

KAJIAN METODE ATN (Auger Tunnel Navigation) DAN EPB (Earth Pressure Balance) PADA PEKERJAAN KONSTRUKSI BOR HORIZONTAL

Gunawan Wibosono¹✉

¹ Dosen Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Pekerjaan

Email: g.wibosono17125@gmail.com

Abstrak

Pekerjaan konstruksi bor horizontal dengan metode Auger Tunnel Navigation (ATN) dan Earth Pressure Balance (EPB) merupakan metode yang mulai di gunakan pada pekerjaan konstruksi bawah tanah, permasalahan yang timbul adalah apa kelebihan dan kekurangan metode ini, bagaimana perbedaan metode ini dalam hal pembiayaan dan keselamatan dan kesehatan kerja serta factor apa yang menjadikan pilihan metode ini cocok untuk pekerjaan yang di maksud agar memberikan efektifitas dan efisiensi dari tujuan pekerjaan yang bisa tercapai dengan baik. dari hasil kajian ini di dapat bahwa penggunaan metode yang tepat harus di sesuaikan dengan diameter pipa yang akan di pakai dan kondisi tanah di lokasi pekerjaan agar alat bor horizontal mampu mengerjakan dengan pembiayaan yang ekonomis sehingga pekerjaan bor horizontal layak di gunakan dengan resiko yang tidak terlampau besar. Para perencana dan praktisi konstruksi dilapangan bisa mengestimasi ketersediaan peralatan yang memadai untuk pekerjaan bor horizontal sesuai jenis peralatan yang akan di gunakan. Baik yang kecil, sedang maupun yang besar pada peralatan bor horizontal yang di gunakan dilapangan nantinya. Identifikasi lokasi terhadap jenis tanah, kedalaman pemasangan, shaft atau starting pit awal dan akhir perlu dibuat se ekonomis mungkin sehingga cocok dengan lokasi pemasangan di lapangan, sehingga biaya operasional kerja dan keselamatan , Kesehatan kerja bisa di capai dengan baik.

Kata Kunci: ATN, EPB, Proyek, Pipa.

Abstract

Horizontal drilling construction work with the Auger Tunnel Navigation (ATN) and Earth Pressure Balance (EPB) methods is a method that is starting to be used in underground construction work, the problems that arise are what are the advantages and disadvantages of this method, how is the difference between this method in terms of financing and occupational safety and health and what factors make the choice of this method suitable for the intended work in order to provide effectiveness and efficiency of the work objectives that can be achieved well. From the results of this study it can be seen that the use of the right method must be adjusted to the diameter of the pipe to be used and the soil conditions at the work site so that the horizontal drilling tool is able to work with economical costs so that horizontal drilling work is feasible to use with risks that are not too large. Planners and construction practitioners in the field can estimate the availability of adequate equipment for horizontal drilling work according to the type of equipment to be used. Both small, medium and large on the horizontal drilling equipment used in the field. Identification of the location of the type of soil, installation depth, shaft or initial and final starting pit needs to be made as economical as possible so that it fits the installation location in the field, so that work operational costs and safety, Occupational health can be achieved well.

Keywords: ATN, EPB, project, pipe.

PENDAHULUAN

Dalam dunia konstruksi untuk pekerjaan bor horizontal telah menjadi salah satu metode konstruksi yang populer dalam beberapa dekade terakhir, terutama dalam pembangunan infrastruktur seperti : Jalan Tol yang menggunakan terowongan, Jaringan air limbah dengan sistem bor horizontal, pemasangan pipa jacking dan kabel listrik bawah tanah serta pemasangan jaringan air bersih dan air baku dengan sistem bor horizontal.

Dua metode bor horizontal yang umum digunakan adalah *Auger Tunnel Navigation* (ATN) dan *Earth Pressure Balance* (EPB). Kedua metode tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu dipahami. Permasalahan dalam kajian ini adalah :

1. Apa kelebihan dan kekurangan metode ATN dan EPB dalam pekerjaan bor horizontal?
2. Bagaimana perbedaan metode ATN dan EPB dalam hal efisiensi biaya dan keselamatan?
3. Apa faktor-faktor yang mempengaruhi pemilihan metode ATN dan EPB ini?

Dengan menjawab masalah masalah ini nantinya diharapkan kajian ini menjadi acuan bagi praktisi dilapangan.

METODE PENELITIAN

Terowongan secara umum adalah sebuah tembusan di bawah permukaan tanah atau gunung. Terowongan umumnya tertutup di seluruh sisi kecuali di kedua ujungnya yang terbuka pada lingkaran luar (Asiyanto,2012).

1. Terowongan Pengelak (*Diversion Tunnel*)

Terowongan pengelak adalah jenis terowongan bawah tanah yang di gunakan untuk mengalihkan air atau cairan lain dari satu area ke area lainnya

2. Macam – macam Bentuk Terowongan

Terdapat empat macam bentuk terowongan yang sering di gunakan dalam infrastruktur di berbagai dunia, (Alamysah, 2019) yaitu:

- a) Terowongan Lingkaran

Terowongan bentuk ini cocok saluran atau terowongan air.

- b) Terowongan kapal kuda

Terowongan bentuk ini cocok di bangun pada lapisan tanah berjenis tanah lunak lebih cocok untuk terowongan kereta api.

- c) Terowongan berbentuk huruf “D”

Terowongan bentuk ini cocok untuk kereta bawah tanah (*sub-ways*) dan terowongan navigasi.

Metode Auger Tunnel Navigation (ATN).

Auger Tunnel Navidation (ATN) adalah teknik pembuatan terowongan berdiameter kecil yang menggunakan metode penggalian mekanis biasanya menggunakan *screw*/ulir sebagai media *transport* material hasil galian dan menggunakan pemandu (*Pilot*) sebagai jalur yang akan dilewati pipa atau utilitas lain yang masukkan kedalam tanah di belakang mesin penggali tsb dengan metode jacking.



Gambar 1. Alat Auger Tunnel Navigation Boring
Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023

Metode Auger Tunnel Navigation Boring dapat dilakukan untuk instalasi pipa jenis Reinforce Concrete Pipe (RCP) , Baja (Steel). Polymer (PCP), Vetrified Clay(VCP) dan PVC Jacking pipe, diameter 100 mm hingga 600 mm.



Gambar 2. Vetrified Clay (VCP)
Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023



Gambar 3. RCP Standard Type FJ Class 2
Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023



Gambar 4. RCP Type Jacking
Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023



Gambar 5. Polymer concrete Pipe (PCP)
Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023

Tabel 1. kuat tekan pipa Jacking

Reinforced concrete jacking pipe shall have the following external strengths:				
Nominal Diameter (mm)	Crushing Load (kNm)		Breaking Load (kNm)	
	Class 1	Class 2	Class 1	Class 2
450	42.2	84.4	63.8	127
600	46.61	62.2	60.7	138
800	35.4	70.7	57.9	106
1000	41.2	82.4	71	123
1250	44.2	88.3	86.3	133

Sumber : JSDP DKI Zona 5

Perbedaan metode *Auger Tunnel Navigation* (ATN) adalah pada metode ini pipa langsung dipasang dibelakang mesin bor secara terus menerus/berkelanjutan sebagai *casing*/penahan pada tanah galian sehingga meminimalisir potensi keruntuhan tanah pada dinding terowongan akibat tanpa penahan.

