

Peningkatan Pemahaman Metode Pelaksanaan Pembangunan Terowongan Samarinda Menggunakan New Austrian Tunneling Method (NATM)

¹⁾Wahyu Putra Pratama, ²⁾Kukuh Prihatin, ³⁾Raudah Ahmad*, ⁴⁾Pulung Priyo Pamungkas, ⁵⁾Amien Fatturochman

^{1,2,3)}Rekayasa Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Samarinda, Samarinda, Indonesia
⁴⁾Magister Terapan Rekayasa Perawatan Restorasi Jembatan Polnes, Samarinda, Indonesia
⁵⁾PT. Ciriajasa Cipta Mandiri, Samarinda, Indonesia
Email Corresponding: raudah@polnes.ac.id*

INFORMASI ARTIKEL	ABSTRAK
Kata Kunci: Terowongan Metode Pelaksanaan NATM Infrastruktur Modern Samarinda	Pembangunan terowongan di Samarinda merupakan upaya strategis untuk meningkatkan konektivitas, mengurangi kemacetan, dan memperluas aksesibilitas layanan publik, dengan mempertimbangkan aspek teknis, sosial, dan lingkungan. Metode <i>New Austrian Tunneling Method</i> (NATM) diterapkan untuk memanfaatkan kekuatan alami massa batuan sebagai penyangga utama, didukung oleh sistem klasifikasi massa batuan seperti Q-system untuk menentukan jenis penyangga tambahan yang sesuai, mengingat kualitas batuan di lokasi tergolong sedang hingga buruk. Teknologi modern, seperti digitalisasi dan pemantauan menggunakan drone, turut meningkatkan efisiensi konstruksi. Dampak sosial proyek ini meliputi peningkatan mobilitas masyarakat, pengurangan waktu tempuh, dan pemanfaatan moda transportasi yang lebih ramah lingkungan. Partisipasi aktif masyarakat dalam proses pembangunan memastikan proyek sesuai kebutuhan lokal dan mendapat dukungan komunitas, menjadikan pembangunan ini solusi yang komprehensif dan berkelanjutan.
Keywords: Tunnel Implementation method NATM Modern Infrastructure Samarinda	The construction of tunnels in Samarinda is a strategic effort to enhance connectivity, reduce traffic congestion, and improve accessibility to public services while considering technical, social, and environmental aspects. The <i>New Austrian Tunneling Method</i> (NATM) was implemented to utilize the natural strength of rock masses as the primary support, complemented by the Q-system classification to determine appropriate additional supports, given the medium to poor quality of rock at the site. Modern technologies, such as digitalization and drone monitoring, have further improved construction efficiency. The social impacts of this project include enhanced mobility, reduced travel time, and the adoption of more environmentally friendly transportation modes. Active community participation during the development process ensures the project meets local needs and gains public support, making this initiative a comprehensive and sustainable solution.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](#) license.



I. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur terowongan di Indonesia, khususnya di kota-kota besar seperti Samarinda, semakin menjadi kebutuhan penting untuk mendukung mobilitas dan pengembangan ekonomi. Terowongan merupakan solusi yang efektif untuk mengatasi masalah kemacetan dan keterbatasan ruang pada permukaan jalan. Namun, pelaksanaan pembangunan terowongan masih menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam hal pemilihan metode konstruksi yang tepat dan efisien, serta pemahaman terhadap teknologi terbaru yang dapat meningkatkan hasil pembangunan. Oleh karena itu, penting untuk melakukan penelitian terkait peningkatan pemahaman metode pelaksanaan pembangunan terowongan di Samarinda, sebagai salah satu solusi untuk menciptakan infrastruktur modern yang lebih baik.

Terowongan yang dibangun dengan metode yang tepat tidak hanya dapat memperlancar arus transportasi, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap ekonomi dan kualitas hidup masyarakat. Menurut data dari

Badan Pusat Statistik (BPS), kota Samarinda sebagai pusat ekonomi Kalimantan Timur mengalami peningkatan pesat dalam jumlah penduduk dan volume kendaraan. Ini memicu kebutuhan akan solusi infrastruktur yang lebih modern dan efisien, termasuk pembangunan terowongan yang dapat mengurangi kemacetan dan meningkatkan konektivitas antar wilayah.

