

INTEGRASI MONITORING *OEE REAL-TIME* BERBASIS PLC-HMI DAN ANALISIS LOG GRANULAR UNTUK OPTIMASI PRODUKSI

Cahyadi Rian Dwi¹⁾ dan Mir'atul Khusna Mufida²⁾

^{1, 2)}Jurusan Teknik Informatika, Politeknik Negeri Batam, Indonesia
Jl. Ahmad Yani, Tlk. Tering, Kec. Batam Kota, Kota Batam, Kepulauan Riau 29461.
e-mail: riandwicahyadi10@gmail.com¹⁾ dan vda@polibatam.ac.id²⁾

ABSTRACT

Overall Equipment Effectiveness (OEE) is a crucial metric in modern manufacturing; however, conventional monitoring systems often focus on aggregate reporting, lacking the capability for automated root-cause identification. This research develops an integrated real-time OEE monitoring system utilizing Schneider PLCs and Weintek HMIs via an OPC Server (KEPServerEX) with a Double-Buffer Persistency mechanism. Unlike traditional methods, this study introduces granular event-log analysis to dissect production data at millisecond resolution. The system achieved 100% data transmission reliability even during peak outputs of 58,063 units per day. Analytical results reveal a critical performance-quality trade-off: extreme cycle time acceleration to 0.552s triggered a significant surge in Type 2 Rejects (Ejector Failure), accounting for 71.86% of total quality losses. This micro-anomaly was physically validated as a violation of mechanical dwell time limits. By identifying a Safe Operating Window between 0.630s – 0.635s and implementing a proposed speed capping strategy, this research projects a significant OEE improvement through the balance of speed and process stability. This study provides a technical reference for future researchers in implementing adaptive speed control based on real-time quality feedback in automated assembly lines.

Keywords: IIoT, OPC server, Double-buffer persistency, Real-time monitoring, Smart Manufactur

ABSTRAK

Overall Equipment Effectiveness (OEE) merupakan metrik krusial dalam manufaktur modern, namun sistem monitoring konvensional seringkali hanya berfokus pada pelaporan agregat tanpa kemampuan identifikasi akar penyebab masalah secara otomatis. Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring OEE real-time terintegrasi menggunakan PLC Schneider dan HMI Weintek melalui OPC Server (KEPServerEX) dengan mekanisme Double-Buffer Persistency. Berbeda dengan metode tradisional, penelitian ini memperkenalkan analisis event-log granular untuk membedah data produksi pada resolusi milidetik. Sistem yang dibangun berhasil mencapai keandalan transmisi data sebesar 100% bahkan pada output puncak sebanyak 58.063 unit per hari. Hasil analisis mengungkap adanya trade-off kritis antara performa dan kualitas: akselerasi cycle time ekstrem hingga 0,552 detik memicu lonjakan signifikan pada Type 2 Rejects (kegagalan ejektor) yang menyumbang 71,86% dari total kerugian kualitas. Anomali mikro ini divalidasi secara fisik sebagai pelanggaran batas mechanical dwell time. Dengan mengidentifikasi Safe Operating Window antara 0,630 detik – 0,635 detik dan menerapkan usulan strategi speed capping, penelitian ini memproyeksikan peningkatan nilai OEE melalui keseimbangan antara kecepatan dan stabilitas proses. Temuan ini memberikan kontribusi ilmiah berupa referensi teknis bagi penerapan pengendalian kecepatan adaptif berbasis umpan balik kualitas real-time pada lini perakitan otomatis.