Metode *trenchless* memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya pilihan unggul dalam pekerjaan pemasangan pipa bawah tanah, terutama di area padat atau sensitif terhadap gangguan lingkungan. Salah satu keunggulan utamanya adalah pengurangan aktivitas penggalian dan pemindahan tanah secara signifikan, sehingga dampak negatif terhadap lingkungan dapat diminimalkan. Selain itu, metode *Guided Auger Boring* (GAB) memungkinkan pelaksanaan pekerjaan dengan gangguan lalu lintas yang minimal serta dampak yang rendah terhadap fasilitas umum, khususnya di jalan yang memiliki ruang terbatas.

Dibandingkan dengan metode *trenchless* lainnya seperti *microtunneling*, GAB memiliki keunggulan dalam pemasangan pipa berukuran kecil yang kurang efektif jika menggunakan metode lain. Peralatan yang digunakan dalam *Guided Auger Boring* juga relatif lebih ringkas dan tidak sebanyak peralatan yang dibutuhkan pada metode *microtunneling*, sehingga lebih efisien dalam hal ruang dan logistik. Keunggulan lainnya adalah metode ini tidak bergantung pada kondisi cuaca, yang menjadikannya lebih andal serta efektif dalam hal waktu dan biaya pelaksanaan.

Dari sisi teknis, *Guided Auger Boring* menawarkan akurasi tinggi dalam menentukan posisi jalur pipa. Hal ini dimungkinkan karena penggunaan sistem panduan laser pada tahap *piloting*, yang memungkinkan koreksi berulang apabila jalur pengeboran belum sesuai dengan desain. Dengan toleransi yang sangat ketat, metode ini memastikan ketepatan instalasi pipa sesuai spesifikasi yang direncanakan.

Salah satu alat utama dalam metode *trenchless*, khususnya pada metode *Auger Tunnel Navigation* (ATN), adalah mesin bor horizontal directional, atau yang lebih dikenal dengan istilah *Horizontal Directional Drilling* (HDD). Mesin ini berfungsi untuk melakukan pengeboran terarah secara horizontal, memungkinkan pembuatan jalur bawah tanah tanpa perlu melakukan penggalian terbuka secara menyeluruh. Baik pada metode ATN maupun *Earth Pressure Balance* (EPB), mesin ini umumnya diaplikasikan dalam proyek pemasangan pipa air, gas, listrik, serta kabel fiber optik.

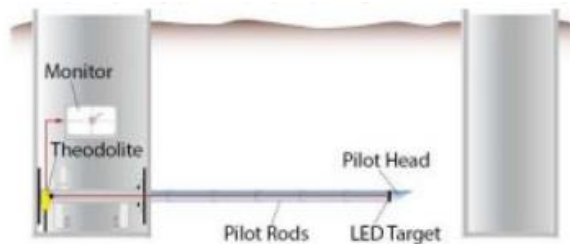
Cara kerja mesin bor pada metode ATN dan EPB menggunakan sistem hidrolik untuk mendorong dan menarik mata bor, serta dilengkapi sistem kendali yang memungkinkan arah pengeboran disesuaikan dengan jalur yang direncanakan. Dibandingkan metode pengeboran konvensional, metode ini memiliki berbagai keunggulan, antara lain: dampak lingkungan yang minimal, pengerjaan yang lebih cepat dan efisien, serta kemampuan untuk menembus rintangan seperti sungai, jalan raya, bangunan, dan bukit.

Dari segi struktur, mesin ATN dan EPB terdiri dari beberapa komponen utama seperti rig bor dengan sistem hidrolik dan *crawler*, motor pendorong dan pemutar, tiang bor yang sudutnya dapat disesuaikan, mata bor dengan berbagai ukuran dan jenis, serta pompa lumpur yang digunakan untuk mendukung proses pengeboran dan pelapisan pipa. Berdasarkan kapasitasnya, mesin-mesin ini diklasifikasikan dalam kategori HDD, mulai dari mini HDD, small HDD, medium HDD, hingga large HDD. Pemilihan mata bor juga menjadi faktor krusial dalam proses pengeboran. Mata bor harus disesuaikan dengan kondisi tanah agar efektivitas dan efisiensi pekerjaan tetap terjaga.

Dengan mempertimbangkan keunggulan, aplikasi, serta teknologi mesin yang digunakan, metode ATN dan EPB merupakan pilihan strategis dalam proyek-proyek infrastruktur bawah tanah, terutama ketika efisiensi ruang, waktu, dan biaya menjadi prioritas utama.

Penggalian lubang memiliki tiga proses utama :

1. *Piloting* – Dimana saat pekerjaan ini, dengan dipandu dengan pemandu laser dan suar LED yang ditempatkan di *pilot head* terdepan dilakukan pemasangan *drill rod* di sepanjang jalur pipa yang akan dipasang.



Gambar 6. Step 1 piloting Auger Head sesuai LED Target

Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023

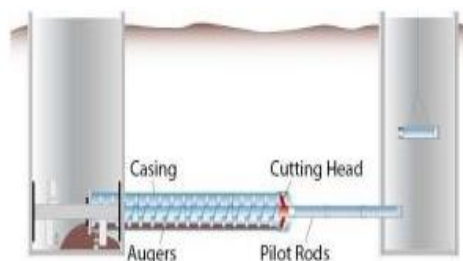
Selama pemasangan secara kontiniu memantau arah pilot head agar selalu sesuai dengan garis arah maupun elevasi. Jika pada suatu waktu pilot head melenceng dari arah yang telah ditentukan, operator dapat menarik kembali beberapa atau seluruh drill rod untuk dilakukan pengulangan/perbaikan. Alat laser secara berkala diperiksa agar selalu menunjukkan arah yang benar.



Gambar 7. Monitoring Arah Piloting sesuai LED Target

Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023

2. Setelah Pilot head telah sampai/tiba di pit kedatangan maka di bagian drill rod paling belakang disiapkan konektor pembesar untuk selanjutnya dilakukan pemasangan srew auger casing mendorong drill rod yang ada didepannya. Di pit penerima drill rod dilepaskan satu per satu dan disimpan untuk digunakan bentang selanjutnya.

