

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka Relevan

Menurut Patel & Pandit (2017) dalam penelitiannya “*Productivity Studies of Tunneling Projects*,” penelitian tersebut meninjau faktor-faktor yang memengaruhi produktivitas pekerjaan terowongan, khususnya pada proyek-proyek terowongan di India. Melalui telaah pustaka dan penyusunan daftar faktor, mereka mengidentifikasi 148 faktor yang dikelompokkan ke dalam enam kategori utama, seperti kondisi manajemen, kondisi geologi, kondisi mesin, dan logistik. Penelitian ini menekankan bahwa ketidakjelasan faktor-faktor tersebut berkontribusi pada keterlambatan waktu dan pembengkakan biaya, sehingga pemahaman faktor produktivitas menjadi penting untuk perencanaan dan pengendalian kinerja TBM.

Menurut Patel & Pandit (2018) dalam penelitian yang berjudul “*Assessment of TBM's Performance Parameters*,” dilakukan kajian kinerja TBM pada proyek Delhi Metro dengan menilai produktivitas kerja, efisiensi, dan tingkat utilisasi TBM. Dengan menggunakan metode *Data Envelopment Analysis* (DEA), penelitian ini mengukur pengaruh gangguan (*breakdowns*) dan keterlambatan terhadap penurunan produktivitas, efisiensi, dan utilisasi harian TBM. Hasilnya menunjukkan bahwa gangguan mekanis, kondisi geologi yang tidak menguntungkan, serta manajemen waktu siklus kerja sangat menentukan nilai *advance rate* (AR), *penetration rate* (PR), dan *utilization ratio*, sehingga aspek *downTime* harus diperhitungkan dalam evaluasi kinerja TBM.

Menurut Kurlekar et al. (2018) dalam makalah “*Advance Tunnel Construction Technique ‘Tunnel Boring Machine’*,” TBM diperkenalkan sebagai teknik konstruksi terowongan yang lebih maju dan efisien dibandingkan metode konvensional. Penelitian ini menjelaskan sejarah perkembangan TBM, jenis-jenis TBM seperti *Earth Pressure Balance* (EPB), *slurry/Bentonite shield*, dan *hard rock* TBM, serta menerapkan studi kasus proyek Delhi Metro. Disimpulkan bahwa penggunaan TBM

pada proyek metro perkotaan memberikan peningkatan efisiensi, keselamatan, dan produktivitas konstruksi terowongan, sehingga metode ini dianggap sangat sesuai untuk lingkungan perkotaan yang padat.

Menurut Zhang et al. (2022) dalam penelitian “*Big Data-Based Performance Analysis of Tunnel Boring Machine Tunneling Using Deep Learning*,” *advance rate* diidentifikasi sebagai *Parameter* kunci yang memengaruhi efisiensi penggalian TBM, jadwal proyek, dan biaya konstruksi. Penelitian ini mengusulkan model *deep learning* CNN-Bi-LSTM-Attention yang memanfaatkan data pemantauan TBM berupa kecepatan putar *cutterhead*, *thrust*, torsi, *penetration rate*, dan tekanan tanah pada ruang kerja untuk memprediksi *advance rate*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model *deep learning* tersebut memberikan akurasi prediksi yang lebih baik dibandingkan metode statistik dan *Machine learning* dangkal, sehingga data operasi TBM dapat dimanfaatkan untuk analisis kinerja dan perencanaan penggalian yang lebih tepat.

Menurut Ma et al. (2022) dalam penelitian “*Research on Prediction of TBM Performance of Deep-Buried Tunnel Based on Machine Learning*,” kinerja TBM pada terowongan dalam dianalisis dengan data proyek Hanjiang–Weihe River Diversion. Penelitian ini menggunakan algoritma *random forest* untuk seleksi fitur dan menemukan bahwa *thrust* total, putaran per menit, kuat tekan uniaksial (UCS), dan *volumetric joint count* merupakan faktor utama yang memengaruhi *penetration rate* TBM. Selanjutnya, tiga model prediksi *penetration rate* dibandingkan (*multiple regression*, *back propagation neural network*/BPNN, dan *support vector regression*), dan hasilnya menunjukkan bahwa model BPNN memiliki akurasi dan stabilitas prediksi terbaik.

Menurut Pan et al. (2022) dalam penelitian “*Data-Driven Multi-Output Prediction for TBM Performance During Tunnel Excavation: An Attention-Based Graph Convolutional Network Approach*,” dikembangkan model *deep learning* berbasis *Attention-based graph convolutional network* (att-GCN) untuk memprediksi beberapa indikator kinerja TBM secara simultan sepanjang siklus pemasangan *ring*.

Dengan menggunakan data *monitoring* pada proyek Singapore *Mass Rapid Transit*, model ini dirancang untuk menangkap hubungan waktu dan hubungan antar-segmen penggalian. Hasil studi kasus menunjukkan bahwa pendekatan att-GCN mampu memberikan prediksi kinerja penggalian TBM yang akurat dan membantu memahami perilaku penggalian secara dinamis selama pelaksanaan proyek.

Menurut Abbasi et al. (2024), data *logger* TBM dari proyek terowongan metro digunakan untuk mengevaluasi beberapa algoritma *Machine learning* dalam memprediksi *Parameter* kinerja TBM, khususnya *penetration rate*. Penelitian ini membandingkan model regresi linier berganda, *decision tree*, dan *multilayer perceptron* (MLP) dengan menggunakan data operasi TBM yang terekam secara kontinu. Hasil analisis menunjukkan bahwa model MLP memberikan koefisien determinasi yang lebih tinggi dan galat prediksi yang lebih rendah dibandingkan model lain, sehingga pemanfaatan data *logger* TBM dan *jaringan* saraf tiruan dinilai efektif untuk analisis kinerja penggalian dan pendukung pengambilan keputusan operasi.

Menurut Samadi et al. (2023), penelitian dilakukan untuk memprediksi tekanan muka (*face pressure*) pada mesin *Earth Pressure Balance* (EPB) dengan menggunakan beberapa metode pembelajaran mesin. Data operasi TBM dan kondisi geoteknik digunakan sebagai *Input* untuk membangun dan membandingkan model seperti *multiple linear regression*, *support vector Machine*, dan *artificial neural network*. Studi ini menunjukkan bahwa model berbasis *Machine learning* mampu memberikan estimasi tekanan muka yang cukup akurat, sehingga dapat membantu pengendalian operasi EPB-TBM dan mengurangi risiko ketidakstabilan muka galian serta penurunan permukaan tanah.

Menurut Khoshalan & Torabi (2015), dilakukan analisis *reliability*, *availability*, dan *Maintainability* (RAM) pada TBM tipe *Earth Pressure Balance* berdasarkan data kinerja aktual dari suatu proyek terowongan. Penelitian ini memisahkan subsistem TBM (mekanis, elektrik, hidrolik, dan lain-lain) untuk menilai tingkat keandalan masing-masing dan mengidentifikasi subsistem dengan reliabilitas dan *availability*

terendah. Hasilnya menunjukkan bahwa subsistem mekanis memiliki kontribusi terbesar terhadap gangguan dan *downTime*, sehingga perbaikan strategi pemeliharaan pada subsistem ini sangat penting untuk menjaga waktu operasi efektif dan produktivitas TBM.

Menurut Rashiddel & Dias (2022), penelitian mengenai *face pressure* pada terowongan mekanis EPB membandingkan beberapa metode penentuan tekanan muka aman, antara lain pendekatan numerik berbasis elemen hingga (misalnya FLAC3D) serta metode empiris dan analitis seperti COB dan Leca–Dormieux. Dengan studi kasus pada proyek metro di Tehran, penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan metode perhitungan *face pressure* yang tepat sangat krusial untuk menjaga kestabilan muka galian dan membatasi deformasi permukaan. Hasilnya menegaskan bahwa penentuan tekanan muka yang andal merupakan bagian penting dari pengendalian kinerja dan keamanan operasi TBM di lingkungan tanah lunak perkotaan.