Selain itu, dengan terus berkembangnya teknologi konstruksi, pemilihan metode yang tepat dalam pembangunan terowongan dapat mengurangi dampak lingkungan dan mempercepat waktu pelaksanaan proyek. Oleh karena itu, jurnal ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan infrastruktur terowongan di Samarinda dan daerah lainnya di Indonesia. Dengan demikian, hasil pembahasan ini tidak hanya relevan bagi pengembangan ilmu teknik sipil, tetapi juga bagi pemangku kebijakan dan masyarakat yang akan merasakan manfaat dari infrastruktur yang lebih modern dan efisien.

II. MASALAH

Pembangunan Proyek Terowongan Samarinda ini menerima banyak keraguan masyarakat akan risiko atau bahaya pada penggunaan infrastruktur tersebut kedepannya, maka dengan adanya pembahasan ini diharapkan bisa memberikan bayangan/gambaran kepada masyarakat terhadap bagaimana pelaksanaan pekerjaan pembangunan proyek terowongan samarinda yang melewati proses dengan sangat detail dan selalu dalam pengawasan yang ketat, sehingga memberikan kualitas yang sangat baik serta keamanan untuk digunakan sebagai salah satu infrastruktur yang ada di kota samarinda untuk kemudian hari, Lokasi proyek pembangunan terowongan Jl. Alimuddin-Kakap terletak di dua wilayah, yaitu di sisi Inlet di Jl. Sultan Alimuddin, Kelurahan Sambutan, Kecamatan Sambutan, Kota Samarinda, Kalimantan Timur, dan di sisi outlet di Jl. Kakap, Kelurahan Sungai Dama, Kecamatan Samarinda Ilir, Kota Samarinda, Kalimantan Timur. Dengan panjang total Terowongan yaitu 426m. Lokasi lengkapnya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Proyek Tunnel/Terowongan Samarinda

III. METODE

Penyampaian metode pelaksanaan proyek Terowongan Samarinda kepada masyarakat dilakukan melalui pendekatan yang terstruktur dan mudah diakses oleh berbagai kelompok. Informasi yang disampaikan mencakup urutan pelaksanaan proyek, teknologi yang diterapkan, serta manfaat yang akan dirasakan masyarakat setelah proyek selesai. Informasi tersebut disebarluaskan melalui publikasi ilmiah, dan artikel atau jurnal yang dapat diakses oleh publik dan kalangan akademis. Dalam jurnal ini, dijelaskan dengan rinci mengenai proses konstruksi. Melalui pendekatan berbasis jurnal ini, diharapkan masyarakat tidak hanya memperoleh pemahaman yang lebih baik, tetapi juga dapat menjadikannya sebagai referensi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang konstruksi dan infrastruktur. Pendekatan ini membuka akses informasi yang mendorong masyarakat untuk lebih memahami dan mendukung keberhasilan proyek tersebut.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Terowongan merupakan sebuah tembusan tertutup dengan ujung terbuka di bawah permukaan tanah. Bangunan terowongan umumnya dibuat untuk keperluan transportasi di lokasi yang tidak memungkinkan adanya pembangunan akses transportasi di atas permukaan tanah, seperti pada daerah perkotaan atau daerah perbukitan. Pada Proyek Pembangunan Terowongan Jalan Sultan Alimuddin – Kakap, Kota Samarinda, terowongan digali dengan menggunakan metode New Austrian Tunneling Method (NATM) yaitu dengan cara

membagi terowongan menjadi dua bagian yaitu galian atas (upper) dan galian bawah (lower). Penggalian menggunakan metode mekanis yang akan dikerjakan secara simultan dari inlet dan outlet, Pemilihan Metode ini tidak alah satu keunggulan utama penggunaan metode New Austrian Tunneling Method (NATM) dalam pembangunan terowongan adalah kemampuannya untuk meminimalkan dampak terhadap lingkungan, termasuk vegetasi di permukaan tanah. Metode ini dirancang untuk mengutamakan stabilitas tanah dan batuan di sekitar terowongan, sehingga pekerjaan konstruksi dapat dilakukan dengan lebih terkendali tanpa perlu menggali atau merusak area luas di permukaan.