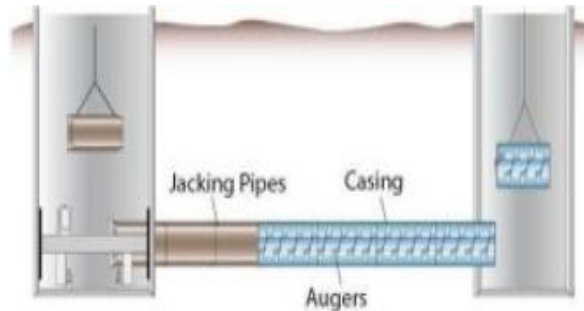


Gambar 8. Step 2 Cutting head Arah Piloting sesuai LED Target

Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023

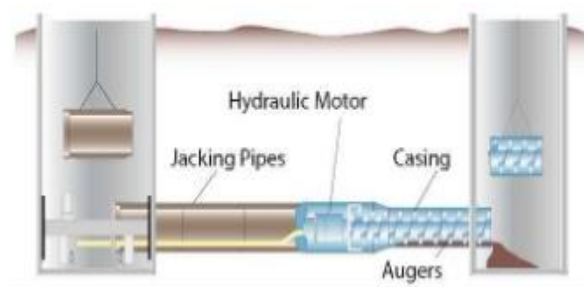
3. Setelah seluruh *screw auger* telah sampai/tiba di pit kedatangan dan terpasang di sepanjang bentangan maka ada 2 opsi pekerjaan:

Jika pipa produk yang akan dipasang lebih kecil atau sama besar dengan *casing screw auger* maka di bagian paling belakang *casing auger* tersebut disiapkan konektor dengan pipa produk untuk selanjutnya dilakukan pendorongan /jacking pipa produk langsung dibelakang *casing auger*. Sambil mendorong pipa produk, di pit penerima dilakukan pembongkaran *casing auger* dan di siapkan untuk lokasi berikutnya.



Gambar 9. Step 3 Instalasi Produk Pipa
Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023

Jika pipa produk yang akan dipasang lebih besar dengan *casing screw auger* maka di bagian paling belakang *casing auger* tersebut disiapkan konektor dengan mesin *cutterhead* untuk selanjutnya dilakukan pendorongan/jacking pipa produk langsung dibelakang mesin/cutterhead.



Gambar 10. Instalasi Cutter Head Produk Pipa
Sumber : mtrenchless.co.id PT Maranti Abadi 2023

Cutterhead tersebut ukurannya sesuai dengan pipa yang akan dipasang. Didalam *cutterhead* tersebut terdapat motor pemutar mekanis yang digerakkan dengan sistem Hidrolik. Material tanah yang masuk kedalam chamber/ruang didalam *cutterhead* tersebut akan ditransport ke bagian depan/pit penerima gerusan tanah. Sambil mendorong pipa produk, di pit penerima tanah yang keluar melalui media ulir tersebut ditampung didalam bak/buket yang secara berkala diangkat keatas pit dan dibuang ketempat yang telah ditentukan.

Untuk menghitung kuat dorong alat bor horizontal dengan metode ATN melibatkan beberapa konsep dan rumus yang terkait dengan mekanik tanah dan desain alat bor. Beberapa Langkah yang bisa di ikuti sebagai berikut :

1. Menentukan parameter tanah.

Parameter tanah yang perlu di tentukan termasuk jenis tanah, kuat geser tanah dan tekanan tanah lateral.

2. Menghitung tekanan tanah
Tekanan tanah dapat di hitung menggunakan rumus seperti teori Rankine atau Coulomb.
3. Menghitung gaya geser
Gaya geser dapat di hitung menggunakan rumus yang terkait dengan kuat geser tanah dan luas permukaan alat bor.
4. Menghitung kuat dorong
Kuat dorong dapat di hitung menggunakan rumus yang terkait dengan gaya geser, tekanan tanah dan desain alat bor.

Beberapa rumus yang dapat di gunakan dengan kajian teori Metode *Auger Tunnel Navigation* (ATN) dan metode *Earth Pressure Balance* (EPB) adalah :

$$\text{Tekanan tanah Lateral} \quad \sigma_h = k \times \sigma_v \dots\dots\dots 1)$$

Dimana : σ_h = Tekanan tanah lateral.

k = Koefisien tekanan tanah lateral.

σ_v = Tekanan tanah vertical.

$$\text{Gaya geser} \quad F = \tau \times A \dots\dots\dots 2)$$

Dimana F = Gaya Geser.

τ = Kuat geser tanah

A = Luas permukaan alat bor

$$\text{Kuat Dorong} \quad P = F + \sigma_h \times A \dots\dots\dots 3)$$

Dimana P = Kuat dorong

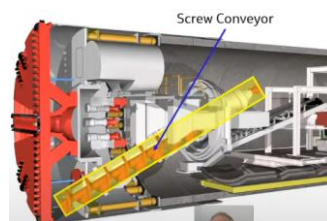
F = gaya geser

σ_h = Tekanan tanah lateral.

A = Luas permukaan alat bor.

Metode *Earth Pressure Balance* (EPB)

Metode *Earth Pressure Balance* (EPB) adalah **metode terowongan mekanis** di mana bahan yang digali digunakan untuk menopang permukaan terowongan saat sedang diplastisasi (kemampuan butir tanah halus untuk mengalami perubahan bentuk tanpa terjadi perubahan volume/pecah) menggunakan busa/bubur semen (*slurry* adalah campuran yang bersifat plastis, dimana terdiri dari semen Portland dan air yang di pompakan ke dalam lubang sumur / terowongan untuk menyemen pipa selubung dan merupakan sekat untuk mencegah migrasi fluida antar formasi) & aditif lainnya agar dapat diangkut dan kedap air.



Gambar 11. Cutter Head Earth Pressure Balance (EPB)

Sumber : PT Indodrill Pondasi Machinery 2023

Pada *Earth Pressure Balance* (EPB) dimana konveyor skrup mengatur laju ekstraksi bahan yang tidak terpakai tujuannya adalah untuk menyeimbangkan penggalian dan ekstraksi, kondisioner ditambahkan ke dalam adonan untuk mencapai konsistensi yang tepat. *Earth Pressure Balance* (EPB) merupakan salah satu metode pengeboran terowongan yang menggunakan *Tunnel Boring Machine* (TBM) dan dirancang khusus untuk menjaga kestabilan tanah selama proses penggalian berlangsung.

Prinsip utama dari metode ini adalah menciptakan keseimbangan tekanan antara tekanan tanah di dalam ruang galian dengan tekanan tanah di sekitarnya, sehingga dapat mencegah keruntuhan dinding terowongan dan meminimalkan gangguan terhadap permukaan tanah di atasnya. Dalam prosesnya, material hasil galian akan diolah. Misalnya dengan penambahan bahan seperti busa atau polimer, sehingga menjadi material penyangga yang lentur dan plastis. Material ini akan memenuhi ruang galian di belakang cutterhead dan bertindak sebagai penahan tekanan tanah hingga dinding terowongan cukup stabil. Metode EPB sangat cocok digunakan pada kondisi tanah lunak, tanah jenuh air, atau tanah dengan muka air tanah yang tinggi, yang umumnya sulit ditangani dengan metode konvensional.

Penggunaan metode EPB menawarkan sejumlah keuntungan, antara lain kecepatan penggalian yang tinggi, akurasi dan presisi dalam pembentukan jalur terowongan, minimnya risiko penurunan permukaan tanah (*ground settlement*), serta kemampuan beradaptasi terhadap berbagai jenis kondisi tanah. Untuk mendukung efektivitasnya, sistem EPB dilengkapi dengan beberapa komponen penting. Di antaranya adalah cutterhead atau kepala pemotong yang dirancang sesuai karakteristik tanah proyek dan dilengkapi dengan alat pemotong seperti *ripper disk*. Selain itu, terdapat conveyor skrup yang berfungsi mengangkut material galian dari ruang pemotong menuju bagian belakang TBM, serta sensor tekanan tanah yang digunakan untuk memantau dan mengontrol tekanan di ruang galian secara real-time, sehingga operator dapat menyesuaikan penggalian dengan kondisi aktual di lapangan.

