

No. 19/TA/D3-KS/2026

TUGAS AKHIR

**METODE PELAKSANAAN PEKERJAAN *TUNNEL DOWN-TRACK*
DENGAN TUNNEL BORING MACHINE STASIUN SAWAH BESAR-
MANGGA BESAR PADA PROYEK MRT FASE 2A CP 202**



**Disusun untuk melengkapi salah satu syarat kelulusan Program D-III
Politeknik Negeri Jakarta**

Disusun Oleh:

Prayvi Keiza Ranbiya Nadia Razine

NIM 2301321066

Dosen Pembimbing:

Dr. Eng. Sony Pramusandi, S.T., M. Eng.

NIP 197509151998021001

**PROGRAM STUDI D-III KONSTRUKSI SIPIL
JURUSAN TEKNIK SIPIL
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA
2026**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERSETUJUAN

Tugas Akhir Berjudul:

METODE PELAKSANAAN PEKERJAAN *TUNNEL DOWN-TRACK* STASIUN SAWAH BESAR-MANGGA BESAR PADA PROYEK MRT FASE 2A CP 202

Yang di susun oleh Prayyi Keiza Ranbiya Nadia Razine (2301321066) yang telah disetujui dosen pembimbing untuk dipertahankan dalam

Sidang Tugas Akhir Tahap 2

Pembimbing,

Dr. Eng. Sony Pramusandi, S.T., M. Eng.
NIP 197509151998021001



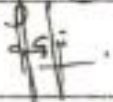
Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir berjudul :

**METODE PELAKSANAAN PEKERJAAN *TUNNEL DOWN-TRACK*
STASIUN SAWAH BESAR-MANGGA BESAR PADA PROYEK MRT
FASE 2A CP 202** yang disusun oleh Prayyi Keiza Ranbiya Nadia Razine
(2301321066) telah dipertahankan dalam Sidang Tugas Akhir di depan Tim
Penguji pada hari Senin tanggal 22 Juni 2026

	Nama Tim Penguji	Tanda Tangan
Ketua	Sukarman, S. Pd., M. Eng NIP. 199306052020121013	
Anggota	Hendrian Budi Bagus K, S. T., M. Eng. NIP. 198905272022031004	
Anggota	I Ketut Sucita, S. Pd., S. S. T., M. T. NIP. 197202161998031003	

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Sipil
Politeknik Negeri Jakarta

Istiaqun, S.T., M.T.
NIP 196605181990102001



HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Prayyi Keiza Ranbiya Nadia Razine
Nim : 2301321066
Program Studi : Konstruksi Sipil
Alamat Email : prayyi.keiza.ranbiya.nadia.razine.ts23@stu.pnj.ac.id
Judul Tugas Akhir : Metode Pelaksanaan Pekerjaan *Tunnel Down-Track*

Dengan Tunnel Boring Machine Stasiun Sawah Besar-
Mangga Besar Pada Proyek MRT FASE 2A CP 202

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tulisan yang saya susun dalam Tugas Akhir Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta ini adalah hasil karya saya sendiri, bukan hasil jiplakan karya orang lain dan juga belum pernah di ikut sertakan dalam segala bentuk kegiatan akademis.

Apabila di kemudian hari tulisan saya tidak sesuai dengan pernyataan ini, maka secara otomatis saya siap jika tulisan saya di anggap gugur dan bersedia menerima sanksi yang ada. Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA

Depok, 1 Juni 2026

Prayyi Keiza Ranbiya Nadia Razine

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan pada Program Studi D-III Konstruksi Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta.