Kata Kunci: IIoT, OPC server, Penyangga Ganda, Monitoring real-time, Industri Pintar

I. PENDAHULUAN

PADA lanskap industri manufaktur modern yang kompetitif, optimalisasi efisiensi operasional bukan lagi sekadar pilihan, melainkan kebutuhan fundamental. *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* telah diakui secara luas sebagai kerangka kerja evaluasi kinerja yang komprehensif dengan mengintegrasikan parameter ketersediaan mesin, efisiensi performa, dan tingkat kualitas produk [1]. Pentingnya *OEE* juga terlihat dalam manajemen rantai pasok industri skala besar untuk memastikan stabilitas produksi [2]. Implementasi teknologi *Industrial Internet of Things (IIoT)* telah membawa paradigma baru dalam pemantauan aset melalui akuisisi data otomatis yang bersifat kontinu [3]. Kendati demikian, banyak entitas manufaktur, termasuk industri kecil dan menengah,

masih menghadapi tantangan besar dalam memperoleh kalkulasi *OEE* yang akurat untuk meningkatkan produktivitas mereka [4].

Ketergantungan pada metodologi konvensional yang bersifat reaktif dan pelaporan berbasis manual seringkali mengakibatkan distorsi data, di mana deviasi kecil namun krusial pada lini produksi gagal terdeteksi secara dini. Pemanfaatan sensor berbasis *IoT* sebenarnya telah mulai diterapkan pada berbagai bidang untuk pemantauan parameter lingkungan secara presisi [5]. Namun, tantangan muncul saat sistem dihadapkan pada kecepatan produksi ekstrem. Guna mengatasi hal ini, infrastruktur *Programmable Logic Controller (PLC)* dan *Human Machine Interface (HMI)* diintegrasikan melalui standar komunikasi *OPC UA*, yang memungkinkan pengembangan *Digital Twin* untuk pemantauan dan simulasi sistem penanganan

material secara real-time [6], Melalui integrasi tersebut sistem dapat menangkap dinamika mesin secara langsung. Namun, volume trafik data yang sangat tinggi seringkali menyebabkan terjadinya *data loss* atau kegagalan sinkronisasi saat informasi dialirkan menuju pangkalan data pusat. Kehilangan integritas data ini merupakan hambatan kritis, karena laporan efektivitas yang dihasilkan menjadi tidak valid sebagai dasar pengambilan keputusan.

Selain masalah konektivitas, keterbatasan utama dalam sistem monitoring saat ini adalah rendahnya resolusi informasi yang disajikan. Penting untuk dipahami bahwa terdapat hubungan erat antara faktor manusia dan efektivitas peralatan yang perlu dianalisis secara mendalam [7]. Mayoritas sistem saat ini hanya mampu menyajikan angka persentase *OEE* tanpa kemampuan untuk menelusuri akar penyebab anomali secara spesifik. Diperlukan sebuah sistem informasi yang mampu memonitor dan menganalisis efisiensi peralatan secara otomatis dan akurat [8]. Upaya untuk meminimalkan kegagalan mesin melalui evaluasi solusi yang tepat menjadi krusial dalam menjaga kelangsungan industri [9]. Meskipun beberapa penelitian telah mencoba meningkatkan *OEE* pada mesin cetak spesifik, analisis terhadap kegagalan mikro pada lini berkecepatan tinggi masih sangat terbatas [10].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sebuah sistem integrasi monitoring *OEE real-time* yang tangguh. Fokus utama terletak pada pengembangan metodologi analisis *event-log* secara granular dengan mengevaluasi setiap denyut produksi pada resolusi milidetik untuk memetakan perilaku teknis mesin secara presisi. Kontribusi utama dari penelitian ini mencakup: (1) pengembangan arsitektur integrasi IT-OT yang tahan terhadap kegagalan sinkronisasi data pada trafik tinggi; (2) metodologi analisis log milidetik untuk identifikasi otomatis anomali pada sistem ejektor; dan (3) penentuan *Safe Operating Window* untuk menyeimbangkan performa mesin dan kualitas output melalui strategi *speed capping* yang berbasis data.