Karena proses konstruksinya sebagian besar dilakukan di bawah tanah, metode NATM memungkinkan vegetasi di atas lokasi terowongan tetap terjaga. Penyangga awal, seperti beton semprot dan baut batuan, digunakan untuk mendukung struktur selama penggalian berlangsung, yang membantu mencegah gangguan besar terhadap ekosistem di permukaan. Dengan pendekatan ini, pembangunan terowongan dapat berkontribusi pada kelestarian lingkungan sembari memenuhi kebutuhan infrastruktur modern. Pendekatan seperti ini sejalan dengan prinsip keberlanjutan dalam konstruksi, yang semakin relevan di tengah upaya global untuk mengurangi kerusakan lingkungan akibat pembangunan. Pada saat penggalian, dilakukan pemasangan struktur sementara (temporary structure) berupa penyangga steelrib, shotcrete, dan rockbolt pada jarak tertentu dan forepoling pada daerah sesar dan zona overburden tipis. Setelah dilakukan pemasangan struktur sementara tersebut, akan dilanjutkan dengan konstruksi struktur utama, yaitu invert dan lining. Pekerjaan ini meliputi pemasangan waterproofing hingga pengecoran struktur

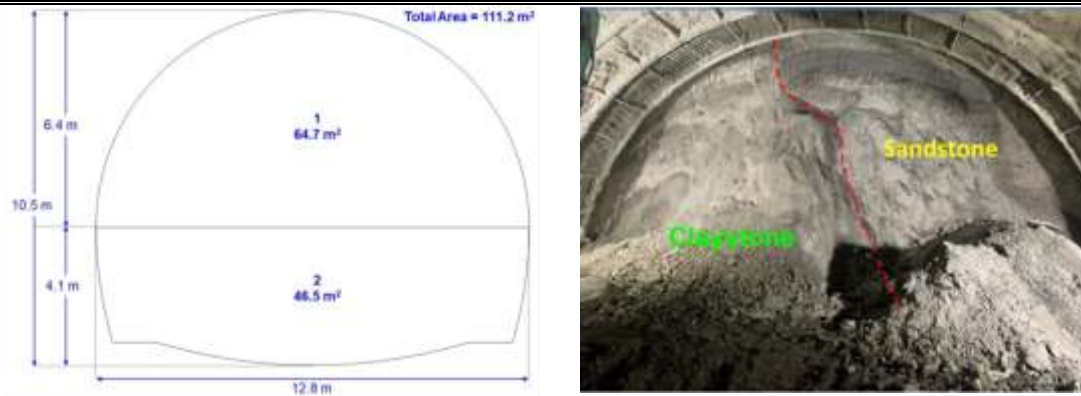
NATM (New Austrian Tunneling Method) merupakan metode konstruksi terowongan yang dikembangkan di Austria pada tahun 1960-an. Metode ini lebih mengutamakan pemanfaatan kemampuan alam, terutama lapisan tanah dan batuan yang ada di sekitar terowongan, untuk menjaga kestabilan struktur selama proses pengeboran. Konsep utama dari NATM adalah menggunakan desain yang fleksibel dan teknik penguatan bertahap untuk mengoptimalkan penggunaan material serta memastikan keamanan. Pada dasarnya, NATM menggabungkan prinsip-prinsip teknik geoteknik dengan sistem pemantauan yang cermat. Proses konstruksinya dilakukan secara bertahap, yaitu dengan menggali bagian-bagian terowongan secara bertahap, kemudian memasang sistem penguat seperti shotcrete (beton semprot), penyangga logam, dan pelat beton untuk mengontrol deformasi tanah atau batuan yang ada. Keunggulan NATM adalah kemampuannya untuk menyesuaikan diri dengan kondisi geologi yang beragam dan lebih hemat biaya dibandingkan metode tradisional yang mengandalkan penyangga permanen sejak awal. Selain itu, metode ini memungkinkan pengembangan terowongan yang lebih cepat dengan meminimalkan kerusakan pada struktur tanah sekitar terowongan.