Tugas Akhir ini berjudul **Metode Pelaksanaan Pekerjaan Tunnel *Down-Track* dengan Tunnel Boring Machine Stasiun Sawah Besar–Mangga Besar pada Proyek MRT Fase 2A CP202**. Penyusunan Tugas Akhir ini bertujuan untuk memahami dan menjelaskan tahapan pelaksanaan pekerjaan terowongan menggunakan Tunnel Boring Machine (TBM) tipe Earth Pressure Balance (EPB), menghitung kebutuhan pekerjaan yang mendukung pelaksanaannya, serta menganalisis produktivitas TBM pada proyek MRT Jakarta Fase 2A Paket Kontrak CP202. Melalui penelitian ini, penulis juga memperoleh pemahaman mengenai penerapan metode konstruksi terowongan modern pada lingkungan perkotaan dengan kondisi pekerjaan yang kompleks.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memperoleh banyak bimbingan, arahan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, kesehatan, serta kelancaran yang diberikan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta atas doa, kasih sayang, dukungan moral, serta motivasi yang tiada henti kepada penulis.
3. Ibu Istiatun, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta.
4. Bapak Dr. Eng. Sony Pramusandi, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, serta motivasi selama penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Pihak Proyek MRT Jakarta Fase 2A Paket Kontrak CP202 yang telah memberikan kesempatan, data, informasi, serta pengalaman lapangan yang sangat membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

6. Seluruh dosen dan staf Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta yang telah memberikan ilmu dan dukungan selama masa perkuliahan.
7. Rekan-rekan Sipil Sore 2023 yang telah menjadi teman seperjuangan selama masa perkuliahan. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, serta semangat yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Kepada Devita, Dhiananda, Firza, Hanun, Marliana, Putri, dan Hani, yang senantiasa saling memberikan doa, dukungan, semangat, serta menjadi tempat berbagi cerita selama menjalani perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir ini. Terima kasih atas kebersamaan dan kenangan indah yang telah terjalin, sehingga perjalanan ini menjadi lebih bermakna.
9. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi D-III Konstruksi Sipil yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan semangat selama proses penyusunan Tugas Akhir.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta menjadi referensi dalam bidang konstruksi terowongan, khususnya pekerjaan tunnel menggunakan Tunnel Boring Machine (TBM).

Depok, 22 Juni 2026

Prayyi Keiza Ranbiya Nadia Razine



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Kebaruan.....	9
2.3 Pengertian Terowongan dan TBM (Tunnel Boring Machine)	9
2.3.1 Prinsip Kerja Sistem EPB	11
2.3.2 Keunggulan Tunnel Boring Machine.....	12
2.3.3 Komponen Utama Mesin TBM EPB	13
2.3.3.1 <i>Cutting Wheel (Cutterhead)</i>	13
2.3.3.2 <i>Pressure Chamber (Mixing Chamber)</i>	13
2.3.3.3 <i>Screw Conveyor</i>	14
2.3.3.4 <i>Erector Machine</i>	14
2.3.4 <i>Soil Conditioning</i>	14
2.4 Jenis-Jenis Metode Pengeboran Terowongan.....	16
2.4.1 Metode Konvensional (NATM).....	17
2.4.2 Metode <i>Shield Tunneling</i> (TBM)	17
2.4.2.1 Jenis-Jenis <i>Shield Tunneling</i>	18
2.4.2.2 Siklus Operasi <i>Shield Tunneling</i>	20
2.5 <i>Segmental Lining Dan Backfill Grouting</i>	21
2.5.1 Spesifikasi Beton Segmen.....	21



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.5.2	Sistem Koneksi Segmen.....	22
2.5.3	Backfill Grouting	24
2.5.4	Grout Dua Komponen (<i>Two-Component Grout</i>)	25
2.6	Perhitungan Volume Pekerjaan Terowongan.....	26
2.6.1	Volume Galian (<i>Excavation Volume</i>)	26
2.6.2	Volume Segmen Beton Pracetak (<i>Precast Segment Volume</i>)	27
2.6.3	Volume <i>Backfill Grouting</i>	28
2.7	Alat Berat Pendukung (<i>Supporting Equipments</i>).....	28
2.7.1	<i>Gantry Crane</i>	29
2.7.2	<i>Multi-Service Vehicle (MSV)</i>	29
2.7.3	<i>Grout Plant</i>	31
2.8	Produktivitas Tunnel Boring Machine	32
2.8.1	Faktor Koreksi Alat.....	32
2.8.2	Faktor Efisiensi Kerja TBM.....	33
2.8.3	Waktu Siklus (<i>Cycle Time</i>)	33
2.8.3.1	Waktu Penggalan (<i>Excavation Time</i>)	34
2.8.3.2	Waktu Pemasangan Segmen (<i>Ring Building</i>).....	34
2.8.3.3	Waktu Downtime.....	34
2.8.4	Kecepatan Penetrasi (<i>Rate of Penetration / ROP</i>)	34
2.8.5	Kecepatan Kemajuan (<i>Advance Rate</i>)	35
2.8.6	Faktor Utilisasi (<i>Utilization Factor</i>)	35
BAB III METODE PEMBAHASAN.....		36
3.1	Lokasi Proyek	36
3.2	Diagram Alir Penulisan Tugas Akhir.....	37
3.3	Teknik Pengumpulan Data.....	38
3.4	Teknik Analisis Data	40
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN.....		41
4.1	DATA UMUM PROYEK	41
4.1.1	Site Plan dan Trase Terowongan.....	41
4.1.2	Spesifikasi Teknis Tunnel Boring Machine	44
4.1.2.1	Spesifikasi Shield Machine	45
4.1.2.2	Cutterhead	45
4.1.2.3	Screw Conveyor	46
4.1.2.4	Segment Erector	46
4.1.3	Spesifikasi Gantry Crane.....	47