Dengan teknologi dan sistem kendali yang canggih, metode EPB menjadi salah satu solusi andalan dalam proyek-proyek terowongan modern, khususnya di lingkungan perkotaan yang padat dan memiliki risiko gangguan permukaan yang tinggi. Sistem EPB dikenal luas untuk proyek-proyek berdiameter besar. Kemajuan teknologi telah memungkinkan pembuatan EPB untuk instalasi dongkrak pipa berdiameter lebih kecil, mulai dari 72 inci ke atas, dengan kemampuan tekanan hingga satu bar. Dalam menganalisis penggunaan metode *Auger Tunnel Navigation* (ATN) dan *Earth Pressure Balance* (EPB) untuk pekerjaan bor horizontal, terdapat beberapa aspek utama yang perlu diperhatikan, yakni kelebihan dan kekurangan masing-masing metode, analisis biaya dan waktu pelaksanaan, serta risiko dan aspek keselamatan kerja.

Metode ATN memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas dan kemampuan untuk beroperasi di berbagai kondisi lapangan. Kelebihan ini menjadikan ATN cocok untuk proyek-proyek di area sempit atau dengan akses terbatas. Namun demikian, ATN juga memiliki kekurangan, terutama terkait keterbatasan diameter bor yang dapat digunakan serta ketidakmampuannya dalam mengontrol tekanan tanah secara optimal. Sebaliknya, metode EPB menawarkan keunggulan utama dalam hal pengendalian tekanan tanah

selama proses pengeboran, sehingga mampu mengurangi risiko terjadinya penurunan permukaan tanah (*ground settlement*). Meski demikian, EPB memiliki kelemahan dari sisi biaya operasional yang cenderung lebih tinggi serta kebutuhan akan sistem kontrol yang kompleks dan canggih.

Dari sisi biaya dan waktu, metode ATN umumnya lebih ekonomis dan cepat untuk proyek-proyek kecil hingga menengah. Biaya implementasi ATN relatif rendah dibandingkan dengan EPB, karena tidak memerlukan sistem pengendalian tekanan yang kompleks. Selain itu, waktu pelaksanaan proyek dengan metode ATN juga cenderung lebih singkat. Sementara itu, metode EPB lebih cocok untuk proyek-proyek besar yang memerlukan kestabilan tinggi dan kontrol tekanan tanah yang ketat. Namun, hal ini berimplikasi pada tingginya biaya operasional dan waktu pelaksanaan yang lebih lama, mengingat kompleksitas sistem yang digunakan.

Dalam aspek risiko dan keselamatan kerja, metode ATN memiliki potensi risiko yang lebih tinggi terhadap penurunan tanah dan kerusakan struktur di sekitar area pengeboran. Risiko keselamatannya pun terkait dengan proses pengoperasian alat bor serta penanganan material hasil galian. Sementara itu, metode EPB dinilai memiliki tingkat risiko yang lebih rendah terhadap gangguan struktur sekitar karena sistemnya yang mampu menjaga kestabilan tekanan tanah. Meski demikian, risiko keselamatan dalam metode EPB tetap ada, terutama dalam pengoperasian sistem kontrol dan pengelolaan tekanan tanah yang memerlukan kehati-hatian tinggi. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor di atas, pemilihan antara metode ATN dan EPB harus didasarkan pada kondisi teknis proyek, skala pekerjaan, lingkungan sekitar, serta ketersediaan sumber daya dan peralatan yang memadai.

METODE PENELITIAN

Dalam penerapan metode penelitian ini, digunakan studi literatur dari jurnal Teknik Sipil, manual TBM, dan laporan proyek terkait.

Metode pengumpulan data

Metode pengumpulan data dalam kajian ini meliputi studi literatur, observasi lapangan, dan wawancara dengan praktisi. Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan data sekunder dari sumber-sumber relevan, sementara observasi dan wawancara digunakan untuk memperoleh data primer dari proyek-proyek bor horizontal yang menggunakan metode ATN dan EPB. Seluruh data kemudian dianalisis untuk membandingkan kinerja kedua metode dari aspek teknis, biaya, waktu, serta risiko dan keselamatan kerja, guna mendukung pengambilan keputusan metode yang paling sesuai dengan kondisi proyek.

Rancangan Penelitian:

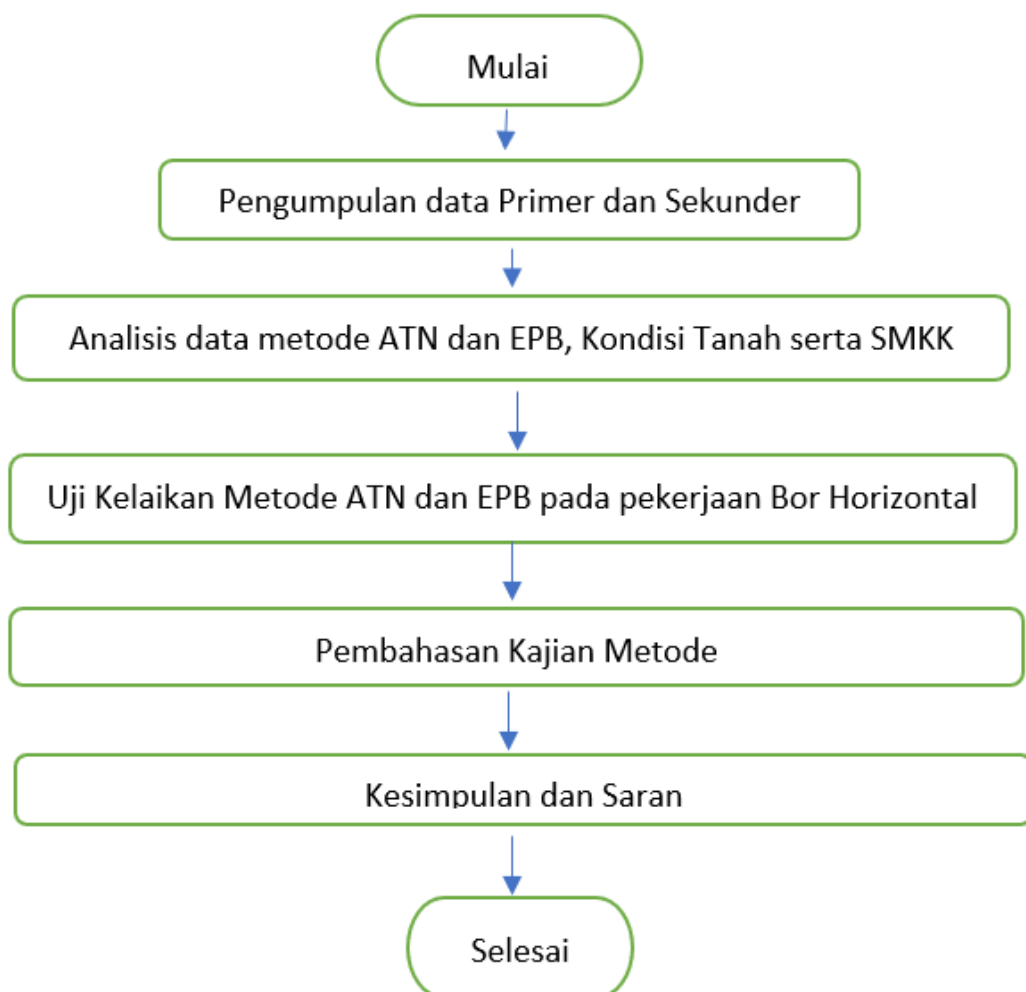
Penelitian ini dilakukan melalui tiga pendekatan utama. Tahap awal menggunakan penelitian eksploratif untuk memahami lebih lanjut mengenai metode *Auger Tunnel Navigation* (ATN) dan *Earth Pressure Balance* (EPB). Selanjutnya, dilakukan penelitian deskriptif untuk menggambarkan karakteristik masing-masing metode. Terakhir, dilakukan penelitian komparatif guna membandingkan kinerja, efisiensi, dan aspek keselamatan dari kedua metode tersebut.