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa kajian produktivitas dan kinerja TBM telah banyak dilakukan dari sisi identifikasi faktor produktivitas, penilaian *Parameter* kinerja (*penetration rate*, *advance rate*, *utilization*), penerapan *Machine learning* untuk memprediksi *penetration rate* dan *advance rate*, analisis keandalan sistem TBM, serta penentuan *face pressure* yang aman. Namun, masih terbatas penelitian yang secara spesifik membandingkan produktivitas rencana dan produktivitas aktual penggalian TBM pada satu segmen terowongan dengan memanfaatkan kombinasi data jadwal rencana proyek (misalnya dari *Detailed Work Programme*) dan data operasi TBM (*ring report*). Penelitian ini diposisikan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menganalisis dan membandingkan produktivitas rencana dan produktivitas aktual penggalian TBM 1 pada pekerjaan *Tunnel* Harmoni–Sawah Besar Proyek MRT Jakarta Fase 2A (CP202). Produktivitas penggalian dihitung secara terpisah untuk setiap fase operasi (*Initial drive*, *Main drive*, dan *arrival*), serta dikaitkan dengan informasi *ring* dan jenis tanah yang dilalui untuk mengidentifikasi fase, rentang *ring*, dan kondisi tanah yang menjadi sumber utama deviasi produktivitas.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Tunnel Boring Machine (TBM)

2.2.1.1 Pengertian Tunnel Boring Machine (TBM)

Tunnel Boring Machine (TBM) merupakan mesin bor terowongan berukuran besar yang digunakan untuk menggali terowongan secara mekanis dan kontinu, dengan cara memotong tanah atau batuan di depan muka terowongan sambil memasang sistem penyangga di belakangnya. Penggunaan TBM banyak diterapkan pada pembangunan terowongan transportasi (jalan, rel, dan metro) karena mampu memberikan kecepatan penggalian yang tinggi dan tingkat keselamatan yang lebih baik dibandingkan metode konvensional seperti *drill and blast* atau *sequential Excavation* (CAMTECH, 2015).

Dalam pengoperasiannya, kinerja TBM umumnya dievaluasi menggunakan *Parameter* keluaran seperti laju maju (*advance rate*) dan laju penetrasi (*penetration rate*), yang dipengaruhi oleh kombinasi kondisi geologi (kekuatan batuan/tanah, tegangan in-situ, kondisi air tanah) dan *Parameter* operasi mesin (gaya dorong, torsi, kecepatan putar *cutterhead*, tekanan muka) (Ma et al., 2022; Pan et al., 2022; Zhang et al., 2022).

Seiring berkembangnya proyek terowongan berskala besar, berbagai penelitian terbaru menekankan bahwa pemahaman hubungan antara kondisi geologi, *Parameter* operasi, dan respons TBM sangat penting untuk mengendalikan produktivitas dan risiko selama penggalian (Abbasi et al., 2024; Samadi et al., 2023).

2.2.1.2 Jenis–Jenis TBM

Berdasarkan cara kerja dan kondisi geologi yang ditangani, TBM dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa tipe. Dokumen teknis *Use of Heavy Machinery in Construction of Metro Railways* menyebutkan bahwa secara umum terdapat lima tipe utama TBM yang

banyak digunakan, yaitu *Main Beam (Open TBM)*, *Single Shield*, *Double Shield*, *Earth Pressure Balance (EPB)*, dan *Slurry-Face TBM* (CAMTECH, 2015).

1. *Main Beam (Open TBM)*

TBM tipe *Main Beam* merupakan TBM terbuka tanpa selubung penuh di sekeliling badan mesin. Tipe ini banyak digunakan pada terowongan batuan dengan kondisi relatif stabil. Keunggulannya adalah akses yang baik ke batuan tepat di belakang *cutterhead* untuk pemasangan penyangga, namun tidak cocok untuk tanah lunak atau kondisi muka galian yang tidak stabil (CAMTECH, 2015).

2. *Single Shield TBM*

Pada TBM *Single Shield*, seluruh badan mesin berada dalam *shield* pelindung, dan gaya dorong direaksikan melalui *ring* segmen beton yang baru dipasang. Tipe ini lazim digunakan pada formasi yang lebih lunak atau patahan, namun penggalian bersifat siklik: saat pemasangan segmen, proses bor harus berhenti (CAMTECH, 2015).

3. *Double Shield TBM*

TBM *Double Shield* menggabungkan TBM gripper dan *shield*. Memungkinkan bor dan pemasangan segmen dilakukan secara bersamaan, sehingga meningkatkan kecepatan pada terowongan batuan. Mesin terlindungi *shield* sehingga batuan sekeliling tetap tertahan hingga *lining* terpasang (CAMTECH, 2015).

4. *Earth Pressure Balance (EPB) TBM*

EPB TBM merupakan tipe TBM tertutup yang sangat umum digunakan pada tanah lunak dan kondisi perkotaan. Pada

EPB, tanah galian di ruang muka dijaga dalam kondisi tertekan sehingga dapat menyeimbangkan tekanan tanah dan air di depan muka galian. Tekanan muka dikendalikan melalui kombinasi gaya dorong dan laju buang tanah via *screw conveyor* (CAMTECH, 2015).

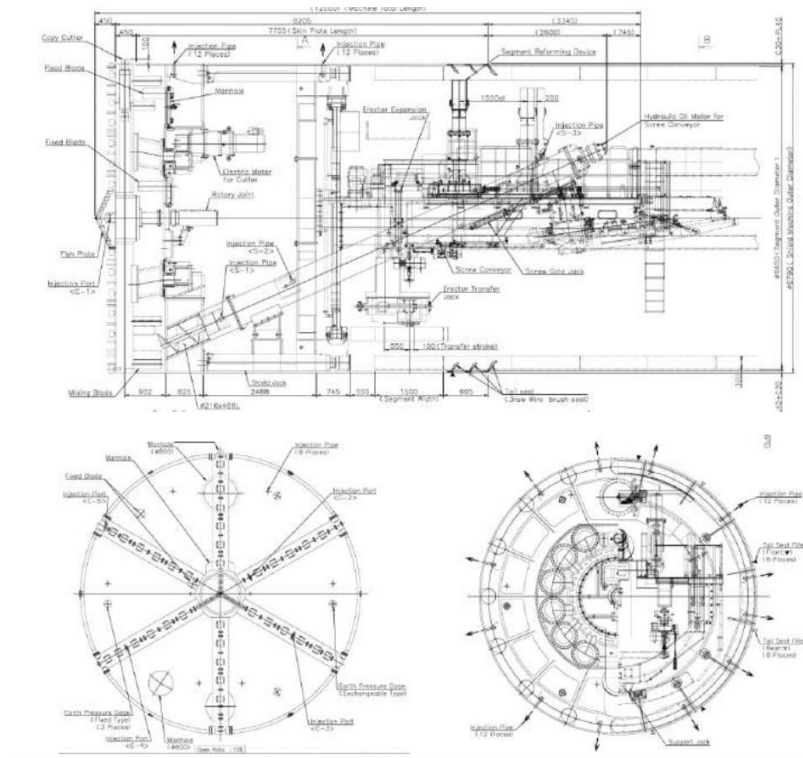
Beberapa penelitian menyatakan bahwa EPB TBM merupakan salah satu metode mekanisasi terowongan yang paling efisien untuk proyek terowongan di kawasan perkotaan, karena mampu memberikan laju penggalian yang tinggi serta tingkat keselamatan yang baik bagi bangunan di permukaan (Rashiddel & Dias, 2022; Samadi et al., 2023).