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.1.4	Spesifikasi Locomotive dan Segment Car.....	48
4.1.4.1	Spesifikasi Locomotive.....	48
4.1.4.2	Spesifikasi Segment Car	49
4.1.5	Sistem <i>Supply Segment</i>	49
4.2	METODE PELAKSANAAN SHIELD TUNNELING.....	50
4.2.1	Persiapan <i>Launching</i> TBM.....	51
4.2.1.1	Diagram Alir.....	52
4.2.1.2	Alur Pekerjaan.....	52
4.2.2	Pekerjaan Initial Drive	58
4.2.2.1	Diagram Alir.....	59
4.2.2.2	Alur Pekerjaan.....	59
4.2.3	Pekerjaan Main Drive.....	63
4.2.3.1	Diagram Alir.....	64
4.2.3.2	Alur Pekerjaan.....	64
4.3	PERHITUNGAN VOLUME PEKERJAAN.....	69
4.3.1	Volume Galian	69
4.3.1.1	Volume Galian Initial Drive	69
4.3.1.2	Volume Galian Main Drive	70
4.3.2	Volume Segment.....	71
4.3.3	Volume Void.....	71
4.3.4	Volume Grouting	71
4.4	PERHITUNGAN PRODUKTIVITAS ALAT BERAT & WAKTU.....	72
4.4.1	<i>Initial Drive</i>	73
4.4.1.1	Tahapan Sebelum Breakthrough Temporary Ring (T1–T3).....	73
4.4.1.2	Tahapan Saat Breakthrough Temporary Ring (T4–T7).....	76
4.4.1.3	<i>Initial Drive Permanent Ring</i> (R1-50)	80
4.4.1.4	Rekapitulasi Pekerjaan Initial Drive	84
4.4.2	<i>Main Drive</i>	85
4.4.2.1	Tahap Main Drive	85
4.4.3	Rekapitulasi Perhitungan Produktivitas Keseluruhan	90
4.5	KEBUTUHAN BAHAN	92
4.5.1	Kebutuhan Segment Beton Pracetak	92
4.5.2	Kebutuhan Backfill Grouting	93
4.6	JUMLAH TENAGA KERJA	93



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.7	PENJADWALAN PEKERJAAN TEROWONGAN.....	93
4.8	SISTEM MANAJEMEN KESELAMATAN KERJA (SMKK)	94
4.9	KENDALA DALAM PELAKSANAAN.....	96
BAB V PENUTUP.....		98
5.1	KESIMPULAN	98
DAFTAR PUSTAKA.....		101
LAMPIRAN.....		103