Desain Tunnel

Terowongan Jl. Sultan Allimudin – Jl. Kakap didesain berpenampang tapal kuda, berdimensi galian 12,8 m x10,5 m, dan memiliki luas sebesar 111,2 m² dan panjang terowongan 426 m.

Kondisi Geologi

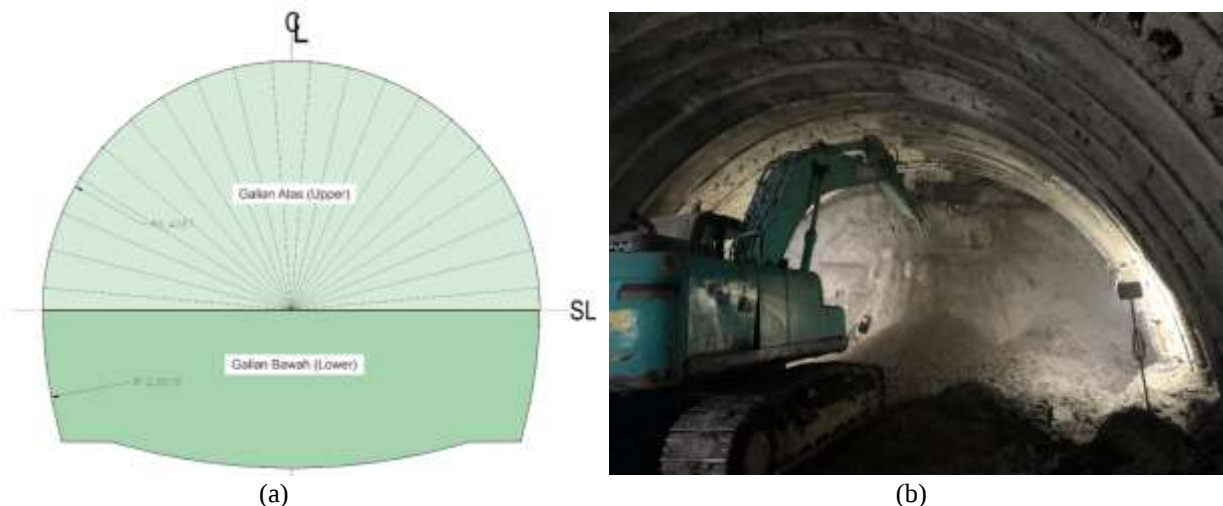
Kondisi Geologi Terowongan tersusun oleh perselingan antara batupasir dengan sisipan batu lempung, batubara dan tufa pasir, untuk memastikan kondisi aktual di lapangan, tim geologi akan memeriksa langsung kelas batuan yang dihadapi menggunakan metode RMR untuk menentukan apakah pekerjaan tetap sesuai desain atau ada perubahan menyesuaikan hasil RMR lapangan.



Gambar 2. (a) Desain Tunnel Samarinda; (b) Jenis Batuan di Lapangan

Eksavasi/ Penggalian

Sebelum dilakukan penggalian, dilakukan marking dengan acuan BM dan control point yang telah ditentukan. Pekerjaan penggalian atau ekskavasi dilakukan oleh excavator twin header dengan cara menggali area yang sudah dimarking sehingga membentuk area tunnel sesuai dengan desain. Material hasil galian akan diangkut ke disposal yang telah disediakan. Penggalian dibagi menjadi 2 bagian, yaitu galian upper dan galian lower (Gambar 4). Tinggi galian atas (upper) setinggi set steelrib atas atau setara dengan $\pm 6,42$ m dan galian bawah setinggi steelrib bawah atau setara dengan $\pm 4,08$ m. Penggalian dimulai dari bagian sisi atas tepi kiri hingga ujung kanan, kemudian menurun. Setelah penggalian upper mencapai 50 m, kemudian akan dilanjutkan dengan galian pada bagian lower.