Pada penelitian ini, TBM yang dianalisis adalah *Tunnel Boring Machine 1* (TBM 1) tipe *Earth Pressure Balance* (EPB) untuk jalur *northbound* pada segmen tunnel Harmoni–Sawah Besar Proyek MRT Jakarta Fase 2A (CP202). Pemilihan fokus pada TBM tipe *EPB* selaras dengan dokumen teknis proyek yang menyatakan bahwa *Earth Pressure Balance (EPB) Machine* merupakan peralatan utama untuk pekerjaan penggalian tunnel pada CP202.



Gambar 2.1 Mesin *Earth Pressure Balance* (EPB)

(Sumber: Dokumen Proyek)



Gambar 2.2 Mesin *Earth Pressure Balance* (EPB)

(Sumber: Dokumen Proyek)

Untuk membantu pembaca memahami kapasitas alat dan keterkaitan parameter operasi yang dianalisis, penelitian ini menyajikan ringkasan spesifikasi utama TBM tipe *EPB* sebagaimana tercantum pada dokumen teknis proyek. Dokumen juga mencantumkan bahwa sistem yang digunakan adalah *EPB TBM* untuk pekerjaan *bored tunnel*. Ringkasan spesifikasi utama ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Spesifikasi TBM

Diameter <i>Shield</i>	
<i>Shield diameter</i>	6790 mm
<i>Shield Overall length</i>	8655 mm
<i>Thrust cylinder</i>	2500 kN x 35 Mpa x 2100 mm x 16 sets
<i>Cutter torque (Normal)</i>	6079.2 kN·m (50 Hz); 3837.1 kN·m (80 Hz)
<i>Rotational speed</i>	0.94–1.50 rpm
<i>Segment erector max handling weight</i>	4.5 ton
<i>Screw conveyor capacity</i>	164.1/92.7 m ³ /h (at 21/33 MPa)
<i>Thrust cylinder speed</i>	55mm/ min (All Operation), 7mm/min (Low Speed)
<i>Power Unit (electric motor)</i>	55kW x 4P X 400 V Qty 1 Set

5. *Slurry-Face* TBM

Slurry TBM juga termasuk TBM tertutup yang menggunakan campuran *slurry* (misalnya bentonit) di ruang muka untuk menahan tekanan tanah dan air, serta mengalirkan material galian melalui sistem pipa tertutup. Tipe ini umumnya digunakan pada tanah sangat permeabel (pasir, kerikil) atau zona bergas, karena sistem *slurry* dan jalur buang tertutup memberikan perlindungan lebih terhadap intrusi gas dan air (CAMTECH, 2015).

Pemilihan antara EPB dan *slurry* TBM biasanya mempertimbangkan jenis tanah dan permeabilitasnya. Dokumen teknis tersebut menegaskan bahwa EPB lebih sesuai untuk tanah berpermeabilitas rendah seperti lempung, sedangkan *slurry* TBM lebih

sesuai untuk tanah berpermeabilitas tinggi seperti pasir dan kerikil (CAMTECH, 2015).

2.2.1.3 Komponen Utama TBM

Secara umum, sebuah TBM terdiri atas beberapa komponen utama sebagai berikut:

1. *Cutterhead*

Merupakan kepala bor berputar yang dilengkapi dengan *cutter* atau *disc cutter* untuk memotong tanah atau batuan di depan muka terowongan. Kecepatan putar dan gaya dorong pada *cutterhead* menjadi *Parameter* operasi penting yang berkaitan langsung dengan laju penetrasi dan laju maju TBM (Ma et al., 2022; Zhang et al., 2022).

2. *Shield*

Pada TBM tipe *shield*, bagian badan mesin dilindungi oleh selubung baja (*shield*) yang berfungsi menahan tanah/batuan di sekeliling terowongan selama proses penggalian serta memberi ruang kerja yang aman untuk pemasangan *lining* segmen beton. TBM tertutup seperti *Earth Pressure Balance* (EPB) dan *slurry shield* menggunakan *shield* untuk menjaga stabilitas muka galian dan dinding terowongan (CAMTECH, 2015).

3. *Thrust System*

Sistem ini terdiri atas silinder hidrolik yang menekan TBM ke arah muka galian. Pada TBM *shield*, gaya dorong biasanya direaksikan melalui *ring lining* beton yang sudah terpasang. Besarnya gaya dorong mempengaruhi kecepatan maju TBM dan interaksi antara *cutterhead* dengan tanah/batuan (Ma et al., 2022)

4. Sistem Pengangkutan Material Galian

Material hasil galian dari ruang muka (*working chamber*) dikeluarkan melalui *screw conveyor*, lalu diteruskan dengan *belt conveyor* atau *muck car* ke belakang TBM. Pada EPB TBM, pengaturan laju putar *screw conveyor* digunakan untuk mengontrol tekanan tanah di muka dan menjaga kestabilan muka galian (CAMTECH, 2015).

5. *Erector* dan Sistem Pemasangan *Lining*

Di belakang *cutterhead*, TBM dilengkapi *Erector* hidrolik untuk mengangkat dan memasang segmen beton pracetak yang membentuk *ring lining* terowongan. Pemasangan *ring* ini biasanya dilakukan secara siklik mengikuti kemajuan galian, sehingga terowongan segera mendapat penyanggaan permanen.

6. *Back-up System*

Merupakan rangkaian gerbong di belakang TBM yang menampung peralatan pendukung, seperti sistem tenaga listrik, *transformer*, unit hidrolik, peralatan ventilasi, tangki grouting, hingga sistem kontrol. Sistem ini memastikan suplai daya dan logistik selama operasi penggalian dalam jangka panjang.

Penjabaran komponen ini penting sebagai dasar untuk memahami *Parameter* operasi yang tercatat dalam *ring report* (misalnya waktu penggalian per *ring*, panjang galian, dan data pendukung lainnya) yang kemudian digunakan dalam analisis produktivitas.

2.2.1.4 Spesifikasi *Ring Lining* Terowongan

Pada pekerjaan terowongan dengan *Tunnel Boring Machine* (TBM), kemajuan pekerjaan umumnya dinyatakan dalam jumlah *ring*

lining yang terpasang. Setiap *ring* merupakan rangkaian segmen beton pracetak yang membentuk lining permanen terowongan. Oleh karena itu, spesifikasi *ring* lining disajikan pada subbab ini untuk memberikan konteks ukuran terowongan yang dianalisis (diameter, ketebalan segmen, dan panjang *ring*), sehingga pembaca dapat memahami skala fisik dari satu unit “*ring*” pada proyek MRT Jakarta Fase 2A. Informasi spesifikasi *ring* ini tidak digunakan sebagai dasar perhitungan *advance rate*, melainkan sebagai deskripsi teknis objek penelitian agar hasil produktivitas (ring/hari) dapat dipahami dan dibandingkan pada proyek terowongan dengan dimensi yang setara.



Gambar 2.3 Contoh *Ring Tunnel*

(Sumber: Proyek MRT)

Tabel 2.2 Spesifikasi *Ring Lining* Terowongan

Parameter	Simbol	Satuan	Nilai/Deskripsi
Diameter dalam terowongan (<i>internal diameter</i>)	D_i	m	6,05
Diameter luar lining (<i>outer diameter</i>)	D_o	m	6,65
Tebal segmen lining	t	m	0,30
Panjang ring (<i>ring width</i>)	l_{ring}	m	1,50

Untuk memberikan gambaran skala pekerjaan pada setiap pemasangan *ring*, dapat dihitung volume tanah/volume galian yang “tergantikan” oleh satu *ring* (volume terowongan per *ring*). Perhitungan ini bertujuan sebagai informasi konteks ukuran terowongan, bukan untuk perhitungan produktivitas.

$$V_{tanah,ring} = \left(\frac{\pi}{4} D_{exc}^2\right) \times l_{ring} \dots\dots\dots (2.1)$$

dengan:

$V_{tanah,ring}$ = volume tanah/galian per *ring* (m³/*ring*),

D_{exc} = diameter galian (*excavation diameter*), dapat mengacu pada diameter *shield*/diameter galian pada dokumen proyek (m),

l_{ring} = panjang *ring* (m).