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Earth Pressure Balance (EBP) TBM	11
Gambar 2. 2 Earth Pressure Balance (EBP) Obstruction TBM	11
Gambar 2. 3 General Arrangement Tunnel Boring Machine	13
Gambar 2. 4 Screw Conveyor	14
Gambar 2. 5 Skema Soil Conditioning	16
Gambar 2. 6 Metode <i>New Austrian Tunnelling Method</i> (NATM)	17
Gambar 2. 7 Sistem Sambungan Baut.....	23
Gambar 2. 8 Tunnel Segment dengan Gasket	24
Gambar 2. 9 Gantry Crane	29
Gambar 2. 10 Segment Car	30
Gambar 2. 11 Locomotive Multi-service Vehicle	31
Gambar 2. 12 Grout Plant	32
Gambar 3. 1 Peta Trase MRT Jakarta Fase CP 202.....	36
Gambar 3. 2 Profil Longitudinal Tunnel.....	37
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penulisan Tugas Akhir	38
Gambar 4. 1 Alinyemen Terowongan Sawah Besar – Mangga Besar	42
Gambar 4. 2 Face Pressure.....	44
Gambar 4. 4 Layout Konstruksi Tunnel Eye.....	54
Gambar 4. 5 contoh GFRP Bar	54
Gambar 4. 6 Susunan GFRP Bar.....	55
Gambar 4. 7 Instalasi GFRP Bar pada Konstruksi D-wall.....	55
Gambar 4. 8 Tunnel Eye Seal.....	56
Gambar 4. 9 Potongan Melintang TBM Assembly Pada Area Kerja.....	57



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Gambar 4. 10 Potongan Melintang Saat Initial Drive di Launching Shaft	57
Gambar 4. 11 Diagram Alir Pekerjaan Initial Drive	59
Gambar 4. 12 Temporary Ring No.1 – 3.....	60
Gambar 4. 13 Backtruss	60
Gambar 4. 14 Shield Jack.....	61
Gambar 4. 15 Cross section area station box	63
Gambar 4. 16 Flowchart Pekerjaan Main Drive	64
Gambar 4. 17 Pengangkutan Segmen	66
Gambar 4. 18 Segmen Erection	66
Gambar 4. 19 Ruang backfill grout dan koneksi ke segmen.....	67
Gambar 4. 20 Contoh Sistem Pemantauan Parameter Operasional TBM.....	68
Gambar 4. 21 Proses Break In TBM.....	68
Gambar 4. 22 Alat Pelindung Diri.....	96

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Peneliti Terdahulu.....	5
Tabel 2. 2 Parameter Rekomendasi Agen Soil Conditioning	15
Tabel 2. 3 Spesifikasi <i>Two-Component Grout</i>	25
Tabel 2. 4 Faktor Pengembangan Tanah	27
Tabel 2. 5 Faktor Koreksi Alat	33
Tabel 4. 1 Data Geometri Trase Terowongan Sawah Besar - Mangga Besar	43
Tabel 4. 2 Geometri Tikungan Horizontal (IP8–IP13).....	43
Tabel 4. 3 Spesifikasi Shield Machine	45
Tabel 4. 4 Spesifikasi Cutterhead.....	45
Tabel 4. 5 Spesifikasi Screw Conveyor.....	46
Tabel 4. 6 Spesifikasi Segment Erector.....	47
Tabel 4. 7 Spesifikasi Gantry Crane.....	47
Tabel 4. 8 Spesifikasi Locomotive	48
Tabel 4. 9 Spesifikasi Segment Car.....	49
Tabel 4. 11 Data Volume Galian Initial Drive.....	70
Tabel 4. 12 Data Volume Galian Main Drive.....	70
Tabel 4. 15 Volume Grouting	71
Tabel 4. 16 Volume Grouting Initial Drive.....	72
Tabel 4. 17 Volume Grouting Main Drive.....	72
Tabel 4. 18 Rekapitulasi Pekerjaan Initial Drive (T1-3)	76
Tabel 4. 19 Rekapitulasi Pekerjaan Initial Drive Tahap (T4-7)	80
Tabel 4. 20 Rekapitulasi Pekerjaan Initial Drive (R1-50).....	83
Tabel 4. 21 Rekapitulasi Durasi Pekerjaan Initial Drive.....	84