Instrumen Penelitian:

Dalam penelitian ini, pengumpulan data dilakukan melalui data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari observasi lapangan, wawancara dengan ahli dan praktisi, serta kuesioner untuk mendapatkan informasi kuantitatif dan kualitatif terkait metode ATN dan EPB pada bor horizontal. Data sekunder dikumpulkan melalui studi literatur, dokumen proyek, serta database internal dan eksternal yang relevan. Seluruh data kemudian dianalisis menggunakan software khusus untuk memperoleh hasil yang akurat dan sistematis.

Data yang Dikumpulkan:

1. Kinerja Metode: Data tentang kinerja metode ATN dan EPB, seperti waktu pelaksanaan, biaya, dan kualitas hasil pekerjaan.
2. Kondisi Tanah: Data tentang kondisi tanah yang dihadapi dalam pekerjaan bor horizontal, seperti jenis tanah, kekuatan tanah, dan kondisi lainnya.
3. Desain Teknik: Data tentang desain teknis yang digunakan dalam pekerjaan bor horizontal, seperti desain bor, desain penyangga, dan desain lainnya.
4. Keselamatan Kerja: Data tentang keselamatan kerja yang terkait dengan pekerjaan bor horizontal, seperti kecelakaan kerja, cedera dan lainnya.

Flow Chart Kajian :

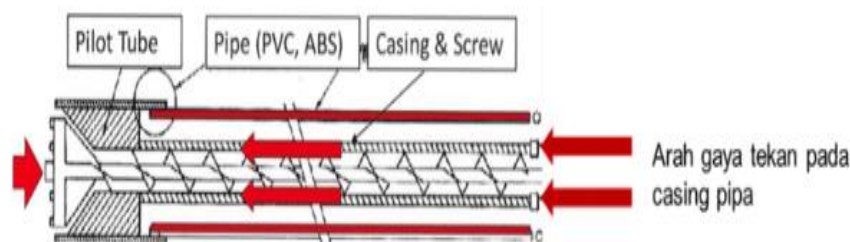
Gambar 12. Flow Chart Kajian Metode ATN dan EPB

Sumber : Penulis 2025

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jakarta menjadi daerah pertama yang melarang penggunaan galian terbuka dalam pemasangan instalasi pipa infrastruktur, hal ini dilakukan untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi dalam pekerjaan. Pemerintah Jakarta memberikan opsi pengganti galian terbuka sebagaimana dituliskan pada Pergub 106 Tahun 2019 Pasal 32 Ayat 3, yaitu:

1. *Boring Horizontal Directional Drilling (HDD)*;
2. *Micro Tunneling/ Pipe Jacking*;
3. Pelaksanaan sistem mesin boring lainnya yang disesuaikan dengan lingkungan;
4. Sistem Jaringan Utilitas Terpadu.



Gambar 13. Pemasangan pipa PVC dengan metode *Auger Tunnel Navigation (ATN)*

Sumber : Rucika 2025

Pipa PVC menghadirkan pipa *Jacking System* yang cocok digunakan pada metode jacking. Pipa PVC *Jacking System* terbuat sesuai dengan standar JSWAS K-6 telah lolos *compressive test* dengan 322.2 kN pada diameter 300 mm. Hal ini tentu sesuai digunakan untuk aplikasi jacking yang memerlukan kekuatan untuk menahan gaya tekan pada aplikasinya.

Tabel 2. Hasil Kuat tekan pipa PVC Type Jacking

Hasil <i>Compressive Test</i>		
Dimensi (mm)	Beban yang Diijinkan (kN)	Beban Uji (kN)
150	62.4	132.74
200	111.6	248.02
250	204.1	245
250	322.2	387

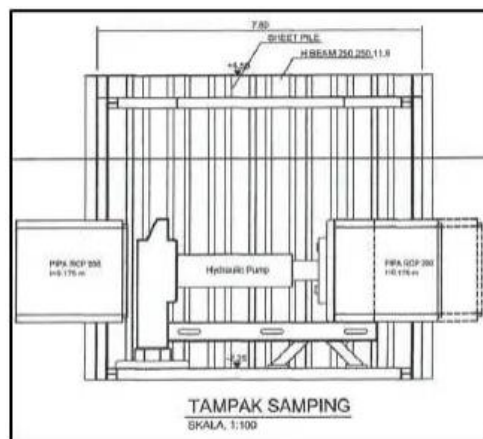
Sumber : Rucika Januari 2025

Pada penggunaan pipa *Reinforce Concrete Pipe (RCP)* karena pipa dengan diameter > dari 400 mm keatas metode bor horizontal diperlukan metode *Earth Pressure Balance (EPB)* pada kerjaan ini di perlukan :

1. Pemilihan mesin alat bor horizontal.
2. Penggunaan pipa yang tepat
3. Perbaikan kondisi tanah
4. Penggunaan Vertikal Shaft yang tepat

Alur pekerjaan bor horizontal harus di perhatikan ketentuannya pada metode Earth Pressure balance (EPB) bahwa :

1. Test tanah pada area pemasangan pipa Jacking
2. Penentuan diameter pipa yang akan di gunakan
3. Menentukan dimensi Shaft dan jumlah Shaft yang akan digunakan (disini menentukan kondisi starterpit dan arrividpit).
4. Menentukan jenis mesin bor horizontal
5. Menentukan Panjang / span pemasangan pipa jacking
6. Menentukan perhitungan daya dorong pipa jacking dan penentuan type pipa jacking
7. Menentukan pekerjaan tanah dan perbaikan tanah di sekitar shaft untuk kestabilan tanah daerah keberangkatan pipa dan ketibaan pipa di area shaft



Gambar 14. Tampak Samping Shdft StarterPit Metode EPB

Sumber : PT Nittoc 2012

Untuk bisa menjawab penggunaan metode ATN dan EPB perlu kita perhatikan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing metode sebagai berikut:

1. Kontrol Auger: Kontrol auger yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan lancar dan aman.
2. Pemilihan Auger: Pemilihan auger yang sesuai dengan kondisi tanah dan jenis material yang akan dibor sangat penting untuk memastikan efisiensi dan keamanan proses pengeboran.
3. Pengawasan Kondisi Tanah: Pengawasan kondisi tanah yang akurat sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan lancar dan aman.
4. Kontrol Kecepatan: Kontrol kecepatan pengeboran yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan lancar dan aman.
5. Penggunaan Teknologi: Penggunaan teknologi yang tepat, seperti sistem kontrol otomatis, dapat membantu meningkatkan efisiensi dan keamanan proses pengeboran.
6. Pengawasan Keselamatan: Pengawasan keselamatan yang ketat sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan aman dan tidak membahayakan pekerja atau lingkungan sekitar.
7. Perencanaan yang Matang: Perencanaan yang matang dan detail sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan lancar dan efisien.