2.2.1.5 Tahapan Penggalian TBM

Pada proyek–proyek terowongan dengan metode TBM, pekerjaan penggalian umumnya tidak dipandang sebagai satu kesatuan yang homogen, tetapi dibagi ke dalam beberapa tahap operasi sesuai dengan posisi TBM terhadap *shaft* peluncuran (*launching shaft*) maupun *shaft* penerima (*receiving shaft*), serta kondisi teknis di sekitarnya. Pada Proyek MRT Jakarta Fase 2A, khususnya segmen *Tunnel* Harmoni–Sawah Besar (CP202), penggalian TBM dibagi

menjadi tiga tahap utama, yaitu *Initial drive*, *Main drive*, dan *Arriving Drive*. Pembagian tahap ini penting karena karakteristik teknis, risiko, serta produktivitas pada setiap tahap dapat berbeda dan perlu dianalisis secara terpisah.

1. *Initial drive*

Initial drive adalah tahap awal pergerakan TBM dari *launching shaft* setelah proses *assembly* dan *commissioning* selesai. Pada tahap ini, TBM mulai melakukan penggalian dari posisi statis di dalam *shaft* hingga mencapai jarak tertentu dari *shaft* peluncuran. Lingkungan kerja masih sangat dekat dengan struktur *shaft* dan elemen–elemen konstruksi pendukung peluncuran TBM, sehingga:

- Ruang gerak dan *working space* relatif terbatas.
- Proses pengaturan lintasan awal (*alignment*) dan pengecekan sistem masih intensif.
- Siklus kerja (*gali–pasang ring–grouting*) belum sepenuhnya stabil.

Konsekuensinya, produktivitas aktual pada tahap *Initial drive* umumnya lebih rendah dibandingkan tahap utama (*Main drive*), karena sebagian waktu operasi digunakan untuk penyesuaian sistem, pengendalian deformasi di sekitar *shaft*, serta pengujian kinerja peralatan. Dalam penelitian ini, *Initial drive* diperlakukan sebagai satu segmen tersendiri sehingga produktivitas rencana dan aktualnya dapat dibandingkan secara khusus.

2. *Main drive*

Main drive merupakan tahap penggalian utama di mana TBM telah keluar dari zona sekitar *launching shaft* dan bergerak

di sepanjang trase terowongan menuju arah *receiving shaft*.

Pada tahap ini:

- Siklus penggalian dan pemasangan ring sudah berlangsung berulang dan lebih stabil.
- Kondisi operasi cenderung lebih “representatif” untuk kinerja jangka panjang TBM.
- Pengaturan shift kerja dan operasi 24 jam per hari (dengan sistem giliran) biasanya diterapkan penuh untuk mengejar target kemajuan.

Secara kontraktual dan perencanaan, target produktivitas rencana TBM umumnya ditetapkan dengan mengacu pada kinerja di tahap *Main drive*, misalnya dalam bentuk target panjang galian per bulan atau per hari. Dalam konteks penelitian ini, *Main drive* menjadi fokus utama perbandingan antara produktivitas rencana (berdasarkan kontrak dan dokumen perencanaan) dengan produktivitas aktual (berdasarkan data *ring* TBM).

3. *Arriving Drive*

Arriving drive adalah tahap akhir penggalian ketika TBM mendekati *receiving shaft* atau area penerima terowongan. Pada tahap ini, jarak sisa penggalian relatif lebih pendek, namun kondisi teknis biasanya kembali menjadi lebih kritis karena:

- TBM bekerja dekat dengan struktur shaft penerima, stasiun, atau bangunan eksisting.
- Pengendalian deformasi tanah dan penurunan permukaan menjadi sangat penting.
- Kecepatan maju TBM bisa dikurangi untuk menjaga keamanan dan ketelitian posisi (*breakthrough*).

Setelah mencapai titik tembus (*Tunnel breakthrough*), TBM berhenti dan selanjutnya dilakukan rangkaian pekerjaan lanjutan seperti pembongkaran sebagian peralatan, penarikan (*retrieval*) atau pemindahan TBM apabila masih akan digunakan untuk *drive* berikutnya. Dalam penelitian ini, *Arriving drive* juga dipisahkan sebagai satu tahap analisis, sehingga dapat dilihat apakah produktivitas aktual pada segmen mendekati *shaft* penerima berbeda signifikan dibandingkan tahap *Main drive*.

2.2.2 Data Operasi TBM

2.2.2.1 Pengertian *Ring Report* / *Tunnel Ring Monitoring*

Dalam proyek terowongan dengan TBM modern, data operasi umumnya direkam dan diorganisasikan per *Tunnel ring*. Untuk setiap *ring lining* yang dipasang, sistem data TBM menyimpan satu paket informasi yang berisi data penggalian dan pemasangan segmen, sehingga kinerja penggalian dapat ditelusuri *ring* demi *ring* sepanjang trase terowongan (Marini & Venditti, 2023).

Informasi tersebut biasanya dihimpun dalam dokumen yang dikenal sebagai “*ring report*”, yaitu laporan yang direkam untuk setiap *ring lining* dan berisi kombinasi data geometri, data *Tunneling*, serta *Parameter* mesin TBM yang direkam secara berkala (setiap beberapa detik) selama siklus pemasangan *ring* (Marini & Venditti, 2023).

Pada sistem manajemen data terowongan seperti *Tunnel Track*, *ring report* didefinisikan sebagai jenis laporan yang secara otomatis dihasilkan setiap satu siklus *ring*, dan memuat seluruh informasi yang diperlukan untuk memahami performa TBM pada siklus *ring* tersebut (Digitalnology, 2019). Dengan kata lain, *ring report* adalah bentuk *Tunnel Ring Monitoring* yang mendokumentasikan perilaku TBM per *ring* terpasang (misalnya *ring* ke-1, ke-2, dan seterusnya).

Beberapa studi juga menegaskan bahwa *ring report* dikaitkan langsung dengan *ring* yang dipasang, sehingga nomor *ring* pada laporan berkorespondensi dengan nomor *ring lining* yang dipasang di lapangan. Hal ini membuat data operasi TBM dapat dianalisis secara spasial maupun temporal per *ring* sepanjang terowongan (misalnya untuk melihat variasi kinerja TBM terhadap kondisi geologi pada segmen tertentu).

2.2.2.2 Struktur Data yang Digunakan

Dalam praktiknya, *ring report* dapat berisi ratusan *Parameter* (*thrust*, torsi, tekanan muka, konsumsi energi, deviasi geometri, dsb.), namun tidak semua kolom diperlukan untuk analisis produktivitas. Sistem seperti *Tunnel Track*, misalnya, mengizinkan pengguna mem-*filter* grafik dan analisis berdasarkan nomor *ring* dan tanggal untuk rentang *ring* tertentu yang ingin dipelajari (Digitalnology, 2019).