II. KAJIAN PUSTAKA

Bagian ini menyajikan landasan teoretis dan tinjauan literatur yang menjadi dasar pengembangan sistem monitoring *OEE real-time*. Pembahasan dimulai dengan menguraikan infrastruktur perangkat keras otomatis, protokol komunikasi industri, hingga konsep integrasi *Industrial Internet of Things (IIoT)*. Penjelasan mendalam mengenai metrik *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* dan analisis komparatif terhadap penelitian terdahulu juga disajikan untuk mempertegas posisi serta kebaruan (*novelty*) dari ekosistem manufaktur cerdas.

A. Programmable Logic Controller (PLC)



Gambar 1. Schneider Electric Modicon M221 Series PLC CPU

Programmable Logic Controller (Gambar 1) merupakan unit pemrosesan digital yang dirancang untuk beroperasi dalam lingkungan industri yang berat. *PLC* berfungsi sebagai tulang punggung akuisisi data lapangan dengan memproses sinyal dari berbagai sensor produksi secara *real-time*. Dalam ekosistem industri modern, pemanfaatan *PLC* telah bertransformasi menjadi penyedia wawasan produksi (*production insights*) melalui solusi analitik data yang bertujuan untuk mengoptimalkan efisiensi manufaktur dan utilitas mesin. Integrasi IoT dan analisis data *real-time* ini kini menjadi standar krusial dalam mencapai performa lini produksi yang maksimal [11]. Dalam arsitektur monitoring *OEE*, *PLC Schneider* digunakan untuk menangkap setiap pulsa produksi dan status mesin (seperti *Running*, *Standby*, atau *Error*). Keunggulan penggunaan *PLC* dalam penelitian ini terletak pada determinisme logikanya yang mampu menjamin sinkronisasi data sensor tanpa interferensi dari proses komputasi tingkat atas.

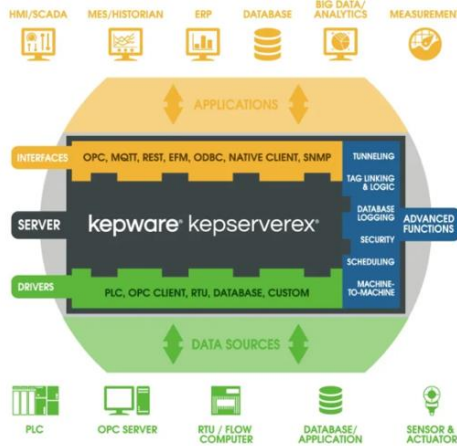
B. Human Machine Interface (HMI)



Gambar 2. HMI cMT X Series

HMI (Gambar 2) adalah antarmuka grafis yang menjembatani interaksi antara operator manusia dengan sistem kontrol *PLC*. Selain berfungsi sebagai alat visualisasi performa lini produksi, *HMI* modern berperan strategis sebagai *Local Data Gateway*. Tren masa depan manufaktur cerdas sangat bergantung pada kemampuan *Industrial IoT* dalam membentuk ekosistem yang terintegrasi [12]. *HMI* memfasilitasi input manual terkait kategori *reject* dan alasan *downtime* yang tidak dapat ditangkap oleh sensor otomatis. Dengan protokol *Modbus TCP/IP*, *HMI* mengonsolidasikan data dari *PLC* sebelum diteruskan ke lapisan *Information Technology (IT)*.

C. OPC Server dan Protokol OPC UA



Gambar 3. KEPServerEX OPC server Kepware

Open Platform Communications (OPC), khususnya standar Unified Architecture (UA) (Gambar 3), merupakan standar interoperabilitas global untuk pertukaran data yang aman di dunia otomasi industri. KEPServerEX dalam sistem ini bertindak sebagai entitas translatif yang menghubungkan protokol kepemilikan vendor perangkat keras dengan perangkat lunak monitoring. Penggunaan metrik OEE sebagai standar kualitas sangat krusial untuk mencapai keunggulan manufaktur [13]. OPC UA menjamin bahwa setiap variabel yang dikirimkan memiliki timestamp asli dari sumbernya, yang sangat krusial untuk validitas analisis log granular.