Gambar 3. (a) Ilustrasi galian terowongan terbagi menjadi 2, galian atas (upper) dan galian bawah (lower); (b) Pekerjaan Galian Upper Menggunakan Alat Twin Header

Sumber: PT.PP (2024)

Pemasangan Penyangga Steelrib

Pemasangan penyangga steelrib diawali dengan tim surveyor melakukan pengukuran dan marking lokasi rencana pemasangan steelrib sesuai dengan desain rencana yang ada. Apabila masih terdapat area yang underbreak, dilakukan chipping hingga pemasangan steelrib sesuai dengan shopdrawing. Pada saat yang bersamaan dilakukan proses melangsir baja profil yang telah di-bending dari stockpile ke mulut terowongan. Bagian atas steelrib dipasangkan terlebih dahulu untuk mengurangi kemungkinan ketidakcocokan antar steelrib dan mempercepat proses instalasi. Steelrib bagian atas terdiri dari steelrib kanan dan kiri akan disambungkan dengan menggunakan 2 baut M22 yang dikencangkan sesuai dengan nilai torsi yang dibutuhkan yaitu sekitar 240 Nm. Setelah dilakukan torsi, diberikan marking untuk menandai bahwa pada baut tersebut telah dilakukan pengujian. Steelrib, dengan mutu baja grade 345, bagian atas yang telah disambungkan sebelumnya kemudian diangkat dengan menggunakan jumbo drill (lifting plan dengan menggunakan jumbo

drill) dan diposisikan pada lokasi yang telah dimarking. Setelah steelrib terpasang, dilakukan pemasangan tie rod. Tie rod ini berfungsi sebagai sambungan antar pasangan steel rib sehingga satu dengan yang lainnya saling berkaitan. Hal ini bertujuan untuk memberikan kekuatan yang merata diantara tiap pasangan steelrib yang telah terinstal dan menjaga jarak antar steel rib.

Pemasangan Wiremesh

Sebelum melakukan pemasangan wiremesh, perlu dipastikan bahwa hasil galian terowongan tidak terdapat bagian yang masih dalam kondisi underbreak, sehingga tidak mengganggu pekerjaan. Pemasangan wiremesh dilakukan dengan memasang rockpin. Jarak antara batuan dan wiremesh adalah 7 cm. Rockpin menggunakan besi D10 dan menyesuaikan kebutuhan di lapangan. Rockpin yang berfungsi sebagai penambat atau angkur sekaligus menjaga jarak antar wiremesh dengan permukaan batuan sekaligus sebagai penanda ketebalan shotcrete di lapangan. Pemasangan rockpin akan menggunakan palu, tetapi apabila terkendala batuan keras, maka salah satu cara lainnya untuk memasang pin tersebut yakni dengan mengelas pada steelrib yang telah terpasang. Setelah rockpin terpasang, dilakukan pemasangan wiremesh dilakukan. Wiremesh (M150) dipasang pada rockpin dan dilas pada steelsupport sebagai perkuatan untuk menjaga kedudukan wiremesh yang dipasang. Overlap pemasangan wiremesh menggunakan 2 lubang wiremesh atau setara dengan 30 cm. Pemasangan dilakukan secara manual dengan bantuan bucket manlift atau manliftjumbo drill.