Dalam penelitian ini, dari sekian banyak kolom yang tersedia pada *Tunnel Ring Monitoring* proyek MRT Jakarta Fase 2A (CP202), data yang digunakan dibatasi pada struktur data identitas dan waktu penggalian *ring* sebagai berikut:

1. *Ring No.*

Merupakan nomor unik untuk setiap *ring lining* yang dipasang sepanjang terowongan. Nomor ini menghubungkan data operasi TBM dengan posisi geometrik *ring* di lapangan serta dengan informasi lain seperti *chainage* dan data desain *lining*.

2. *Excavation Date*

Tanggal pelaksanaan penggalian untuk *ring* tersebut. Kolom ini memungkinkan penelusuran kinerja TBM terhadap

waktu (misalnya tren produktivitas harian atau bulanan), serta dapat dikaitkan dengan faktor eksternal seperti jadwal kerja dan kondisi lapangan.

3. *Start Excavation* (a)

Waktu (jam:menit) ketika penggalian untuk *ring* ke-*i* mulai dilakukan. Nilai ini menjadi titik awal perhitungan durasi penggalian per *ring*.

4. *Finish Excavation* (b)

Waktu (jam:menit) ketika penggalian untuk *ring* ke-*i* dinyatakan selesai (sebelum masuk tahap pemasangan segmen *ring* tersebut). Nilai ini menjadi titik akhir perhitungan durasi penggalian.

5. *Excavation Time* = (b – a) (2.2)

Durasi penggalian untuk *ring* ke-*i*, yang dihitung sebagai selisih antara waktu selesai dan waktu mulai penggalian. Durasi ini kemudian dinyatakan dalam satuan jam per *ring* (jam/*ring*) dan menjadi dasar untuk perhitungan jam penggalian per *ring* dan produktivitas aktual.

Secara umum, bentuk hubungan matematisnya dapat dituliskan sebagai:

$$t_{exc,i} = b_i - a_i (2.3)$$

dengan:

- $t_{exc,i}$ = waktu penggalian untuk *ring* ke-*i* (jam/*ring*),
- a_i = waktu mulai penggalian *ring* ke-*i*,
- b_i = waktu selesai penggalian *ring* ke-*i*.

Struktur data ini sejalan dengan konsep pengolahan data operasi TBM di mana informasi per *ring* digunakan sebagai unit analisis dasar untuk mengkaitkan kinerja TBM dengan kondisi geologi dan respon *lining* sepanjang terowongan (Marini & Venditti, 2023).

2.2.2.3 Waktu Penggalian per *Ring*

Waktu penggalian per *ring* (*Excavation Time per ring*) adalah indikator dasar yang menyatakan berapa lama TBM membutuhkan waktu untuk menyelesaikan penggalian satu *ring* penuh. Nilai ini diperoleh langsung dari data *Start Excavation (a)* dan *Finish Excavation (b)* pada *Tunnel Ring Monitoring* dan dinyatakan dalam satuan jam per *ring* (jam/*ring*).

Konsep waktu per *ring* sebagai satuan jam/*ring* juga digunakan pada studi lain yang menganalisis operasi di dalam terowongan berbasis *ring*. Sebagai contoh, mendefinisikan waktu yang dihabiskan lokomotif di dalam terowongan untuk setiap *ring* sebagai t_i dalam satuan *Hours per ring* (jam/*ring*) untuk mengevaluasi kinerja operasi dan emisi gas di konstruksi terowongan dengan TBM (Garcia-Gonzalez et al., 2023). Hal ini memperkuat bahwa jam/*ring* adalah satuan yang wajar digunakan sebagai dasar analisis kinerja di lingkungan konstruksi terowongan berbasis *ring*.

Dalam penelitian ini, waktu penggalian per *ring* akan digunakan sebagai:

1. *Input* utama untuk menghitung indikator kinerja berbasis waktu, seperti jam per *ring* (HPR) pada setiap tahapan penggalian (*Initial drive*, *Main drive*, dan *Arriving Drive*).
2. Dasar perhitungan produktivitas aktual TBM dalam satuan *ring*/jam atau meter/jam (dengan mengacu pada panjang 1 *ring* $\approx 1,5$ m), yang kemudian dibandingkan dengan nilai

produktivitas rencana yang tercantum dalam dokumen kontrak proyek.

3. *Parameter* pembentuk deviasi antara produktivitas rencana dan produktivitas aktual, karena setiap kenaikan waktu penggalan per *ring* akan menurunkan produktivitas aktual TBM.

2.2.3 Produktivitas dalam Konstruksi

1. Pengertian Produktivitas

Secara umum, produktivitas didefinisikan sebagai perbandingan antara hasil kegiatan (*output*) dan masukan (*Input*) yang digunakan dalam proses produksi (Sihombing, 2018). Pada beberapa kajian produktivitas kerja konstruksi, definisi ini ditulis eksplisit dalam bentuk rumus:

$$\text{Produktivitas} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \dots\dots\dots (2.4)$$

Output di sini dapat berupa barang atau jasa konstruksi, sedangkan *Input* dapat berupa tenaga kerja, waktu, peralatan, maupun sumber daya lain yang dikonsumsi dalam proses (Sihombing, 2018). Dengan demikian, produktivitas pada dasarnya menggambarkan tingkat efisiensi pemanfaatan sumber daya: semakin besar *output* yang dihasilkan dengan *Input* tertentu, semakin tinggi produktivitasnya.

2. Produktivitas pada Proyek Konstruksi

Dalam konteks proyek konstruksi, produktivitas umumnya diukur sebagai volume pekerjaan yang dapat diselesaikan per satuan waktu atau per satuan tenaga kerja. Sejumlah penelitian di bidang konstruksi di Indonesia menyatakan bahwa produktivitas dihitung sebagai volume pekerjaan dibagi durasi pekerjaan, misalnya:

$$\text{Produktivitas} = \frac{\text{Volume pekerjaan}}{\text{Durasi pekerjaan}} \dots\dots\dots (2.5)$$

Dalam pengukuran produktivitas tenaga kerja konstruksi, *output sering* dinyatakan dalam satuan fisik seperti $\text{m}^2/\text{hari/orang}$ atau $\text{m}^3/\text{hari/orang}$, sebagaimana digunakan pada analisis produktivitas tenaga kerja bekisting dan pengecoran (Febriani & Supriyan, 2024). Penelitian lain merumuskan produktivitas tenaga kerja sebagai hasil pekerjaan per jam kerja atau per orang-hari, sehingga tetap konsisten dengan konsep dasar produktivitas sebagai rasio *output* terhadap *Input* waktu/tenaga (Febriani & Supriyan, 2024).

Berdasarkan definisi-definisi tersebut, produktivitas dalam konstruksi pada dasarnya adalah rasio antara volume pekerjaan (*output*) dengan sumber daya yang digunakan, yang paling *sering* direpresentasikan sebagai volume pekerjaan per satuan waktu. Dalam penelitian ini, konsep yang sama akan diterapkan pada operasi TBM, di mana *output* dinyatakan sebagai panjang terowongan (m) atau jumlah *ring* yang terpasang, sedangkan *Input* dinyatakan sebagai waktu operasi (jam/hari/bulan) untuk keperluan perhitungan produktivitas rencana maupun actual.

2.2.4 Produktivitas Penggalian TBM

2.2.4.1 *Advance rate* dan *Penetration rate* TBM

Dalam kajian kinerja *Tunnel Boring Machine* (TBM), *advance rate* (AR) dan *penetration rate* (PR) merupakan dua parameter utama yang banyak digunakan untuk menggambarkan kecepatan penggalian.

Pedoman terowongan yang dikeluarkan oleh Federal Highway Administration (FHWA) mendefinisikan *advance rate* sebagai perbandingan antara panjang terowongan yang berhasil digali dengan waktu operasi yang digunakan. FHWA juga membedakan antara waktu kalender dan waktu operasi efektif (*effective operating time*), karena tidak seluruh waktu dalam satu hari merupakan waktu penggalian aktif. Dengan demikian, *advance rate* dapat dievaluasi dengan

memperhatikan definisi waktu yang digunakan, apakah mengacu pada waktu kalender atau waktu operasi efektif, sesuai kebutuhan analisis.

