

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi industri 4.0 telah mendorong proses manufaktur menuju sistem produksi yang lebih terintegrasi, otomatis, dan berbasis data. Salah satu teknologi yang berkembang dalam era ini adalah *Digital Twin*, yaitu representasi digital dari objek, proses, atau sistem fisik yang dapat digunakan untuk melakukan pemantauan, simulasi, analisis, serta pengambilan keputusan secara lebih akurat. Dalam lingkungan manufaktur, *Digital Twin* berperan penting karena mampu menghubungkan kondisi aktual mesin dengan sistem digital sehingga kondisi operasional mesin dapat dipantau secara *real-time*. Menurut (Fantozzi et al., 2025) menyatakan bahwa *Digital Twin* dapat meningkatkan efisiensi operasional melalui pemantauan *real-time*, simulasi proses, identifikasi *bottleneck*, pengurangan *downtime*, serta dukungan pengambilan keputusan berbasis data.

Penerapan *Digital Twin* tidak hanya relevan pada industri besar, tetapi juga dapat diterapkan pada lingkungan produksi skala terbatas seperti *Teaching Factory*. *Teaching Factory* merupakan model pembelajaran vokasi yang mengintegrasikan kegiatan pendidikan dengan praktik produksi menyerupai kondisi industri. Dalam konteks ini, mesin CNC sebagai salah satu sarana praktik produksi perlu dipantau efektivitasnya agar proses pembelajaran dan produksi dapat berjalan lebih terukur. Penelitian (Maheshwari et al., 2023) menunjukkan bahwa sistem *Digital Twin* berbasis AI mampu meningkatkan transparansi proses produksi, mendeteksi *bottleneck*, mengidentifikasi anomali, dan membantu pengambilan keputusan, bahkan pada lingkungan manufaktur skala kecil hingga menengah yang memiliki keterbatasan sumber daya digital.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur efektivitas mesin adalah *Overall Equipment Effectiveness* (OEE). OEE merupakan indikator yang menilai kinerja mesin berdasarkan tiga parameter utama, yaitu *Availability*, *Performance*, dan *Quality*. Parameter *Availability* menunjukkan tingkat ketersediaan mesin dalam menjalankan proses produksi, *Performance* menunjukkan kemampuan mesin menghasilkan output sesuai waktu siklus

ideal, sedangkan *Quality* menunjukkan kemampuan mesin menghasilkan produk baik sesuai standar. Pada penelitian (Maheshwari et al., 2023) menunjukkan bahwa penerapan *Digital Twin* mampu meningkatkan kinerja operasional melalui perencanaan, pemantauan, dan pengendalian *real-time*, termasuk peningkatan OEE, utilisasi kapasitas, *service level*, serta penurunan redundansi data.

Penggunaan OEE dalam sistem *Digital Twin* menjadi penting karena data mesin yang terekam secara digital dapat digunakan untuk menghitung efektivitas mesin secara lebih akurat. Menurut (Kumbhar et al., 2023) *Digital Twin* dapat mengintegrasikan data produksi, proses, dan asset monitoring untuk mendeteksi *bottleneck* secara akurat serta meningkatkan *throughput* pada sistem manufaktur. Hal ini menunjukkan bahwa *Digital Twin* tidak hanya berfungsi sebagai alat visualisasi, tetapi juga dapat menjadi dasar analisis dalam menentukan apakah permasalahan efektivitas mesin lebih dominan berasal dari *Availability*, *Performance*, atau *Quality*.

Pada proses pemesinan CNC, kualitas produk juga menjadi bagian penting dalam pengukuran efektivitas mesin. Produk yang tidak memenuhi spesifikasi dapat menurunkan nilai *Quality* dan berdampak langsung terhadap nilai OEE. (Amer et al., 2026) menjelaskan bahwa *Digital Twin* dapat mendukung *predictive quality assurance* melalui pemantauan KPI, identifikasi *bottleneck*, prediksi risiko gangguan, peningkatan *traceability*, serta peningkatan respons terhadap masalah operasional. Dengan demikian, *Digital Twin* dapat digunakan untuk membantu memantau kualitas hasil produksi, mengidentifikasi produk cacat, dan mengurangi potensi penyimpangan proses pada mesin CNC.

