) / (D \times T_s \times F_k)$

Permen PUPR28-2016 hal 34

$$= 21,34 \text{ m}^3$$

Produksi per hari = $7 \times 21,34 \text{ m}^3 = 149,38 \text{ m}^3/\text{hari}$

c. *Bulldozer, 21 ton*

Faktor pisau (blade) = 0,83 (sedang)

Faktor efisiensi kerja = 0,83 (baik)

Kecepatan mengupas = 3,00 km/jam

Kecepatan mundur = 4,00 km/jam

Kapasitas pisau = 3,35 m³

Faktor kemiringan (grade) = 1,00

Jarak gusur = 0,03 km

Waktu Siklus = 1,15 menit

- Waktu gusur = 0,60 menit

- Waktu kembali = 0,45 menit

- Waktu lain-lain = 0,10 menit

Kapasitas Produksi / jam = $(q \times F_b \times F_m \times F_a \times 60) / (T_s \times F_k)$

Permen PUPR28-2016 hal 25

$$= 133,79 \text{ m}^3$$

Produksi per hari = $5 \times 194,49 \text{ m}^3$

$$= 668,95 \text{ m}^3/\text{hari}$$

d. Crawler Drill

Produksi efektif = 8,00 meter

Asumsi 1x peledakan (20 m²)

Jumlah lubang bor jarak 3x3 m = 58,78 buah

Total Panjang Bor (6m/lubang) = 352,67 meter

Total waktu yang diperlukan = 44,08 jam

Volume 1x peledakan = 661,50

Produksi per jam = 15,01 m³/jam

Material pada galian peledakan =

- Dynamite

- ANFO Powder

- Detonator
- Rockbit
- *Drilling rod*
- Kabel

4.8 Produktivitas di Lapangan dengan Alat Eksisting

Alternatif alat berat yang digunakan adalah pada pekerjaan galian mekanis pada segmen 1-7 mulut terowongan meliputi pekerjaan menggali dan mengangkut material ke *stockpile*, maka alat yang dibutuhkan adalah *excavator bakhoe*, *excavator breaker* dan *dump truck*.

- a. Volume pekerjaan galian mekanis = 1.990,60 m³
- b. Jumlah *excavator bakhoe* eksisting di lapangan = 1 unit
- c. Jumlah *excavator breaker* eksisting di lapangan = 1 unit
- d. Jumlah *dump truck* eksisting di lapangan = 2 unit

Tabel 4.1 Durasi Hari Berdasar Alat Eksisting

No.	Alat	Sat	Jumlah Eksisting	Jam Kerja	Kapasitas Produksi/hr (m ³)	Volume (m ³)	Durasi Hari
1	Excavator Backhoe 1,2 m ³	Unit	1,990.60	7	774.69	1,990.60	3
2	Excavator Breaker 1,3 ton	Unit		10	73.20		27
3	Dump Truck 10 ton	Unit		7	224.91		4

(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)

Setelah jumlah masing-masing durasi alat diketahui maka durasi 27 hari dipilih berdasarkan kapasitas produksi harian terkecil, yaitu *excavator breaker* sebesar 73,20 m³/hari, yang menjadi pembatas dari total produktivitas alat eksisting.

Tabel 4.2 Biaya Sewa Alat Berat Per Jam

No.	Alat	Biaya Sewa Alat
1	Excavator Breaker 1,3 ton	Rp 576,764.00
2	Excavator Backhoe 1,2 m ³	Rp 502,234.00
3	Dump Truck 10 ton	Rp 347,025.00
4	Dump Truck 6 ton	Rp 230,662.00
5	Bulldozer	Rp 756,667.00
6	CRD	Rp 225,000.00
7	Air Compressor	Rp 321,940.00
8	Concrete Mixer Grouting	Rp 27,364.00
9	Shotcrete Machine	Rp 175,955.00

(Sumber: Data Teknik PT. Brantas Abipraya, 2022)

Dari data diatas maka didapatkan :

a. Biaya sewa alat berat *excavator bakhoe* 1,2 m³

$$1 \times 502.234 \times 7 \times 27 = \text{Rp } 94.922.226,00$$

b. Biaya sewa alat berat *excavator breaker* 1,3 ton

$$1 \times 576.764 \times 7 \times 27 = \text{Rp } 109.008.396,00$$

c. Biaya sewa alat berat *dump truck* 10 ton

$$2 \times 347.025 \times 7 \times 27 = \text{Rp } 131.175.450,00$$

**Total biaya sewa alat berdasar jumlah eksisting di lapangan =
Rp 335.106.072,00**

4.9 Durasi Waktu dan Biaya Alternatif 1

Alternatif pertama yang diajukan adalah penambahan jam kerja alat berat dari satu shift menjadi dua shift per hari. Tujuannya adalah untuk meningkatkan produktivitas tanpa menambah jumlah alat. Dengan jam kerja yang lebih panjang, volume pekerjaan harian meningkat, sehingga durasi proyek dapat dipercepat.