Beberapa hal yang penting untuk metode *Earth Pressure Balance* (EPB) adalah:

1. Kontrol Tekanan Tanah: Kontrol tekanan tanah yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan lancar dan aman.
2. Pengaturan Chamber Pressure: Pengaturan chamber pressure yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa tekanan tanah dapat dikontrol dengan baik.
3. Pemilihan Parameter Pengeboran: Pemilihan parameter pengeboran yang sesuai, seperti kecepatan pengeboran dan tekanan tanah, sangat penting untuk memastikan efisiensi dan keamanan proses pengeboran.
4. Pengawasan Kondisi Tanah: Pengawasan kondisi tanah yang akurat sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan lancar dan aman.
5. Kontrol Sistem Hidrolik: Kontrol sistem hidrolik yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan lancar dan aman.
6. Penggunaan Sensor dan Monitoring: Penggunaan sensor dan monitoring yang tepat dapat membantu memantau kondisi tanah dan tekanan tanah secara real-time.
7. Perencanaan yang Matang: Perencanaan yang matang dan detail sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan lancar dan efisien.
8. Pengawasan Keselamatan: Pengawasan keselamatan yang ketat sangat penting untuk memastikan bahwa proses pengeboran berjalan aman dan tidak membahayakan pekerja atau lingkungan sekitar.

Dengan memperhatikan hal-hal tersebut, metode EPB dapat dijalankan dengan lebih efektif dan efisien di gunakan dilapangan.

Sistem Bor Horizontal yang Efektif:

Dalam pekerjaan bor horizontal untuk proyek jalan tol, terdapat dua metode yang umum digunakan selain ATN dan EPB, yaitu *microtunneling* dan *pipe jacking*. Metode *microtunneling* menggunakan pipa bor kecil yang fleksibel dan sangat efektif untuk membuat terowongan berdiameter kecil, sehingga memiliki karakteristik yang identik dengan metode *Auger Tunnel Navigation* (ATN). Sementara itu, metode *pipe jacking* menggunakan pipa beton atau baja yang didorong menggunakan sistem jacking, dan lebih cocok untuk diameter terowongan yang besar, menyerupai prinsip kerja *Earth Pressure Balance* (EPB).

Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan. *Microtunneling* lebih fleksibel, cocok untuk diameter kecil, dan memiliki biaya operasional yang relatif rendah. Namun, penggunaannya terbatas pada ukuran diameter tertentu dan memerlukan perencanaan yang sangat teliti. Di sisi lain, *pipe jacking* mampu menangani diameter terowongan yang lebih besar dan beban struktural yang tinggi, tetapi membutuhkan peralatan yang lebih besar, kompleks, dan biaya operasional yang lebih tinggi.

Sistem yang Paling Efektif:

Metode bor ATN (*Auger Tunnel Navigation*) adalah salah satu metode bor horizontal yang efektif untuk membuat terowongan dengan diameter yang relatif kecil hingga sedang. Berikut beberapa metode bor horizontal lainnya:

1. ATN (*Auger Tunnel Navigation*): Metode ATN menggunakan auger (bor ulir) untuk

menggali tanah dan membuat terowongan. Metode ini efektif untuk tanah yang lunak hingga sedang keras.

2. *Pipe Jacking*: Metode pipe jacking menggunakan pipa beton atau pipa baja yang dihubungkan dengan sistem jacking untuk membuat terowongan. Metode ini efektif untuk diameter terowongan yang lebih besar.
3. *Microtunneling*: Metode *microtunneling* menggunakan pipa bor yang kecil dan fleksibel untuk membuat terowongan dengan diameter yang relatif kecil. Metode ini efektif untuk tanah yang lunak hingga sedang keras.
4. *Earth Pressure Balance (EPB)*: Metode EPB menggunakan tekanan tanah untuk mengontrol kestabilan terowongan. Metode ini efektif untuk tanah yang lunak hingga sedang keras.
5. *Slurry Shield*: Metode *slurry shield* menggunakan cairan slurry untuk mengontrol kestabilan terowongan. Metode ini efektif untuk tanah yang lunak hingga sedang keras.

ATN (*Auger Tunnel Navigation*)

Metode *Auger Tunnel Navigation* (ATN) bekerja dengan prinsip menggunakan auger atau bor ulir untuk menggali tanah dan membentuk terowongan. Teknologi ini cocok diterapkan pada kondisi tanah yang lunak hingga sedang keras, seperti tanah liat, pasir, dan kerikil. ATN umumnya digunakan untuk membuat terowongan dengan diameter kecil hingga sedang, sehingga cocok untuk proyek-proyek utilitas di area terbatas. Selain itu, kestabilan terowongan dikendalikan melalui sistem auger yang secara kontinu mengangkut material galian keluar, sehingga tekanan di sekitar lubang bor tetap terjaga selama proses pengeboran berlangsung.

EPB (*Earth Pressure Balance*)

Metode *Earth Pressure Balance* (EPB) bekerja dengan memanfaatkan tekanan tanah di ruang galian untuk menjaga kestabilan terowongan selama proses pengeboran. Sistem ini sangat efektif digunakan pada kondisi tanah yang lunak hingga sedang keras, seperti tanah liat, pasir, dan kerikil. Salah satu keunggulan EPB adalah kemampuannya membentuk terowongan dengan diameter yang lebih besar dibandingkan metode lainnya. Dengan mekanisme pengendalian tekanan tanah yang baik, EPB mampu mengurangi risiko penurunan tanah (*ground settlement*), sehingga cocok digunakan di lingkungan padat penduduk atau area sensitif terhadap gangguan struktur permukaan.

Perbedaan utama

1. Metode penggalian: ATN menggunakan auger, sedangkan EPB menggunakan tekanan tanah.
2. Kontrol kestabilan: ATN menggunakan auger, sedangkan EPB menggunakan tekanan tanah.
3. Diameter terowongan: EPB dapat digunakan untuk membuat terowongan dengan diameter yang lebih besar daripada ATN.