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 4. 22 Rekapitulasi Main Drive	89
Tabel 4. 23 Rekapitulasi Produktivitas Alat Main Drive	90
Tabel 4. 24 Rekapitulasi Pekerjaan Terowongan Keseluruhan	91
Tabel 4. 25 Rekapitulasi Produktivitas Alat	91
Tabel 4. 26 Kebutuhan Segment Beton Pracetak	92
Tabel 4. 27 Kebutuhan Backfill Grouting	93
Tabel 4. 28 Jumlah Tenaga Kerja pada Pekerjaan Terowongan	93
Tabel 4. 29 Penjadwalan Pekerjaan Terowongan	93





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengembangan sistem transportasi massal perkotaan menjadi salah satu upaya pemerintah dalam mengatasi permasalahan kemacetan di DKI Jakarta. Salah satu proyek strategis yang sedang dikembangkan adalah MRT Jakarta Fase 2A yang menghubungkan Bundaran HI hingga Kota. Pembangunan fase ini bertujuan meningkatkan kapasitas layanan transportasi publik sekaligus mendukung mobilitas masyarakat di kawasan pusat kegiatan ekonomi dan perdagangan Jakarta.

Salah satu bagian pekerjaan utama pada MRT Jakarta Fase 2A adalah pembangunan terowongan bawah tanah (*tunnel*) yang dilaksanakan pada Paket Kontrak (*Contract Package*) CP202. Ruas terowongan ini menghubungkan Stasiun Sawah Besar dan Stasiun Mangga Besar melalui jalur down-track. Pelaksanaan pekerjaan terowongan dilakukan di kawasan perkotaan yang padat dengan berbagai utilitas bawah tanah serta aktivitas lalu lintas yang tinggi, sehingga diperlukan metode konstruksi yang efektif dan sesuai dengan kondisi lapangan.

Metode yang digunakan dalam pembangunan terowongan pada proyek ini adalah metode *Shield Tunneling* dengan menggunakan Tunnel Boring Machine (TBM) tipe *Earth Pressure Balance* (EPB). Metode ini merupakan salah satu teknologi konstruksi terowongan modern yang mampu melaksanakan proses penggalian secara mekanis sekaligus memasang segmen beton pracetak sebagai struktur pelapis terowongan. Penggunaan TBM EPB dinilai sesuai untuk kondisi tanah di wilayah Jakarta yang didominasi oleh tanah lunak dan memiliki muka air tanah yang relatif tinggi.

Pelaksanaan pekerjaan tunnel dengan TBM tidak hanya melibatkan proses penggalian tanah, tetapi juga mencakup berbagai tahapan pekerjaan yang saling berkaitan, seperti pemasangan segmen beton pracetak (*segment erection*), serta pekerjaan *backfill grouting*. Setiap tahapan tersebut memerlukan koordinasi antara peralatan, material, dan tenaga kerja agar proses konstruksi dapat berlangsung secara aman dan efisien.

Selain memahami urutan pelaksanaan pekerjaan, diperlukan pula perhitungan kebutuhan pekerjaan yang mendukung proses konstruksi terowongan, seperti volume



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

hasil galian, kebutuhan segmen beton pracetak, volume *backfill grouting*, serta kebutuhan tenaga kerja yang terlibat dalam operasional TBM. Informasi tersebut penting untuk memberikan gambaran mengenai pelaksanaan pekerjaan *tunnel* secara menyeluruh serta mendukung pengendalian pelaksanaan konstruksi di lapangan.

Berdasarkan uraian tersebut, diperlukan kajian mengenai Metode Pelaksanaan Pekerjaan *Tunnel Down-Track* dengan Tunnel Boring Machine Stasiun Sawah Besar–Mangga Besar pada Proyek MRT Fase 2A CP202. Kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai tahapan pelaksanaan pekerjaan tunnel menggunakan TBM tipe *Earth Pressure Balance* (EPB), kebutuhan pekerjaan yang mendukung pelaksanaannya, serta produktivitas TBM sebagai alat utama dalam pekerjaan terowongan.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, adapun rumusan masalah yang akan di bahas pada penulisan tugas akhir ini ialah sebagai berikut:

1. Bagaimana metode pelaksanaan pekerjaan terowongan *down-track* dengan menggunakan Tunnel Boring Machine tipe *Earth Pressure Balance* pada proyek MRT Jakarta CP 202 Stasiun Sawah Besar-Mangga Besar?
2. Berapa nilai volume pekerjaan (meliputi volume galian tanah, kebutuhan segmen beton pracetak, dan *backfill grouting*), dan kebutuhan sumber daya pada pekerjaan pengeboran Tunnel di proyek MRT Jakarta CP 202 Stasiun Sawah Besar-Mangga Besar?
3. Berapa produktivitas Tunnel Boring Machine pada proyek MRT Jakarta CP 202 Stasiun Sawah Besar-Mangga Besar?