Jam kerja eksisting = 7 jam (09.00-17.00)

Jam kerja alternatif 1 = - *excavator bakhoe* (09.00-17.00 , 21.00-24.00)

- *excavator breaker* (09.00-17.00 , 19.00-24.00)

- *dump truck* (09.00-17.00)

Tabel 4.3 Durasi Hari Berdasar Alternatif 1

No.	Alat	Sat	Jumlah Alat	Jam Kerja	Kapasitas Produksi/hr (m ³)	Volume (m ³)	Durasi Hari
1	Excavator Backhoe 1,2 m ³	Unit	1	10	1106.7	1,990.60	2
2	Excavator Breaker 1,3 ton	Unit	1	12	87.84		23
3	Dump Truck 10 ton	Unit	2	7	224.91		4

(Sumber:Analisa Data Penulis,2025)

Setelah jumlah masing-masing durasi alat diketahui maka durasi 23 hari dipilih berdasarkan kapasitas produksi harian terkecil, yaitu *excavator breaker* sebesar 87,84 m³/hari.

Dari data diatas maka didapatkan :

a. Biaya sewa alat berat *excavator bakhoe* 1,2 m³

$$1 \times 502.234 \times 10 \times 23 = \text{Rp } 115.513.820,00$$

b. Biaya sewa alat berat *excavator breaker* 1,3 ton

$$1 \times 576.764 \times 12 \times 23 = \text{Rp } 159.186.864,00$$

c. Biaya sewa alat berat *dump truck* 10 ton

$$2 \times 347.025 \times 7 \times 23 = \text{Rp } 111.742.050,00$$

Total biaya sewa alat berdasar alternatif 1 = Rp 386.442.734,00

4.10 Durasi Waktu dan Biaya Alternatif 2

Alternatif kedua yang diajukan adalah penambahan jam kerja alat berat menjadi tiga shift per hari, serta penambahan satu unit alat berat untuk setiap jenis yang digunakan. Tujuannya adalah untuk meningkatkan produktivitas harian secara signifikan dan mempercepat penyelesaian proyek.

Kekurangan dari alternatif penambahan jam kerja menjadi tiga shift adalah meningkatnya biaya operasional, khususnya dalam hal perawatan alat berat. Operasi selama hampir 24 jam per hari membuat beban kerja alat menjadi lebih berat dan membutuhkan perawatan yang lebih sering. Untuk mengatasi hal tersebut dan menjaga umur serta performa alat, maka ditambahkan masing-masing satu unit alat berat untuk setiap jenis. Penambahan unit ini bertujuan agar beban kerja terbagi, sehingga alat tidak bekerja secara terus-menerus tanpa jeda, serta perawatan dapat dilakukan secara bergantian tanpa mengganggu kelancaran operasional di lapangan.

Jam kerja eksisting = 7 jam (09.00-17.00)

Jam kerja alternatif 2 = - *excavator bakhoe* (09.00-17.00 , 21.00-24.00,
02.00-06.00)

- *excavator breaker* (09.00-17.00 , 19.00-24.00,
02.00-06.00)

- *dump truck* (09.00-17.00 , 21.00-24.00, 02.00-
06.00)

Tabel 4.4 Simulasi Pembagian Jam Kerja Alternatif 2

(Sumber: Analisa Data Penulis, 2025)

Pembagian warna tersebut menunjukkan siklus kerja masing-masing alat.

Tabel 4.5 Durasi Hari Berdasar Alternatif 2

No.	Alat	Sat	Jumlah Alat	Total Jam Kerja/hr	Kapasitas Produksi/ hr (m3)	Volume (m3)	Durasi Hari
1	Excavator Backhoe 1,2 m3	Unit	2	14	1549.38		
2	Excavator Breaker 1,3 ton	Unit	2	16	117.12	1,990.60	1
3	Dump Truck 10 ton	Unit	2	14	449.82		

(Sumber:Analisa Data Penulis,2025)

Setelah jumlah masing-masing durasi alat diketahui maka durasi 17 hari dipilih berdasarkan kapasitas produksi harian terkecil, yaitu *excavator breaker* sebesar $117,12 \text{ m}^3/\text{hari}$.