Permasalahan yang biasa timbul pada penggunaan metode ATN (*Auger Tunnel Navigation*) dan EPB (*Earth Pressure Balance*) adalah:

ATN (*Auger Tunnel Navigation*)

Metode *Auger Tunnel Navigation* (ATN) memiliki beberapa keterbatasan dan potensi risiko dalam pelaksanaannya. Salah satu kendala utama adalah kemungkinan kerusakan pada *auger* apabila alat mengenai batu atau material keras lainnya di dalam tanah. Selain itu, kestabilan terowongan bisa terganggu jika *auger* tidak mampu mengontrol tekanan tanah secara optimal, yang juga dapat memicu penurunan permukaan tanah di sekitar area pengeboran. ATN juga memiliki keterbatasan dalam ukuran diameter terowongan, sehingga hanya cocok untuk proyek-proyek dengan kebutuhan dimensi kecil hingga sedang.

EPB (*Earth Pressure Balance*)

Meskipun metode *Earth Pressure Balance* (EPB) memiliki banyak keunggulan, terdapat beberapa keterbatasan dan potensi risiko dalam penerapannya. Salah satu tantangan utama adalah kehilangan tekanan tanah yang dapat terjadi jika sistem tidak terkontrol dengan baik, sehingga berisiko menyebabkan penurunan tanah. Selain itu, kerusakan peralatan bisa terjadi apabila mesin tidak dioperasikan secara tepat dan sesuai prosedur. EPB juga memiliki keterbatasan dalam kondisi tanah ekstrem, di mana metode ini kurang efektif untuk tanah yang terlalu keras atau sangat lunak. Pengendalian tekanan yang tidak optimal pun dapat menimbulkan masalah pada kestabilan terowongan, yang berdampak pada keselamatan dan keberhasilan konstruksi.

Permasalahan umum

Permasalahan teknis dalam pelaksanaan bor horizontal dapat menimbulkan berbagai dampak yang merugikan. Salah satu dampak utamanya adalah keterlambatan proyek, terutama jika terjadi kerusakan alat atau hambatan di lapangan yang memerlukan penanganan khusus. Selain itu, kendala teknis juga berpotensi menimbulkan biaya tambahan, baik untuk perbaikan peralatan maupun perawatan sistem yang terganggu. Tidak kalah penting, permasalahan teknis dapat berdampak pada keselamatan kerja, karena gangguan pada sistem pengeboran atau kestabilan tanah dapat meningkatkan risiko kecelakaan di lapangan.

Efisiensi Biaya:

Dari segi efisiensi biaya, metode ATN lebih unggul untuk proyek-proyek kecil hingga menengah. Hal ini disebabkan oleh biaya operasional yang lebih rendah serta kemampuannya beroperasi pada berbagai kondisi tanah tanpa memerlukan sistem kontrol yang kompleks. Sebaliknya, metode EPB cenderung lebih efisien untuk proyek berskala besar, karena kemampuannya dalam mengontrol tekanan tanah dan mengurangi risiko penurunan tanah, yang secara tidak langsung dapat menekan biaya perbaikan dan perawatan pada struktur di sekitarnya.

Keselamatan Kerja:

Dari aspek keselamatan kerja, baik metode ATN maupun EPB memiliki risiko yang perlu dikelola secara cermat. Pada metode ATN, risiko utama terkait operasi *auger* dan penanganan material galian dapat diminimalkan melalui pengawasan ketat dan pelatihan pekerja sesuai standar keselamatan. Sementara metode EPB menghadirkan risiko lebih kompleks, terutama terkait tekanan tanah dan pengoperasian sistem hidrolik, sehingga selain pengawasan dan pelatihan, penerapan sistem keamanan teknologi tinggi menjadi

penting. Dalam konteks ini, Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMKK) berperan krusial; ATN memerlukan SMKK untuk mengontrol risiko operasional alat dan material, sedangkan EPB menuntut SMKK yang lebih kompleks untuk mengelola tekanan tanah dan sistem hidrolik. Dengan penerapan SMKK yang efektif, potensi kecelakaan kerja dapat diminimalkan pada kedua metode.

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Pemilihan Metode:

1. Kondisi Tanah: Jenis tanah, kekuatan tanah, dan kondisi tanah lainnya dapat mempengaruhi pemilihan metode.
2. Diameter Pipa: Diameter pipa yang akan dipasang dapat mempengaruhi pemilihan metode. ATN lebih cocok untuk pipa dengan diameter kecil hingga menengah, sedangkan EPB dapat digunakan untuk pipa dengan diameter besar.
3. Kedalaman Pengeboran: Kedalaman pengeboran dapat mempengaruhi pemilihan metode. ATN lebih cocok untuk pengeboran dangkal hingga menengah, sedangkan EPB dapat digunakan untuk pengeboran yang lebih dalam.
4. Kecepatan Pengeboran: Kecepatan pengeboran yang dibutuhkan dapat mempengaruhi pemilihan metode. ATN dapat digunakan untuk pengeboran yang lebih cepat, sedangkan EPB dapat digunakan untuk pengeboran yang lebih lambat namun lebih akurat.
5. Biaya: Biaya operasional dan investasi dapat mempengaruhi pemilihan metode.

Pengalaman dan Pengetahuan:

Pengalaman dan pengetahuan praktisi lapangan sangat menentukan pemilihan metode bor horizontal yang tepat antara ATN dan EPB. Praktisi berpengalaman dapat menyesuaikan metode dengan kondisi teknis yang pernah mereka hadapi, sementara pemahaman terhadap karakteristik tanah dan geologi lokasi proyek membantu memilih metode yang paling efektif dan aman. Dengan demikian, risiko kesalahan teknis dapat dikurangi sekaligus efisiensi kerja meningkat.

Analisis Kondisi Lapangan:

Dalam memilih metode bor horizontal, praktisi melakukan analisis kondisi tanah dan risiko. Evaluasi tanah menentukan kelayakan metode ATN atau EPB, sementara analisis risiko mengidentifikasi potensi bahaya, sehingga keputusan mempertimbangkan efisiensi, keselamatan, dan keberlanjutan proyek.

Kriteria Pemilihan Metode:

Dalam memilih metode bor horizontal, praktisi mempertimbangkan efisiensi biaya, kecepatan pengeboran, dan dampak lingkungan. Tujuannya agar proyek berjalan sesuai anggaran, selesai tepat waktu, dan tetap ramah lingkungan untuk mendukung pembangunan berkelanjutan.

Konsekuensi Teknis:

Metode ATN memiliki risiko teknis terkait pengendalian tekanan tanah. Jika tekanan tidak terkendali, dapat terjadi penurunan tanah mendadak dan kerusakan yang lebih besar dibanding metode EPB, termasuk potensi kerusakan pipa akibat pergeseran tanah selama atau setelah pengeboran.

Konsekuensi Biaya:

Pemilihan metode ATN yang kurang tepat dapat menimbulkan biaya tambahan akibat perbaikan atau penggantian peralatan, serta menyebabkan keterlambatan proyek yang berdampak pada anggaran dan reputasi tim pelaksana.

Konsekuensi Keselamatan:

Pemilihan metode ATN yang tidak tepat dapat meningkatkan risiko kecelakaan dan cedera pekerja, sekaligus menimbulkan kerusakan fasilitas. Kesalahan ini berdampak langsung pada keselamatan, kesehatan, dan produktivitas tenaga kerja, sehingga pemilihan metode harus dilakukan dengan cermat untuk meminimalkan risiko.