Secara umum, rumus *advance rate* menurut pendekatan FHWA adalah:

$$AR = \frac{L}{T} \dots\dots\dots(2.6)$$

di mana:

- AR = *advance rate* (m/hari atau m/jam)
- L = panjang terowongan yang digali (m)
- T = waktu operasi yang digunakan

Beberapa penelitian menyatakan bahwa kinerja TBM secara umum dievaluasi melalui *advance rate* sebagai laju maju TBM dalam satuan panjang terowongan per hari kerja (m/hari), sedangkan *penetration rate* menggambarkan kecepatan penetrasi TBM terhadap muka galian per satuan waktu atau per putaran *cutterhead* (misalnya m/jam atau mm/rev) (Rostami, 2016). Kedua parameter ini digunakan sebagai indikator performa TBM di berbagai kondisi geologi dan skenario operasi.

Secara konsep:

- *Advance rate* (AR) adalah panjang terowongan yang berhasil digali dibagi dengan waktu operasi (misalnya m/hari), dan mencerminkan performa TBM secara keseluruhan termasuk waktu berhenti, pergantian *shift*, dan kegiatan pendukung (Rostami, 2016).
- *Penetration rate* (PR) adalah laju penetrasi TBM ketika *cutterhead* sedang benar-benar memotong tanah/batuan, biasanya dinyatakan sebagai panjang galian per jam (m/jam)

atau kedalaman penetrasi per putaran *cutterhead* (mm/rev) (Jamshidi, 2018).

Kedua parameter ini sering dianalisis bersama untuk memahami hubungan antara setelan operasi TBM (misalnya *thrust*, torsi, kecepatan putar) dengan kecepatan penggalian yang dicapai di lapangan.

2.2.4.2 Produktivitas TBM dalam Satuan *Ring*/Hari

Dalam praktik proyek terowongan dengan TBM, kemajuan pekerjaan sering dicatat dan dilaporkan berdasarkan jumlah ring lining yang terpasang. Setiap ring merupakan elemen segmen beton pracetak yang membentuk struktur lining permanen terowongan, sehingga jumlah ring dapat dipandang sebagai representasi langsung dari kemajuan fisik pekerjaan terowongan. Oleh karena itu, konsep *advance rate* (kemajuan panjang terowongan per waktu) dapat diadaptasi ke satuan ring/hari agar selaras dengan sistem pelaporan TBM di lapangan dan memudahkan evaluasi produktivitas secara konsisten pada level fase operasi

Keunggulan pendekatan jumlah ring dipilih karena:

1. Sesuai dengan sistem pelaporan TBM di lapangan yang berbasis ring.
2. Memudahkan evaluasi per fase operasi (*initial drive*, *main drive*, *arrival*).
3. Langsung mencerminkan progres struktur permanen terowongan (ring lining yang terpasang).
4. Memudahkan perbandingan antara produktivitas rencana dan aktual pada segmen yang dianalisis.

Berdasarkan definisi *advance rate* di atas, produktivitas TBM secara umum dinyatakan sebagai panjang terowongan per satuan waktu, misalnya meter per hari (m/hari) atau meter per jam (m/jam), yang

dapat dihitung dari jarak galian total dibagi durasi operasi (Rostami, 2016).

Dalam proyek terowongan bersegmen, panjang terowongan biasanya dinyatakan dalam jumlah ring. Pada proyek ini, satu ring TBM direncanakan memiliki panjang sekitar 1,5 m berdasarkan dokumen desain dan spesifikasi segmen terowongan proyek MRT Jakarta Fase 2A. Dengan demikian, ring/hari dapat dikonversi menjadi m/hari menggunakan hubungan:

- 1 *ring* $\approx$ 1,5 m
- 10 *ring*/hari $\approx$ 15 m/hari

Di banyak proyek TBM, operasi direncanakan 24 jam per hari dengan sistem beberapa *shift* kerja, sehingga target *advance rate* harian umumnya dinyatakan dalam m/hari atau ring/hari.

2.2.4.3 Rumus Produktivitas Rencana dan Aktual TBM

Secara umum, produktivitas didefinisikan sebagai perbandingan antara *output* (hasil) dengan *Input* (masukan). Dalam konteks kerja/konstruksi, banyak literatur mendefinisikan produktivitas sebagai rasio antara volume hasil pekerjaan dengan sumber daya yang digunakan, misalnya waktu kerja (jam/hari) (Silitonga, 2022).

Kalimat tersebut benar-benar dinyatakan, misalnya: Hasibuan (2017) yang dikutip dalam Silitonga (2022) menyebutkan bahwa “*produktivitas adalah perbandingan antara output (hasil) dengan Input (masukan)*” (Silitonga, 2022).

Berdasarkan konsep tersebut, dalam penelitian ini produktivitas penggalian TBM dinyatakan sebagai:

Produktivitas rencana TBM (*ring*/hari)

$$P_{rencana} = \frac{N_{ring, rencana}}{T_{rencana}} \dots\dots\dots (2.7)$$

dengan:

- $N_{ring, rencana}$ = jumlah *ring* yang direncanakan pada suatu periode atau segmen (*Initial drive, Main drive, Arriving Drive*),
- $T_{rencana}$ = durasi rencana dalam hari berdasarkan dokumen rencana/kontrak.

Jika dibutuhkan dalam meter per hari, rumusnya menjadi:

$$P_{rencana} (m/hari) = P_{rencana} (ring/hari) \times 1,5 \text{ m/ring} \dots\dots\dots (2.8)$$

Produktivitas aktual TBM (*ring*/hari)

$$P_{aktual} = \frac{N_{ring, aktual}}{T_{aktual}} \dots\dots\dots (2.9)$$

dengan:

- $N_{ring, aktual}$ = jumlah *ring* yang benar-benar terpasang berdasarkan data *Tunnel Ring Monitoring (ring report)*
- T_{aktual} = durasi aktual (hari) antara *ring* awal dan *ring* akhir pada segmen yang dianalisis.

Rumus di atas merupakan penerapan langsung konsep produktivitas *output* per unit waktu, di mana *output* = jumlah *ring* (atau panjang terowongan), dan *Input* = durasi waktu operasi (hari). Hal ini sejalan dengan definisi produktivitas sebagai rasio *output/Input* dalam literatur manajemen kinerja dan produktivitas (Silitonga, 2022).

2.2.4.4 Indikator Waktu per *Ring*

Selain dinyatakan dalam *ring*/hari atau m/hari, produktivitas TBM juga dapat dievaluasi melalui indikator waktu per *ring* atau *Hour per Ring* (HPR). Indikator ini sangat relevan ketika data operasi penggalian TBM tersedia dalam bentuk:

- *Ring No.*
- *Start Excavation* (a)
- *Finish Excavation* (b)

Pada penelitian ini, HPR didefinisikan secara sederhana sebagai:

$$\text{HPR} = \frac{\text{Jam penggalian}}{\text{Jumlah ring}} \dots\dots\dots (2.10)$$

atau pada level satu *ring*:

$$\text{HPR}_i = \text{Finish Excavation}_i - \text{Start Excavation}_i \dots\dots\dots (2.11)$$

dengan HPR_i dalam satuan jam/*ring*, dihitung dari selisih waktu mulai dan selesai penggalian *ring* ke-*i* pada data *Tunnel Ring Monitoring*.