Dari data diatas maka didapatkan :

a. Biaya sewa alat berat *excavator bakhoe* 1,2 m³

$$1 \times 502.234 \times 14 \times 17 = \text{Rp } 119.531.692,00$$

b. Biaya sewa alat berat *excavator breaker* 1,3 ton

$$1 \times 576.764 \times 16 \times 17 = \text{Rp } 156.879.808,00$$

c. Biaya sewa alat berat *dump truck* 10 ton

$$2 \times 347.025 \times 14 \times 17 = \text{Rp } 165.183.900,00$$

Total biaya sewa alat berdasar alternatif 2 = Rp 441.595.400,00

4.11 Perbandingan Biaya dan Durasi Kondisi Alternatif terhadap Eksisting

Setelah dilakukan perhitungan alternatif kombinasi alat maka selanjutnya adalah membandingkan biaya dan durasi kondisi alternatif terhadap eksisting.

Tabel 4.6 Perbandingan Biaya dan Durasi Alternatif

(Sumber:Analisa Data Penulis,2025)

No.	Alat	Eksisting	Alt 1	Alt 2
1	Total biaya	Rp 335,106,072.00	Rp 386,442,734.00	Rp 441,595,400.00
2	Selisih biaya	Rp -	-Rp 51,336,662.00	-Rp 106,489,328.00
3	Efisiensi biaya (%)	0.00%	15.32%	31.78%
4	Total durasi (hari)	27	23	17
5	Selisih durasi (hari)	0	-4	-10
6	Efisiensi durasi (%)	0.00%	-14.81%	-37.04%

Berdasarkan tabel 4.6, terlihat bahwa alternatif 1 dan alternatif 2 sama-sama memberikan percepatan durasi pekerjaan dibandingkan kondisi eksisting, namun dengan konsekuensi peningkatan biaya sewa alat berat. Pada kondisi eksisting, durasi pekerjaan tercatat 27 hari dengan total biaya sewa sebesar Rp 335.106.072.

Alternatif 1 yang menerapkan dua shift kerja menghasilkan durasi 23 hari atau percepatan sebesar 14,81% dibandingkan eksisting. Kenaikan biaya yang terjadi sebesar Rp 51.336.662 atau 15,32%. Efisiensi waktu pada alternatif ini tergolong tinggi karena biaya tambahan per hari percepatan relatif kecil, yaitu sekitar Rp 3,21 juta/hari.

Alternatif 2 yang menerapkan tiga shift serta penambahan satu unit setiap jenis alat menghasilkan durasi 17 hari atau percepatan 37,04% dari eksisting.

Namun, peningkatan biayanya mencapai Rp 106.489.328 atau 31,78%, dengan biaya tambahan per hari percepatan sekitar Rp 4,84 juta/hari.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis produktivitas, durasi, dan biaya sewa alat berat pada pekerjaan galian mekanis terowongan pengelak Proyek Pembangunan Bendungan Mbay, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1. Mengidentifikasi produktivitas alat berat yang digunakan dalam proses pelaksanaan pembangunan terowongan pengelak sesuai jenis pekerjaannya**

Berdasarkan hasil analisis, produktivitas setiap alat berat pada pekerjaan galian mekanis terowongan pengelak menunjukkan perbedaan yang signifikan. *Excavator backhoe* memiliki produktivitas harian yang relatif tinggi ($\pm 774,69 \text{ m}^3/\text{hari}$), *dump truck* sebesar $\pm 224,91 \text{ m}^3/\text{hari}$, serta *bulldozer* mencapai $\pm 972,45 \text{ m}^3/\text{hari}$. Namun, *excavator breaker* hanya mampu menghasilkan $\pm 73,20 \text{ m}^3/\text{hari}$, sehingga menjadi faktor pembatas dalam keseluruhan durasi pekerjaan. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberhasilan penyelesaian pekerjaan tidak semata ditentukan oleh banyaknya alat berat yang digunakan, tetapi sangat dipengaruhi oleh kapasitas produksi dan efisiensi kerja masing-masing alat. Dengan demikian, identifikasi produktivitas ini menegaskan bahwa evaluasi teknis terhadap kinerja alat merupakan aspek penting dalam merencanakan durasi, biaya, serta strategi pelaksanaan proyek.