Penelitian mengenai OEE menunjukkan bahwa rendahnya efektivitas mesin sering terjadi karena nilai *Availability*, *Performance*, atau *Quality* belum optimal. Pada penelitian (Nurmala Hamzah & Momon, 2023) menemukan bahwa nilai OEE pada mesin *Injection 2500T New* hanya sebesar 28%, jauh di bawah standar 85%, dan rendahnya efektivitas tersebut terutama dipengaruhi oleh lemahnya *Availability* dan *Performance*. Penelitian tersebut juga merekomendasikan perbaikan SOP, *preventive maintenance*, serta peningkatan ketersediaan mesin sebagai upaya peningkatan efektivitas.

Selain itu, penelitian (Muhazir et al., 2022) menemukan bahwa nilai OEE mesin Cerruti-2 mengalami peningkatan dari 75,55% menjadi 87,2% setelah dilakukan perbaikan. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa analisis OEE perlu dilanjutkan dengan identifikasi *six big losses* dan *fishbone diagram* agar akar penyebab rendahnya efektivitas mesin dapat diketahui secara lebih jelas. Hal ini relevan dengan analisis mesin CNC Bubut GSK 980Tdb karena hasil pengukuran OEE tidak hanya digunakan untuk mengetahui nilai efektivitas, tetapi juga untuk menentukan faktor kerugian yang menyebabkan kinerja mesin belum optimal.

Digital Twin juga memiliki peran penting dalam mendukung manufaktur yang berkelanjutan. Menurut (Kurniawan et al., 2024) menyatakan bahwa *Digital Twin* dapat meningkatkan produktivitas, otomatisasi, efisiensi energi, pemantauan aset, keberlanjutan proses manufaktur, dan pengurangan *downtime* melalui sistem monitoring serta perawatan yang lebih akurat. Dalam lingkungan *Teaching Factory*, penerapan *Digital Twin* pada mesin CNC dapat menjadi sarana pembelajaran manufaktur modern yang mengajarkan peserta didik mengenai produksi berbasis data, efisiensi mesin, dan pengambilan keputusan berdasarkan indikator kinerja.

Beberapa penelitian OEE pada industri manufaktur juga menunjukkan bahwa nilai OEE sering kali belum mencapai standar *world class*. Pada penelitian (Mickhael Apriliano Lie, 2025) menemukan bahwa nilai OEE pada industri makanan masih berada di bawah standar, dengan nilai tertinggi sebesar 80,34% dan terendah sebesar 66,97%, yang dipengaruhi oleh *downtime*, penurunan kecepatan mesin, dan gangguan teknis. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pengukuran OEE perlu dilakukan secara berkala agar kestabilan performa mesin dapat dianalisis dari waktu ke waktu.

Penelitian lain oleh (Anrinda et al., 2021) pada mesin Offset CD6 menunjukkan bahwa nilai OEE hanya sebesar 42,03% dan masih jauh dari standar 85%, dengan faktor *Performance* sebagai penyebab dominan rendahnya efektivitas mesin. Penelitian tersebut memperkuat bahwa setiap parameter OEE perlu dianalisis secara terpisah agar diketahui faktor utama yang menyebabkan efektivitas mesin belum optimal.

Dalam konteks mesin CNC, penerapan *Digital Twin* semakin relevan karena mesin CNC merupakan peralatan utama dalam proses manufaktur modern yang produktivitas dan kualitas hasil produksinya sangat bergantung pada cara mesin tersebut dioperasikan. (Kibira et al., 2024) menjelaskan bahwa *Digital Twin* pada CNC *machine tool* dapat mendukung pemanfaatan mesin secara optimal melalui pengumpulan data dari sistem fisik, pemodelan digital, data analitik, serta visualisasi untuk mendukung pengambilan keputusan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa pengembangan *Digital Twin* pada mesin CNC dapat dilakukan dengan dukungan standar ISO 23247, MTConnect, protokol komunikasi, pemrosesan data, dan visualisasi data. Hal ini memperkuat bahwa penggunaan sistem *Digital Twin* pada mesin CNC Bubut GSK 980Tdb di *Teaching Factory* dapat menjadi dasar pemantauan kondisi mesin secara lebih sistematis dan berbasis data.