Secara konsep, semakin kecil nilai HPR $\rightarrow$ semakin tinggi produktivitas TBM, karena satu *ring* dapat diselesaikan dalam waktu yang lebih singkat. Analisis HPR per *ring* atau per kelompok *ring* membantu mengidentifikasi periode/segmen dengan kinerja tinggi atau rendah, dan dapat dikaitkan dengan kondisi lapangan maupun gangguan operasi.

Definisi ini langsung diturunkan dari struktur data proyek dan konsep dasar produktivitas waktu per unit *output*, sehingga tidak bergantung pada rumus khusus di literatur.

2.2.4.5 Produktivitas per Tahap Penggalian TBM

Pada proyek MRT Jakarta Fase 2A segmen Harmoni–Sawah Besar, operasi TBM dibagi menjadi beberapa tahap penggalian (*drive*) sesuai dokumen proyek, yaitu:

1. *Initial drive* – tahap awal setelah TBM diluncurkan dari *shaft*/pit awal sampai mencapai kondisi operasi stabil.
2. *Main drive* – tahap penggalian utama dengan panjang lintasan terbesar, ketika TBM bekerja dalam pola operasi yang relatif stabil.
3. *Arriving Drive* – tahap mendekati *shaft* tujuan/stasiun berikutnya, biasanya disertai penyesuaian kecepatan dan kontrol tambahan menjelang break-through.

Untuk memperoleh gambaran kinerja yang lebih detail, penelitian ini akan:

- Menghitung produktivitas rencana dan produktivitas aktual dalam satuan *ring*/hari secara untuk masing-masing tahap *Initial drive*, *Main drive*, dan *Arriving Drive*, berdasarkan rencana (kontrak/*Baseline* untuk tiap *drive*) dan aktual *Tunnel Ring Monitoring*.
- Menghitung HPR (jam/*ring*) pada masing-masing tahap untuk melihat seberapa efisien siklus penggalian di setiap *drive*.
- Menganalisis perbedaan antara produktivitas rencana dan aktual pada tiap tahap sebagai dasar evaluasi kinerja waktu operasi TBM pada pekerjaan *Tunnel* Harmoni–Sawah Besar.

Pembagian analisis produktivitas per tahap ini konsisten dengan praktik evaluasi kinerja TBM yang membedakan fase *launching*, *Main*

drive, dan *Arriving/break-through* untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik operasi di setiap segmen lintasan (Rostami, 2016).

2.2.5 Perencanaan Waktu Penggalian dan Target Produktivitas TBM

2.2.5.1 *Baseline Schedule* Pekerjaan Tunnel Harmoni–Sawah Besar

Dalam konstruksi, *Baseline Schedule* adalah jadwal yang disetujui (*approved Schedule*) dan digunakan sebagai acuan (*fixed reference point*) untuk memantau dan mengendalikan waktu dari awal sampai akhir. *Baseline Schedule* memuat aktivitas, ketergantungan, durasi, tanggal yang direncanakan, setiap penyimpangan jadwal aktual terhadap *Baseline* digunakan untuk mengidentifikasi keterlambatan dan mengevaluasi kinerja proyek (*PlanRadar*, 2023).

Pada Proyek MRT Jakarta Fase 2A Paket CP202, *Baseline Schedule* pekerjaan *bored Tunnel* Harmoni–Sawah Besar menetapkan rencana waktu penggalian dengan TBM yang dibagi ke dalam beberapa tahap utama penggalian, yaitu:

1. *Initial drive* tahap awal penggalian dari *shaft/launching shaft* sampai TBM mencapai kondisi operasi stabil.
2. *Main drive* tahap penggalian utama dengan panjang lintasan paling besar, di mana TBM diharapkan bekerja mendekati kapasitas rencana.
3. *Arriving drive* tahap akhir ketika TBM mendekati *receiving shaft* dan dilakukan penyesuaian operasi menjelang *breakthrough*.

Dalam penelitian ini, *Baseline Schedule* pekerjaan *Tunnel* Harmoni–Sawah Besar digunakan sebagai acuan perencanaan waktu untuk ketiga tahap tersebut. Data durasi rencana dan panjang lintasan tiap tahap diambil dari dokumen jadwal proyek dan dokumen teknis TBM proyek CP202 yang menjadi bagian dari data sekunder penelitian.

2.2.5.2 Target Produktivitas Kontraktual TBM

Dalam studi produktivitas konstruksi, *sering* dibedakan antara produktivitas rencana (*Planned productivity*) dan produktivitas aktual (*Actual productivity*). Perbandingan keduanya digunakan untuk menilai efisiensi pelaksanaan dan menjadi dasar evaluasi kinerja (Natasya & Putra, 2024). Pada penelitian MEP di gedung bertingkat, misalnya, produktivitas rencana dihitung dari koefisien upah dan volume pekerjaan, kemudian dibandingkan dengan produktivitas aktual di lapangan untuk melihat perbedaan kinerja (Natasyaa & Putra, 2024).

Dalam konteks Proyek MRT Jakarta Fase 2A (CP202), target produktivitas rencana TBM untuk pekerjaan *Tunnel* Harmoni–Sawah Besar diperoleh dari dokumen kontrak dan dokumen *Tunnel Parameter*. Secara umum, target-target tersebut dapat diringkas sebagai berikut:

1. Target produktivitas rata-rata kontraktual
 - Target produktivitas penggalian TBM ditetapkan sekitar 225 m/bulan untuk lintasan *Tunnel* yang dianalisis.
 - Nilai ini merupakan rata-rata produktivitas rencana yang digunakan dalam perencanaan durasi penggalian *Tunnel* di dokumen kontrak (Dokumen Kontrak CP202, 2023).
2. Target produktivitas harian per tahap (*Tunnel Parameter*)

Berdasarkan dokumen *Tunnel Parameter* TBM untuk lintasan Harmoni–Sawah Besar, target produktivitas TBM per hari per tahap dapat dinyatakan, misalnya, sebagai berikut:

- *Initial drive*
 - Target: ± 3 m/hari
 - Dengan asumsi 1 *ring* $\approx 1,5$ m, maka setara dengan:

$$\text{Target} \approx \frac{3 \text{ m/hari}}{1,5 \text{ m/ring}} \approx 2 \text{ ring/hari}$$

○ *Main drive*

- Target: $\pm 9 \text{ m/hari}$
- Konversi ke satuan *ring*/hari:

$$\text{Target} \approx \frac{9 \text{ m/hari}}{1,5 \text{ m/ring}} \approx 6 \text{ ring/hari}$$

○ *Arriving drive*

- Target: $\pm 6 \text{ m/hari}$
- Konversi ke satuan *ring*/hari:

$$\text{Target} \approx \frac{6 \text{ m/hari}}{1,5 \text{ m/ring}} \approx 4 \text{ ring/hari}$$

Nilai-nilai di atas merupakan target produktivitas rencana yang digunakan sebagai dasar perencanaan durasi penggalian *Tunnel*. Dalam penelitian ini, nilai tersebut tidak dianggap sebagai data aktual, melainkan sebagai P_{rencana} yang nanti akan dibandingkan dengan P_{aktual} yang dihitung dari data *Tunnel Ring Monitoring (ring report)* untuk tiap tahap (*Initial, Main, Arriving*).

2.2.5.3 Keterkaitan Target Produktivitas dengan Durasi Pekerjaan *Tunnel*

Secara konsep, durasi pekerjaan penggalian *Tunnel* untuk suatu volume tertentu sangat dipengaruhi oleh tingkat produktivitas. Untuk panjang *Tunnel* L dan produktivitas P , durasi rencana dan aktual dapat dinyatakan secara sederhana sebagai:

$$T_{\text{rencana}} = \frac{L}{P_{\text{rencana}}} \dots\dots\dots (2.12)$$

$$T_{\text{aktual}} = \frac{L}{P_{\text{aktual}}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Jika produktivitas aktual lebih rendah dari target ($P_{\text{aktual}} < P_{\text{rencana}}$), maka untuk panjang *Tunnel* yang sama, durasi aktual cenderung lebih panjang dari durasi yang direncanakan sehingga berpotensi menimbulkan keterlambatan waktu pada segmen *Tunnel*. Sebaliknya, jika produktivitas aktual sama atau lebih tinggi ($P_{\text{aktual}} \geq P_{\text{rencana}}$), durasi aktual dapat tetap sama atau bahkan lebih cepat dari *Baseline Schedule*.