D. Industrial Internet of Things dan Konektivitas

IIoT merupakan integrasi teknologi informasi ke dalam operasional industri untuk menciptakan ekosistem manufaktur yang transparan. Implementasi OEE sangat efektif untuk meminimalkan six big losses pada proses permesinan [14]. Melalui paradigma IIoT, data dialirkan secara kontinu untuk diolah menjadi wawasan strategis. Peningkatan efektivitas peralatan juga dapat dicapai melalui pemeliharaan terencana yang terintegrasi dengan sistem monitoring [15]. Dalam konteks konektivitas jaringan, optimasi infrastruktur menjadi kunci utama. Penggunaan metode load balancing pada router dapat menjamin stabilitas transmisi data antara rantai produksi dan server [16]. Selain itu, sistem keamanan dan monitoring kelistrikan berbasis IoT juga berperan penting dalam menjaga keberlangsungan operasional mesin produksi seperti CNC [17]. Implementasi monitoring secara real-time telah terbukti efektif dalam berbagai aplikasi kontrol mesin berbasis IoT [18].

E. Metrik Overall Equipment Effectiveness (OEE)

OEE adalah metrik standar untuk mengevaluasi efisiensi peralatan dengan membedah tiga kategori kehilangan utama: Availability, Performance, dan Quality. Penelitian ini melampaui perhitungan OEE tradisional dengan mengintegrasikan analisis log milidetik. Hal ini memungkinkan identifikasi anomali teknis, seperti ketidaksesuaian antara kecepatan mesin dengan

batas toleransi mekanis, yang seringkali menjadi akar penyebab rendahnya nilai Quality pada lini produksi otomatis.

F. Pengembangan Sistem Berbasis Sensor dan Komunikasi

Sistem monitoring modern seringkali mengintegrasikan sensor canggih untuk deteksi anomali. Penggunaan sensor ultrasonik untuk penghindaran hambatan pada robot merupakan salah satu bentuk pengembangan deteksi fisik yang presisi [19]. Dari sisi perangkat lunak, pengembangan sistem berbasis web dengan visualisasi interaktif sangat mendukung perencanaan jaringan yang lebih terstruktur [20]. Untuk skala infrastruktur, integrasi kamera dan sensor melalui platform seperti Firebase memungkinkan pemantauan aset dilakukan secara terpusat [21]. Bahkan, untuk jangkauan luas, teknologi nirkabel seperti LoRa yang dikombinasikan dengan metode ARIMA dapat digunakan untuk mengoptimalkan distribusi data secara efisien [22].

G. Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Kebaruan

(Tabel 1) menyajikan posisi penelitian ini di tengah literatur ilmiah yang ada untuk menonjolkan kontribusi unik yang ditawarkan.

TABLE I
Matriks Perbandingan Fitur dan Kebaruan Penelitian

Ref	Fokus	Media Transmisi	Analisis Data	Integritas Data
[1]	Optimasi Industri Plastik	Manual / Semi-Otomatis	Agregat (Harian)	Terbatas
[11]	IoT & Real-time Analytics	Cloud IoT	Statistik Deskriptif	Standar (Single Buffer)
[14]	Six Big Losses	PLC ke Database	Analisis Downtime	Tidak Disediakan
Sekarang	Integrasi OEE Berbasis Log Granular	OPC UA (KEPServerEX)	Analisis Log Milidetik (Anomaly)	Double-Buffer Persistency

Penelitian ini terletak pada penggabungan mekanisme Double-Buffer Persistency untuk menjamin nol kehilangan data pada throughput tinggi dan penggunaan analisis log granular untuk diagnosa fisik mesin.