Selain itu, (Daraba et al., 2024) menunjukkan bahwa *Digital Twin* dapat digunakan untuk melakukan pemantauan *real-time* pada peralatan teknologi CNC dengan cara mengintegrasikan *database*, antarmuka digital, dan sinkronisasi data antar mesin. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem *Digital Twin* mampu mempercepat sinkronisasi data, meningkatkan koordinasi alur kerja, mengurangi waktu produksi, meminimalkan keterlambatan operator, serta mendukung *predictive maintenance* dan optimasi performa mesin. Temuan ini relevan dengan penelitian pada mesin CNC Bubut GSK 980Tdb karena data seperti *run time*, *ready time*, *alarm time*, *ideal cycle time*, *target production*, produk OK, dan produk NG dapat digunakan untuk menghitung *Availability*, *Performance*, *Quality*, serta nilai OEE secara lebih akurat.

Berdasarkan uraian tersebut, pengukuran efektivitas mesin CNC Bubut GSK 980Tdb berbasis sistem *Digital Twin* di *Teaching Factory* SMK Dinamika Pembangunan 1 Jakarta menjadi penting untuk dilakukan. Mesin CNC sebagai sarana praktik dan produksi perlu dianalisis secara kuantitatif agar diketahui nilai *Availability*, *Performance*, *Quality*, serta tingkat efektivitasnya berdasarkan metode OEE. Dengan adanya sistem *Digital Twin*, data operasional mesin seperti *run time*, *ready time*, *alarm time*, *ideal cycle time*, *target*

production, produk OK, dan produk NG dapat digunakan sebagai dasar pengukuran efektivitas mesin secara lebih objektif. Oleh karena itu, penelitian dengan judul “Analisis *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) pada Mesin CNC Bubut GSK 980Tdb Berbasis Sistem *Digital Twin* di *Teaching Factory* SMK Dinamika Pembangunan 1 Jakarta” dilakukan untuk mengetahui nilai OEE dan tingkat efektivitas mesin CNC dalam mendukung proses produksi serta pembelajaran vokasi berbasis teknologi manufaktur digital.

1.2 Identifikasi Masalah

1. Belum optimalnya penerapan teknologi *Smart Manufacturing* sehingga menyebabkan OEE yang belum maksimal.
2. Belum diketahui secara pasti dampak penerapan teknologi *Smart Manufacturing* terhadap masing-masing parameter utama OEE, yaitu *Availability*, *Performance*, dan *Quality*.
3. Belum diketahui secara terukur perubahan nilai OEE sesudah implementasi *Digital Twin*, sehingga dampak implementasi *Digital Twin* terhadap efektivitas mesin produksi belum dapat dibuktikan secara kuantitatif.
4. Penerapan *Smart Manufacturing* masih terkendala infrastruktur teknologi seperti sensor, perangkat IoT dan jaringan internet yang masih terbatas di lingkungan *Teaching Factory*.
5. Terjadinya *downtime* yang tidak terencana karena sistem maintenance dan monitoring yang masih bersifat konvensional menyebabkan kinerja OEE menurun.
6. Data yang dihasilkan oleh mesin terkadang tidak akurat atau tidak terekam secara otomatis, sehingga proses evaluasi OEE menjadi kurang valid.
7. Kurangnya integrasi antara sistem produksi dan sistem digital dalam *Teaching Factory*, sehingga potensi *Smart Manufacturing* untuk meningkatkan kinerja OEE belum sepenuhnya dimanfaatkan.
8. Informasi penyebab *losses* (*downtime*, *speed loss*, dan *defect*) masih terbatas atau belum terklasifikasi jelas, sehingga sulit menentukan faktor dominan yang menurunkan OEE.

9. Penerapan teknologi *Smart Manufacturing* di *Teaching Factory* belum dilakukan secara optimal sehingga pengukuran OEE belum sepenuhnya berbasis data *real-time*.
10. Evaluasi dan pengendalian mutu produk masih banyak dilakukan secara manual, berpotensi menimbulkan *human error* serta membatasi upaya peningkatan kualitas melalui *Smart Manufacturing*.