Gambar 6. Erection/Pemasangan Baja Steelrib, Pemasangan Wiremesh

Pekerjaan Shotcrete/Beton Semprot

Setelah pemasangan steelrib dan wiremesh dilanjutkan dengan pekerjaan shotcrete. Sebelum melakukan pekerjaan, dilakukan persiapan alat dan material yang akan digunakan. Terutama kebersihan dari mesin penembak (nozzle). Mesin harus terlebih dahulu di-*flushing* atau dibersihkan dengan menggunakan angin dari kompresor. Alat dianggap dapat berfungsi dengan baik apabila tekanan yang dikeluarkan dari nozzle sesuai dengan tekanan yang disyaratkan agar tidak terjadi keruntuhan material shotcrete saat berada di terowongan. Selain peralatannya, material beton shotcrete harus siap dicampurkan dengan pertimbangan setiap proses galian diperlukan *safety shotcrete*. Semua material yang diperlukan untuk pekerjaan shotcrete disiapkan dan diletakkan pada tempat yang telah ditentukan, sehingga tidak mengganggu mobilisasi dalam terowongan. Shotcrete yang digunakan adalah tipe wet mix $f_c' 20$ MPa. Setelah dilakukan pencampuran, campuran dimasukkan kedalam mesin shotcrete. Mesin ini akan memompa hasil campuran tersebut dengan bantuan kompresor. Kemudian disiapkan air untuk adukan beton distock dalam drum tampungan air. Kemudian dilanjutkan dengan mencampurkan air dengan zat aditif untuk meningkatkan mutu beton dan mempercepat proses setting beton. Shotcrete akan diaplikasikan dengan menggunakan robot shotcrete yang dikendalikan secara jarak jauh. Penyemprotan beton harus tetap memperhatikan ketebalan rencana yakni 20 cm. Robot shotcrete akan menembakkan shotcrete pada jarak ± 1 m untuk menjaga jarak shotcrete dan meminimalisir adanya rebound yang terlalu banyak. Selanjutnya shotcrete akan dilakukan perawatan dengan melakukan curing apabila dibutuhkan. Curing dilakukan dengan menyiramkan air pada permukaan shotcrete pada 1-2 hari setelah pekerjaan shotcrete apabila dibutuhkan. Selain itu, dapat juga dilakukan perawatan dengan menyempotkan angin 2-7 hari setelah dilakukan pekerjaan shotcrete.

Pemasangan Rockbolt

Sebelum dilakukan pengeboran, tim surveyor akan melakukan pengukuran dan marking di titik lokasi rockbolt sesuai dengan desain rencana. Hal ini dilakukan untuk memastikan lokasi pemasangan telah sesuai dan rockbolt dapat memberikan perkuatan pada galian secara maksimal. Titik rockbolt dibor dengan jumbo drill hingga kedalaman dan diameter sesuai rencana dan spesifikasi yang ditentukan yaitu kedalaman 4 m (pada zona normal) dan 8m (pada zona sesar). Drilling memiliki diameter 30 mm. Kemudian dimasukkan batang baja D25. Pekerjaan pengeboran dilakukan dengan mengikuti kebutuhan dan sudut kemiringan mengikuti gambar kerja. Pengeboran dilakukan dengan hati-hati sehingga tanah pada sekitar pengeboran tidak terganggu. Setelah dilakukan pengeboran, lubang harus dibersihkan dari material lepas dengan udara bertekanan yang cukup sehingga tidak merusak lubang drilling. Setelah dibersihkan, besi rockbolt kemudian dimasukkan kedalam lubang drilling tersebut.

Selanjutnya dilakukan grouting untuk rockbolt yang telah terpasang. Pada bagian yang vertical dan menuju arah vertikal dilakukan dengan menggunakan bantuan pecker grout sehingga mencegah material grouting tumpah. Kecepatan grouting harus diatur sehingga grouting dapat menutup zona dengan baik dan sesuai dengan spesifikasi. Apabila terlalu lambat, material tidak dapat menutup celah celah rekahan kecil dan apabila terlalu cepat akan merusak lubang bolt tersebut. Setelah grouting, dilakukan pengecoran pedestal plat. Selanjutnya, dilakukan pemasangan plat dan baut pada ujung rockbolt. Setelah grouting mencapai umur rencana (28 hari), dilakukan pull out test sesuai dengan persyaratan spesifikasi teknis. Kemudian dilakukan *pullout test* untuk mengetahui kekuatan tariknya. Rockbolt harus di tension hingga 80% atau 11 ton-force dari kapasitas beban pada titik hasil dan grouting. Jumlah titik yang dilakukan pullout test sebanyak 2% dari total rockbolt yang terpasang.



Gambar 7. Pekerjaan Shotcrete

Pemasangan Forepoling

Pada zona sesar, perkuatan akan ditambah dengan forepoling. Forepoling akan dipasang sebelum memulai ekskavasi. Sebelum melakukan pekerjaan pemasangan forepoling, dilakukan pengukuran dan menandai titik pemasangan. Pada bagian portal, panjang forepoling yang akan digunakan yaitu 15 m. Forepoling akan dipasang sebanyak 29 buah dengan spasi 0,5m. Sedangkan pada zona sesar dan zona overburden tipis, panjang forepoling yang akan digunakan yaitu 9 m. Forepoling yang dipasang sebanyak 29 buah dengan spasi 0,5m. Jeda titik forepoling satu ke titik lainnya adalah 3 m.