Tindakan Korektif:

Untuk mengatasi kesalahan pemilihan metode, proyek perlu dihentikan sementara guna evaluasi dan beralih ke metode EPB yang lebih aman. Pengawasan ketat juga penting agar metode ini dijalankan dengan tepat dan efektif.

Sanksi Administratif:

Kesalahan dalam pemilihan metode pengeboran dapat memicu sanksi administratif, seperti penghentian proyek, denda, hingga pencabutan izin. Karena itu, kepatuhan terhadap prosedur dan standar teknis sangat penting untuk menghindari dampak yang merugikan.

Sanksi Hukum:

Kesalahan dalam memilih metode pengeboran dapat menimbulkan gugatan hukum dan tuntutan ganti rugi dari pihak yang dirugikan. Selain kerugian finansial, hal ini juga dapat merusak reputasi pihak yang bertanggung jawab.

Sanksi Lingkungan:

Kesalahan dalam memilih metode pengeboran dapat menimbulkan dampak lingkungan yang serius. Sebagai sanksi, pihak yang bertanggung jawab dapat diwajibkan melakukan pembersihan area terdampak serta mengembalikan kondisi lingkungan seperti semula.

KESIMPULAN

Metode Auger Tunnel Navigation (ATN) dan Earth Pressure Balance (EPB) merupakan dua teknik pengeboran horizontal yang memiliki karakteristik, kelebihan, dan kekurangan masing-masing. Metode ATN mengandalkan pilot point auger sebagai pengarah untuk mencapai sasaran dan tujuan pengeboran. Kelebihan dari metode ini adalah efektivitasnya dalam digunakan di lokasi yang sempit dan terbatas. Namun, metode ATN memiliki keterbatasan dalam hal kapasitas diameter pipa yang dapat digunakan serta kesulitan untuk diaplikasikan pada tanah yang keras. Sementara itu, metode EPB menggunakan *cutter head* berukuran besar yang langsung mengebor tanah keras. Material hasil pengeboran akan dialirkan melalui sistem *slurry*, yaitu dengan mencairkan tanah untuk memudahkan transportasi ke bak penampungan.

Dari segi efisiensi biaya dan keselamatan kerja, metode ATN cenderung lebih ekonomis dan memiliki risiko kerja yang lebih rendah. Hal ini membuat metode ATN lebih banyak dipilih untuk proyek dengan keterbatasan anggaran maupun lokasi yang tidak ekstrem. Sebaliknya, metode EPB memerlukan sistem yang lebih kompleks dan mahal dalam operasionalnya. Selain itu, EPB memiliki tingkat risiko yang lebih tinggi dari sisi keselamatan dan kesehatan kerja (SMKK), terutama karena metode ini umumnya digunakan pada pengeboran di kedalaman ekstrem, minimal mencapai 7 meter.

Penggunaan kedua metode ini dipengaruhi oleh sejumlah faktor penting, antara lain kondisi tanah, diameter dan jenis pipa yang digunakan, kedalaman serta kecepatan pengeboran, waktu pengerjaan, besarnya pembiayaan operasional, kondisi lingkungan, aspek keselamatan kerja, serta ketersediaan peralatan. Oleh karena itu, pemilihan metode yang tepat harus mempertimbangkan seluruh aspek tersebut untuk memastikan kelancaran dan keberhasilan proses pengeboran.

SARAN

Kelebihan dan kekurangan dari metode Auger Tunnel Navigation (ATN) dan Earth Pressure Balance (EPB) perlu diidentifikasi secara menyeluruh agar penggunaannya dapat disesuaikan secara tepat dengan fokus dan tujuan dari suatu pekerjaan. Pemilihan metode yang sesuai sangat penting untuk memastikan bahwa sasaran proyek dapat tercapai secara efektif dan efisien. Perbedaan karakteristik antara metode ATN dan EPB juga memberikan alternatif yang bernilai bagi para praktisi di lapangan. Keberagaman pilihan ini merupakan keunggulan yang harus dijaga dengan baik, karena pemilihan metode yang tidak tepat dapat berdampak pada pembengkakan biaya serta peningkatan risiko terhadap keselamatan kerja.

Lebih lanjut, pemilihan metode yang tepat sangat dipengaruhi oleh pengalaman dan pengetahuan teknis yang dimiliki oleh pelaksana di lapangan. Ketepatan dalam memahami kondisi dan kebutuhan proyek akan membantu meminimalkan berbagai faktor penyebab kegagalan atau kendala teknis yang mungkin terjadi. Oleh karena itu, pemahaman yang presisi serta pertimbangan yang matang sangat diperlukan dalam menentukan metode pengeboran yang akan digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Asiyanto, 2012. **Metode Konstruksi Terowongan**. Univesity Indonesia Press, Jakarta.
- ASME. 2008. ASME B31.3-2008 (Revision of ASME B31.3-2006), *Process Piping*, ASME Code for *Pressure Piping*, *The American Society of Mechanical Engineer*, U.S.A.
- ASME. 2008. ASME B31.4-2008 (Revision of ASME B31.4-2006), *Sistem Transportasi Pipeline Untuk Cairan Hidrokarbon dan Liquid Lainnya*, *The American Society of Mechanical Engineer*, U.S.A.
- CAPP. 2004 *Planing Horizontal Directional Drilling For Pipeline Construction. Canada. Publication* September 2004.
- Chapman, D. (2017). *Tunnelling Techniques and Innovations*. CRC Press.
- David A. Willoughby, 2005, *Horizontal Directional Drilling. Utility and Pipeline Application*. API. 2008. API 1104-2008 (Revision of API 1104-2006), *Process Piping*, API Untuk Pengelasan Pipeline dan Fasilitas Terkait. *The American Petroleum Institut*, U.S.A.
- Dipohusodo, Istimawan. 1996. **Manajemen Proyek dan Konstruksi**-Jilid 1. Yogyakarta. Kanisius.<https://id.scribd.com/presentation/366509452/Presentasi-Metode-NATM-Dan-Metode-Klasik>
- ITA-AITES (2020). *Guidelines for Mechanized Tunnelling. International Tunnelling Association*.
- Kementrian Pekerjaan Umum, 2012. **Struktur Terowongan dan Manajemen konstruksinya**. Kementrian Pekerjaan Umum, Tasikmalaya.
- Lock, Dennis. 1994. **Manajemen Proyek** (Penerjemah. Ir. E. Jasfi, M.Sc.). Jakarta. :Erlangga.
- Pambudi, L. R., & Ichsandi, M. (2017). *Metode Pelaksanaan Pembangunan Terowongan Pengelak (Tunnel) Pada Proyek Waduk Bendung Ponorogo* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Robbins Company (2019). TBM EPB Technology Overview.
- Sukirman, D. (2022). “Analisis Pemilihan Metode Bor Horizontal pada Proyek Utilitas.” *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, 10(2), 55–65.
- 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.
- Yogaswara, D. (2019). Analisis Terowongan Jalan Raya Dengan Proteksi Umbrella Grouting Menggunakan Metode Elemen Hingga 2D Kasus Studi Tol Cisumdawu. *Jurnal Sains dan Teknologi ISTP*, 11(2), 137-147.