1.3 Batasan Masalah

1. Analisis *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) dalam penelitian ini dibatasi pada satu program pemesinan CNC bubut pada mesin CNC bubut GSK 980Tdb di *Teaching Factory* SMK Dinamika Pembangunan 1 Jakarta. Pembatasan ini dilakukan agar data waktu siklus ideal, parameter proses, karakteristik benda kerja, kriteria kualitas, serta kondisi operasional mesin berada dalam kondisi yang homogen, sehingga pengukuran nilai *Availability*, *Performance*, dan *Quality* dapat dilakukan secara lebih valid dan konsisten.
2. Analisis efektivitas mesin dibatasi pada data operasional yang dihasilkan dari *dashboard Digital Twin*, meliputi waktu produksi terencana, waktu operasi aktual, *downtime*, waktu siklus ideal, jumlah produk yang dihasilkan, jumlah produk baik, dan jumlah produk cacat. Penelitian ini tidak membandingkan efektivitas antar program CNC maupun menganalisis variasi parameter pemesinan di luar kebutuhan perhitungan OEE, agar evaluasi sistem *Digital Twin* tetap berfokus pada kesesuaian kondisi aktual mesin CNC bubut GSK 980Tdb.

1.4 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengukuran nilai *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) pada sistem *Digital Twin* di *Teaching Factory* SMK Dinamika Pembangunan 1 Jakarta berdasarkan parameter *Availability*, *Performance*, dan *Quality*?
2. Bagaimana tingkat efektivitas mesin CNC bubut GSK 980 Tdb pada sistem *Digital Twin* di *Teaching Factory* SMK Dinamika Pembangunan 1 Jakarta berdasarkan hasil analisis OEE?

1.5 Tujuan Penelitian

1. Mengukur nilai *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) pada sistem *Digital Twin* di *Teaching Factory* SMK Dinamika Pembangunan 1 Jakarta berdasarkan parameter *Availability*, *Performance*, dan *Quality*.
2. Menganalisis tingkat efektivitas mesin CNC bubut GSK pada sistem *Digital Twin* di *Teaching Factory* SMK Dinamika Pembangunan 1 Jakarta berdasarkan hasil perhitungan OEE.

1.6 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat praktis bagi *Teaching Factory* SMK Dinamika Pembangunan 1 Jakarta dalam mengetahui tingkat efektivitas penggunaan alat produksi berbasis sistem *Digital Twin* melalui pengukuran *Overall Equipment Effectiveness* (OEE). Hasil analisis terhadap aspek *Availability*, *Performance* dan *Quality* dapat digunakan sebagai bahan evaluasi serta memperbaiki kualitas proses produksi yang terdigitalisasi.

Selain itu, penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan untuk pengembangan sistem pembelajaran berbasis industri di lingkungan *Teaching Factory*. Dengan adanya data efektivitas alat produksi yang terukur, pihak sekolah dapat menyusun strategi perbaikan operasional, meningkatkan kesiapan sarana praktik dan mendukung terciptanya proses pembelajaran vokasi yang lebih relevan dengan kebutuhan dunia kerja dan perkembangan teknologi manufaktur digital.

2. Manfaat Teoritis

Secara praktis, penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Bagi *Teaching Factory* (TeFa)

Penelitian ini dapat menambah wawasan mengenai penerapan metode OEE dalam mengevaluasi efektivitas alat produksi yang terintegrasi dengan sistem *Digital Twin*, sehingga dapat menjadi

referensi dalam pengembangan model evaluasi kinerja sarana praktik berbasis data.

2. Bagi Dunia Pendidikan Vokasi

Penelitian ini diharapkan memperkaya kajian mengenai integrasi teknologi digital dalam pembelajaran berbasis produksi, khususnya dalam menghubungkan konsep efektivitas peralatan, transformasi digital dan kesiapan lulusan menghadapi kebutuhan industri modern.

3. Bagi Industri Manufaktur

Penelitian ini dapat memberikan gambaran konseptual mengenai pemanfaatan OEE dan *Digital Twin* sebagai pendekatan untuk memantau kinerja peralatan secara lebih terukur, terutama dalam konteks penerapan teknologi produksi yang efisien dan berbasis data.

4. Bagi Peneliti Selanjutnya

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai rujukan awal untuk mengembangkan sstudi terkait OEE, *Digital Twin*, *Teaching Factory*, maupun efektivitas sistem produksi terdigitalisasi dengan ruang lingkup, metode atau objek penelitian yang lebih luas.