- 2. Menganalisis efektivitas alat berat yang tepat dalam menunjang proses pelaksanaan pekerjaan terowongan pengelak**

Analisis efektivitas menunjukkan bahwa strategi penggunaan alat berat berpengaruh langsung terhadap percepatan pekerjaan maupun peningkatan biaya. Pada kondisi eksisting (satu shift), durasi pekerjaan tercatat selama 27 hari dengan biaya sewa alat Rp 335.106.072. Alternatif 1 (dua shift) mempercepat durasi menjadi 23 hari dengan kenaikan biaya 15,32%, sedangkan Alternatif 2 (tiga shift + penambahan unit alat) mampu memangkas durasi hingga 17 hari namun meningkatkan biaya sebesar

31,78%. Hasil ini membuktikan bahwa efektivitas tidak hanya ditentukan oleh spesifikasi teknis alat, tetapi juga bagaimana alat tersebut diatur dalam sistem kerja yang terencana. Alternatif 1 lebih tepat dipilih apabila tujuan proyek menekankan efisiensi biaya dengan percepatan yang masih signifikan, sedangkan Alternatif 2 lebih sesuai apabila percepatan waktu menjadi prioritas utama untuk mengejar target penyelesaian proyek.

5.2 SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan efektivitas pekerjaan galian terowongan pengelak. Pertama, pemilihan spesifikasi alat berat perlu disesuaikan dengan kondisi lapangan. Sebagai contoh, penggunaan excavator dengan kapasitas bucket yang lebih kecil dapat dipertimbangkan pada area galian yang sempit atau memiliki lapisan batuan dengan kestabilan rendah. Hal ini bertujuan untuk menjaga keamanan galian sekaligus meminimalisir risiko keruntuhan akibat getaran atau beban berlebih dari alat berkapasitas besar.

Kedua, pada tahap pengangkutan material hasil galian, penggunaan *dump truck* dapat diganti atau dikombinasikan dengan lori *atau conveyor* apabila kondisi terowongan semakin panjang. Alternatif ini berpotensi lebih efektif karena mampu mengurangi waktu siklus angkut, mengurangi kemacetan lalu lintas alat di dalam terowongan, serta meningkatkan kontinuitas proses penggalian.

Ketiga, dalam jangka panjang, evaluasi terhadap kombinasi alat berat yang digunakan perlu dilakukan secara berkala sesuai perkembangan kondisi lapangan. Penyesuaian spesifikasi maupun jumlah unit alat akan lebih menguntungkan dibanding sekadar menambah jam kerja, karena dapat menekan biaya operasional sekaligus meningkatkan produktivitas secara berkelanjutan.

Dengan demikian, pemilihan alternatif alat yang lebih sesuai dengan kondisi aktual lapangan diharapkan mampu mendukung percepatan waktu pekerjaan, efisiensi biaya, serta meningkatkan keselamatan dan kualitas hasil konstruksi terowongan.

DAFTAR PUSTAKA

- Asiyanto. (2011). *Metode Konstruksi Bendungan*. Jakarta: UI Press.
- Rostiyanti, S. F. (2015). *Alat Berat untuk Proyek Konstruksi* (Edisi Kedua). Jakarta: Penerbit Rineka Cipta.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara I. (2018). *Metode Kerja Terowongan, Paket Pekerjaan Pembangunan Bendung Pengalih Rababaka dan Saluran Interbasin* (Rabaka Kompleks) Paket II. Dompu.
- Syamsuddin, I., Pongtuluran, E. H., & Kartika, D. M. R. (2021). Optimalisasi Alat Berat Pada Pekerjaan Galian Tanah Bangunan Pelimpah atau Spillway (Studi Kasus Proyek Bendungan Sepaku-Semoi). *Jurnal Tugas Akhir Teknik Sipil*, 5(2), 1–10.
- Alimunawar, Fadrizal Lubis, & Winayat. (2018). Optimalisasi Penggunaan Alat Berat pada Pekerjaan Galian Jalan Lintas Rel Kereta Api Rantau Prapat – Kotapinang – Sumatera Utara. *Jurnal Teknik*, 12(2), 179–186.
- Kurniawan, S., & Nuzola, M. (2021, November). *Analisis Produktivitas Galian/Timbunan Menggunakan Alat Berat pada Pembangunan Bendungan Margatiga Lampung Timur*. *TAPAK*, 11(1). p-ISSN 2089-2098; e-ISSN 2548-6209.
- Ulhaq, M. L. D. (2018). *Optimasi Penggunaan Alat Berat pada Pekerjaan Galian dan Pengangkutan: Studi Kasus Proyek High Speed Railway (HSR) Walini Section IV* (Skripsi). Malang: Universitas Brawijaya, Fakultas Teknik.