Titik forepoling kemudian di bor dengan menggunakan jumbo drill dengan sudut 17,8°. Panjang forepoling yang terpasang adalah 8,5 m dan yang tidak tertanam 0,5 m. Drilling dilakukan secara berseling (hari pertama 1,3,5,7, dilanjutkan 2,4,6,8, dan selanjutnya) atau menyesuaikan dengan kondisi lapangan. Kemudian setelah dilakukan pemasangan pipa forepoling dan diakhiri dengan grouting. Grouting forepoling dilakukan dengan cara berseling atau lompat-lompat agar dapat tergrouting dengan baik



Gambar 8. (a) Pengeboran Rockbolt; (b) Pengeboran Forepoling/Pipe Roof

Pekerjaan Pemasangan Angkur

Selain forepoling, pada zona sesar akan ditambahkan perkuatan berupa angkur. Titik angkur dibor dengan jumbo-drill hingga kedalaman dan diameter sesuai rencana dan spesifikasi yang ditentukan yaitu kedalaman 8 m dan diameter 115 mm. Kemudian dimasukkan batang pipa baja diameter 114mm. Selanjutnya, dilakukan grouting.



Gambar 9. Grouting Angkur

Pekerjaan Galian Invert

Dilakukan penggalian pada bagian bawah, yang berbentuk lengkung, dengan menggunakan twin header pada area terbatas (sisi kanan dan kiri galian) dan excavator pada bagian perut galian. Kemudian dilakukan perapihan secara manual agar sesuai dengan elevasi desain.



Gambar 10. Galian Invert/Lower Tunnel

Pelaksanaan pekerjaan selanjutnya adalah Pekerjaan lantai kerja, pekerjaan pembesian invert, pekerjaan pengecoran invert, pemasangan waterproofing, pekerjaan perakitan sliding form, pekerjaan pembesian lining, pekerjaan pengecoran lining.

V. KESIMPULAN

Penyampaian informasi ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman masyarakat tentang proses pelaksanaan pembangunan terowongan dengan menggunakan metode **New Austrian Tunneling Method (NATM)**. Berdasarkan hasil penelitian, NATM terbukti sebagai pendekatan yang efektif dalam mengatasi berbagai tantangan geoteknik melalui penggalian yang terkendali, pemasangan penyangga yang tepat, dan pemantauan kestabilan secara terus-menerus. Melalui penyampaian informasi yang lebih sistematis terkait tahapan pelaksanaan dan keunggulan NATM, penulisan ini diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat akan pentingnya metode yang terencana dalam pembangunan terowongan. Harapannya, pemahaman ini dapat memperkuat dukungan masyarakat terhadap proyek infrastruktur yang mengutamakan keselamatan, efisiensi, dan keberlanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Pusat Statistik (BPS). (2023). *Statistik Kota Samarinda: Penduduk dan Transportasi*. Jakarta: BPS.
- Guo, X. (2024). "Rock Deformation Monitoring in Tunnel Construction Using NATM." *Journal of Geotechnical Engineering*, 56(2), 135–145.
- Liu, J., Wang, H., & Zhao, Q. (2022). "Effectiveness of Shotcrete and Rock Bolts in Tunnel Stability." *Tunneling and Underground Space Technology*, 78, 89–101.
- Lubis, R. (2023). "Pemanfaatan Beton Semprot dalam Konstruksi Terowongan di Indonesia." *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, 15(3), 211–220.
- Pan, J., & Yang, L. (2012). "Geotechnical Challenges in Tunnel Construction: Case Studies." *Journal of Civil Engineering Research*, 34(4), 250–260.
- Wang, Y. (2024). "Advances in NATM for Complex Geotechnical Conditions." *International Journal of Tunneling Research*, 42(1), 20–35.
- Wijaya, A., et al. (2021). "Real-Time Monitoring Systems in Tunnel Construction Projects." *Jurnal Inovasi Infrastruktur*, 8(2), 175–183.
- Yang, Z., & Hu, C. (2013). "Integration of Monitoring Systems for Tunnel Stability." *Journal of Structural Engineering*, 39(5), 455–462.