1.3 Pembatasan Masalah

Pada penulisan tugas akhir ini perlu adanya pembatasan masalah agar dapat dilakukan secara efektif dan tidak menyimpang dari tujuan penulisan. Adapun lingkup penulisan tugas akhir ini terbatas pada hal-hal berikut:

1. Pembahasan difokuskan pada metode pelaksanaan pekerjaan terowongan menggunakan Tunnel Boring Machine (TBM) tipe *Earth Pressure Balance* (EPB).
2. Ruang lingkup pekerjaan yang dibahas meliputi tahapan:



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- A. *Initial Drive* (dorongan awal);
 - B. *Main Drive* yang mencakup proses penggalian (*excavation*), soil conditioning, pengangkutan hasil galian (*muck handling*), pemasangan segmen beton (*segment erection*), dan *backfill grouting*.
3. Pembahasan tidak mencakup pekerjaan persiapan awal (*site preparatory works*) seperti pembangunan *shaft*, *tunnel eye*, *eye seal*, *cradle*, *reaction frame*, serta perakitan TBM (*TBM assembly*).
 4. Lokasi penelitian dibatasi pada pekerjaan terowongan bawah tanah jalur *down-track* dari Stasiun Sawah Besar menuju Stasiun Mangga Besar pada proyek MRT Jakarta Fase 2A Paket Kontrak CP202.
 5. Pembahasan difokuskan pada urutan pelaksanaan pekerjaan, peralatan yang digunakan, serta alur operasional TBM pada setiap tahapan pekerjaan.
 6. Analisis yang dilakukan terbatas pada produktivitas Tunnel Boring Machine (TBM) sebagai alat utama pekerjaan terowongan. Analisis produktivitas tenaga kerja, produktivitas proyek secara keseluruhan, biaya konstruksi, manajemen risiko, dan desain struktur terowongan tidak dibahas dalam penelitian ini..
 7. Perhitungan yang dilakukan terbatas pada volume hasil galian, kebutuhan segmen beton pracetak, volume *backfill grouting*, serta kebutuhan tenaga kerja yang mendukung metode pelaksanaan pekerjaan *tunnel*. Penelitian ini tidak membahas analisis desain maupun optimasi operasional TBM.

1.4 Tujuan

Berdasarkan perumusan masalah yang telah disampaikan, maka tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Menjelaskan metode pelaksanaan pengeboran terowongan jalur *down-track* dengan Tunnel Boring Machine pada Proyek MRT Jakarta CP 202 stasiun sawah besar-mangga besar secara sistematis.
2. Mengetahui volume pekerjaan pengeboran, *backfill grouting* dan jumlah kebutuhan sumber daya pada pekerjaan pengeboran terowongan di lokasi tinjauan.
3. Menganalisis produktivitas Tunnel Boring Machine di lapangan.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.5 Sistematika Penulisan

Tugas Akhir ini disusun secara sistematis dalam lima bab, dengan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pembahasan pada bab ini berisikan tentang latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini akan memuat tentang dasar-dasar teori yang relevan dengan permasalahan yang akan dibahas dan disertai berbagai sumber referensi yang akan digunakan sebagai landasan.

BAB III METODE PEMBAHASAN

Pembahasan pada bab ini berisikan penjelasan mengenai lokasi penelitian serta gambaran umum metode yang digunakan dalam penyusunan tugas akhir ini.

BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan data-data teknis proyek yang diperoleh dari lapangan. Pembahasan difokuskan pada perhitungan volume pekerjaan (galian tanah, segmen beton, dan *grouting*), analisis kebutuhan sumber daya, serta evaluasi produktivitas alat TBM EPB yang digunakan.