Penelitian produktivitas konstruksi menunjukkan bahwa efisiensi tenaga kerja memiliki hubungan langsung dengan durasi dan biaya proyek. Natasya & Putra (2024) menjelaskan bahwa perbandingan produktivitas rencana dan aktual digunakan untuk mengevaluasi kinerja pelaksanaan, dan produktivitas aktual yang lebih rendah dari rencana menyebabkan kebutuhan waktu lebih besar untuk menyelesaikan volume pekerjaan yang sama (Natasyaa & Putra, 2024). Firmansyah & Kamandang dikutip dalam (Natasyaa & Putra, 2024) menyatakan bahwa efisiensi tenaga kerja merupakan salah satu faktor yang memengaruhi span/durasi dan biaya proyek; efisiensi rendah meningkatkan peluang proyek mengalami keterlambatan, sedangkan efisiensi tinggi memungkinkan proyek selesai lebih cepat dari jadwal.

Selain itu, Ameh & Oke dikutip dalam (Natasyaa & Putra, 2024) menemukan hubungan negatif yang signifikan antara *Time overrun* dan produktivitas tenaga kerja pada proyek konstruksi: penurunan produktivitas berkaitan dengan meningkatnya keterlambatan waktu proyek. Temuan ini memperkuat bahwa deviasi produktivitas aktual terhadap produktivitas rencana merupakan indikator penting untuk menilai potensi keterlambatan durasi.

Dalam penelitian ini, target produktivitas kontraktual (225 m/bulan dan target m/hari per tahap) dijadikan acuan perencanaan (P_{rencana}). Produktivitas aktual TBM (P_{aktual}) akan dihitung dari

data *Tunnel Ring Monitoring* dalam satuan *ring/hari*. Selanjutnya, deviasi produktivitas antara P_{rencana} dan P_{aktual} per tahap (*Initial drive*, *Main drive*, *Arriving Drive*) akan dianalisis dan dihubungkan dengan kinerja waktu pekerjaan *Tunnel* Harmoni–Sawah Besar (potensi keterlambatan atau percepatan terhadap *Baseline Schedule*).

2.2.6 Deviasi Produktivitas dan Kinerja Waktu Pekerjaan *Tunnel*

2.2.6.1 Pengertian Deviasi dan Deviasi Persentase Produktivitas

Dalam konteks konstruksi, *loss of productivity* sering didefinisikan sebagai penyimpangan (*deviation*) antara produktivitas yang benar-benar teramati di lapangan dengan produktivitas yang secara wajar diharapkan atau direncanakan (Besklubova & Zhang, 2019).

Secara umum, deviasi dapat dinyatakan sebagai selisih antara nilai aktual dan nilai rencana. Dalam banyak referensi teknik dan statistika, persentase deviasi dihitung sebagai selisih antara nilai aktual dan nilai yang diharapkan (*expected value*), dibagi nilai yang diharapkan, lalu dikalikan 100% (CalculatorLib, 2025).

Dengan mengadaptasi konsep tersebut untuk produktivitas TBM, penelitian ini menggunakan:

$$\Delta P = P_{\text{aktual}} - P_{\text{rencana}} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$\text{Deviasi Produktivitas}(\%) = \left(\frac{P_{\text{aktual}}}{P_{\text{rencana}}} - 1 \right) \times 100\% \dots \dots \dots (2.15)$$

di mana:

- P_{rencana} = produktivitas rencana (misalnya *ring/hari*)
- P_{aktual} = produktivitas aktual yang diperoleh dari data operasi TBM.

Nilai ΔP dan deviasi (%) ini selanjutnya digunakan untuk menilai apakah produktivitas aktual lebih rendah, sama, atau lebih tinggi dibanding target rencana.

2.2.6.2 Deviasi Produktivitas Rencana–Aktual TBM per Tahap

Pada proyek konstruksi, perbandingan antara produktivitas aktual dan produktivitas yang diharapkan (*Planned/expected productivity*) lazim digunakan sebagai ukuran kinerja, misalnya melalui rasio produktivitas aktual dibagi produktivitas yang diharapkan (Weideryd, 2022).

Selain itu, beberapa panduan praktis manajemen proyek menekankan pentingnya membandingkan *Actual production rates* dengan rencana (tender program atau *Baseline*) untuk mengidentifikasi deviasi dan menyesuaikan strategi agar jadwal tetap terjaga (Engimba, 2025).

Mengacu pada konsep tersebut, dalam penelitian ini deviasi produktivitas TBM dianalisis per tahap penggalian, yaitu:

- *Initial drive*,
- *Main drive*,
- *Arriving Drive*.

Untuk setiap tahap, dihitung:

- P_{rencana} → dari target produktivitas rencana (misalnya *ring*/hari atau m/hari) pada dokumen kontraktual dan *Tunnel Parameter*,
- P_{aktual} → dari data operasi TBM (*ring* per durasi aktual),
- ΔP dan deviasi produktivitas (%) menggunakan rumus (2.9), dan (2.10).

Dengan cara ini, deviasi produktivitas tidak hanya dilihat secara agregat, tetapi juga per tahap penggalian, sehingga dapat terlihat pada tahap mana perbedaan antara rencana dan aktual paling signifikan.

2.2.6.3 Hubungan Deviasi Produktivitas dengan Kinerja Waktu Pekerjaan *Tunnel*

Produktivitas dan kinerja waktu proyek saling berkaitan. Studi pada proyek konstruksi menunjukkan bahwa penurunan produktivitas merupakan salah satu faktor yang berkontribusi terhadap keterlambatan waktu pelaksanaan; ada hubungan yang signifikan antara faktor-faktor penyebab delay dan penurunan produktivitas di lapangan (Mahamid, 2022).

Dalam praktik penjadwalan konstruksi, analisis *Planned vs Actual* digunakan untuk memantau apakah kemajuan aktual mengikuti rencana, deviasi yang besar antara rencana dan aktual menjadi indikasi awal potensi keterlambatan dan perlu tindakan korektif (SmartPM, 2023).

Pada pekerjaan *Tunnel* dengan TBM, *Parameter* produktivitas seperti *advance rate* berpengaruh langsung terhadap efisiensi penggalian, jadwal proyek, dan biaya konstruksi (Zhang et al., 2022).

Oleh karena itu, dalam konteks penelitian ini:

- Jika $P_{\text{aktual}} < P_{\text{rencana}}$ (deviasi produktivitas negatif), maka laju kemajuan penggalian per hari lebih rendah dari target $\rightarrow$ berpotensi menimbulkan keterlambatan penyelesaian segmen *Tunnel*.
- Jika $P_{\text{aktual}} \geq P_{\text{rencana}}$, maka produktivitas memenuhi atau melampaui target $\rightarrow$ durasi pekerjaan cenderung sesuai atau lebih cepat dari *Baseline*.

Analisis deviasi produktivitas per tahap (*Initial, Main, Arriving*) dengan cara ini *memberikan* dasar kuantitatif untuk mengevaluasi apakah kinerja waktu pekerjaan *Tunnel* Harmoni–Sawah Besar berada dalam jalur yang direncanakan atau memerlukan tindakan perbaikan.