BAB V KESIMPULAN

Dalam bab ini membahas mengenai kesimpulan dari keseluruhan isi penulisan Tugas Akhir yang telah dilakukan.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai metode pelaksanaan pekerjaan tunnel down-track dengan Tunnel Boring Machine (TBM) tipe Earth Pressure Balance (EPB) pada Proyek MRT Jakarta Fase 2A CP202 segmen Stasiun Sawah Besar–Mangga Besar, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Produktivitas Tunnel Boring Machine (TBM)

Berdasarkan analisis produktivitas TBM tipe EPB dengan diameter shield 6,79 meter pada proyek MRT Jakarta Fase 2A CP202, diperoleh hasil sebagai berikut:

- a. Kecepatan penetrasi teoritis (Penetration Rate) sebesar 0,96 m/jam atau setara dengan 16 mm/menit pada kondisi operasi normal Main Drive.
- b. Produktivitas TBM mencapai 0,326 ring/jam atau setara dengan 7,21 ring/hari.
- c. Kemajuan terowongan (Advance Rate) sebesar 10,82 m/hari dengan asumsi jam kerja efektif 22 jam per hari.
- d. Total durasi pelaksanaan pekerjaan terowongan sepanjang 790 m adalah 76,39 hari, yang terdiri dari:
 - 1) Pekerjaan Initial Drive (57 ring) selama 11,28 hari (248,09 jam)
 - 2) Pekerjaan Main Drive (470 ring) selama 65,11 hari (1.432,42 jam)

Produktivitas TBM sangat dipengaruhi oleh waktu siklus (cycle time) yang terdiri atas waktu excavasi (93,75 menit/ring), waktu pemasangan segmen (65 menit/ring), dan waktu grouting (25 menit/ring), sehingga total waktu siklus pada Main Drive adalah 183,75 menit/ring.

2. Volume Pekerjaan dan Kebutuhan Sumber Daya

Berdasarkan perhitungan volume pekerjaan dan kebutuhan sumber daya pada pekerjaan terowongan down-track Stasiun Sawah Besar–Mangga Besar sepanjang 790 m, diperoleh hasil sebagai berikut:

- a. Volume Galian Tanah:
 - 1) Volume galian teoritis total: 28.606 m³
 - 2) Volume galian Initial Drive: 2.932,97 m³
 - 3) Volume galian Main Drive: 25.672,89 m³



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4) Kapasitas Soil Pumping System: 100 m³/jam (dinilai efisien untuk mengimbangi laju galian TBM sebesar 17,74 m³/jam)

b. Kebutuhan Segmen Beton Pracetak:

- 1) Jumlah total ring: 527 ring
- 2) Segmen per ring: 6 segment
- 3) Total kebutuhan segmen: 3.162 segment
- 4) Volume beton segmen total: 4.727,95 m³

c. Volume Backfill Grouting:

- 1) Volume void total: 1.167,50 m³
- 2) Faktor overfill: 1,20
- 3) Volume grouting total: 1.401,00 m³ (terdiri dari Initial Drive 151,62 m³ dan Main Drive 1.249,38 m³)

d. Kebutuhan Tenaga Kerja:

- 1) TBM Operator: 2 orang
- 2) Segment Erector Operator: 2 orang
- 3) Grouting Operator: 2 orang
- 4) Locomotive Operator: 2 orang
- 5) Gantry Crane Operator: 1 orang
- 6) Teknisi/Mechanic: 2 orang

3. Metode Pelaksanaan Shield Tunneling

Metode Shield Tunneling menggunakan TBM tipe Earth Pressure Balance (EPB) diterapkan secara sistematis melalui tahapan sebagai berikut:

a. Tahap Initial Drive: Terdiri atas tiga fase, yaitu:

- 1) Pemasangan temporary ring (T1–T3) sebagai tumpuan gaya dorong TBM sebelum menembus dinding shaft
- 2) Breakthrough (T4–T7) dengan kecepatan rendah (7 mm/menit) untuk menembus tunnel eye dan diaphragm wall yang diperkuat GFRP
- 3) Pemasangan permanent ring (R1–R50) hingga kondisi operasi TBM stabil

b. Tahap Main Drive: Merupakan siklus pekerjaan berulang yang terdiri atas:

- 1) Excavation dengan kecepatan penetrasi 0,96 m/jam dan pengendalian face pressure



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- 2) Segment erection menggunakan segment erector dengan waktu pemasangan 65 menit/ring
- 3) Backfill grouting menggunakan two-component grout dengan gel time 5–12 detik yang dilakukan simultan dengan proses penggalian
- 4) Monitoring berkala menggunakan sistem panduan TBM dan Total Station
- c. Sistem Pembuangan Material: Menggunakan Soil Pumping System dengan kapasitas 100 m³/jam yang menyalurkan material galian dari screw conveyor langsung ke muck pit di permukaan melalui instalasi perpipaan.
- d. Alat Pendukung: Gantry Crane (15 ton), Locomotive (kecepatan operasi 7,2 km/jam), dan Segment Car (kapasitas 15 ton) terintegrasi dalam sistem supply segment yang mendukung kelancaran operasional TBM.





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- Armaghani, et al. (2021). A Review of TBM Performance Prediction Models Based on Soft Computing Techniques. *Archives of Computational Methods in Eng.*, 28(4), 2405–2432. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09462-y>
- Chapman, David; Metje, Nicole; Stark, A. (2017). *Introduction to Tunnel Construction* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315273560>
- EFNARC. (2005). *Specification and Guidelines for the Use of Specialist Products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock*. <https://www.efnarc.org>
- Federal Highway Administration (FHWA). (2009). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels - Civil Elements*. U.S. Department of Transportation.
- Guglielmetti, V.; Grasso, P.; Mahtab, A.; Xu, S. (2008). Mechanized Tunnelling in Urban Areas. In *Mechanized Tunnelling in Urban Areas*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203938515>
- ITA Working Group No. 2. (2000). Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(3), 303–331. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(00\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00047-7)
- Liu, X., Zhang, W., Shao, C., Wang, Y., & Cong, Q. (2024). Geological adaptive intelligent control of earth pressure balance shield machine based on deep reinforcement learning. *Artificial Intelligence Review*, 57(8), 1–28. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10850-y>
- Lubis, R. (2023). Pemanfaatan Beton Semprot dalam Konstruksi Terowongan di Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, 15(3), 112–120. jtsi-pnt.org
- Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised Shield Tunnelling*. Ernst & Sohn. <https://doi.org/10.1002/9783433603786>



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Maidl, B., Thewes, M., & Maidl, U. (2014). Handbook of tunnel engineering I: Structures and methods. In *Handbook of Tunnel Engineering I: Structures and Methods*. Ernst & Sohn. <https://doi.org/10.1002/9783433603499>
- Markus, A. T., Christian, B., & Bezuijen. (2013). Handbook of Tunnel Engineering. In *Mechanised Shield Tunnelling*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783433603499>
- Nugroho, S. A., & Ramadhan, M. F. (2021). Perkembangan Teknologi TBM dalam Pembangunan Terowongan Transportasi di Indonesia. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil PNJ*, 112–119.
- Putra, H., et al. (2023). Analisis Deformasi Tanah pada Konstruksi Terowongan MRT Jakarta dengan Metode Shield Tunneling. *Jurnal Infrastruktur Dan Teknik Sipil*, 5(1), 45–58. <https://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jits>
- Saputra, A.; Wibowo, H. (2023). Manajemen Logistik Alat Berat pada Proyek Infrastruktur Skala Besar. *Jurnal Manajemen Konstruksi Indonesia*, 12(1), 88–102. <https://jmki.ub.ac.id>
- Tanne, Y. A. (2022). Operasi Tunneling Dengan Metode Natm Pada Pembangunan Terowongan Walini Kereta Api Cepat Jakarta-Bandung. *CRANE: Civil Engineering Research Journal*, 3(1), 36–43. <https://doi.org/10.34010/crane.v3i1.8172>
- Zhang, P., et al. (2022). Review of Real-time Optimization of Tunnel Boring Machine Operating Parameters. *Journal of Civil Engineering and Management*, 28(4), 280–295. <https://doi.org/10.3846/jcem.2022.16453>