H. Kerangka Teoretis Integrasi IT-OT

Alur kerja teoretis dalam penelitian ini didasarkan pada prinsip sinkronisasi antara Physical Layer (PLC/HMI) dan Information Layer (OPC Server/IoT Platform). Kerangka ini menekankan bahwa data yang berkualitas adalah hasil dari transmisi yang tahan terhadap gangguan (Fault Tolerant). Melalui integrasi ini, data mentah diubah menjadi pengetahuan diagnostik yang mampu membedakan antara kegagalan operasional manusia dan anomali mekanis mesin.

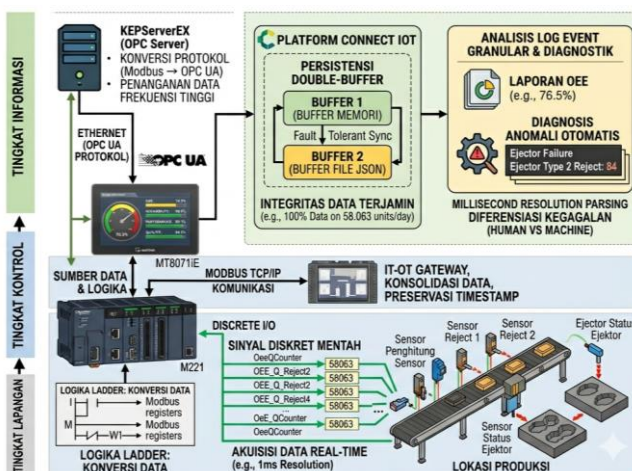
III. METODE PENELITIAN

Metodologi yang diterapkan dalam penelitian ini dirancang untuk menjembatani kebutuhan integrasi data operasional berkecepatan tinggi dengan analisis diagnostik yang akurat. Pendekatan penelitian ini difokuskan pada pengembangan arsitektur sistem yang mampu mempertahankan integritas data pada volume trafik yang padat, sekaligus mengekstraksi informasi granular dari setiap kejadian di lini produksi. Melalui kombinasi perancangan sistem *IT-OT* yang deterministik dan metodologi pengembangan yang adaptif, penelitian ini bertujuan untuk menciptakan solusi monitoring yang tidak hanya bersifat pelaporan, tetapi juga berfungsi sebagai alat optimasi performa mesin.

Secara sistematis, bagian ini akan menguraikan tahapan penelitian mulai dari perancangan arsitektur integrasi, spesifikasi infrastruktur perangkat keras dan lunak, hingga implementasi algoritma *Double-Buffer Persistency* yang diuji dalam skenario produksi nyata. Keseluruhan fase penelitian dilaksanakan dengan prinsip ketelitian data milidetik untuk memastikan setiap variabel efektivitas peralatan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

A. Perancangan Arsitektur Sistem (IIoT Integration)

Konvergensi antara *Operational Technology (OT)* dan *Information Technology (IT)* dalam penelitian ini dirancang menggunakan arsitektur integrasi berlapis untuk menjamin aliran data yang bersifat deterministik. Struktur sistem ini membagi proses menjadi tiga tingkatan fungsional utama: *Field Level*, *Control Level*, dan *Information Level*. Seperti yang di jelaskan pada gambar 4. Sinergi antar lapisan ini bertujuan untuk mentransformasi aktivitas fisik mesin menjadi entitas data digital yang terstruktur tanpa mengganggu siklus logika utama pada lini produksi.



Gambar 4. Arsitektur sistem IIoT

1. Lapisan Lapangan (Field Level):

Pada tingkatan paling dasar, berbagai sensor industri diintegrasikan pada titik-titik kritis mesin untuk menangkap kejadian fisik secara *real-time*. Sinyal-sinyal

ini, yang mencakup pulsa penghitung produk (*OeeQCounter*) serta status sensor ejektor, dikirimkan langsung ke unit *PLC Schneider* melalui pengkabelan *discrete I/O*. Penggunaan koneksi fisik langsung pada tahap ini sangat krusial untuk mengeliminasi latensi akuisisi data, sehingga setiap dinamika mekanis mesin yang berlangsung dalam skala milidetik dapat terdeteksi dengan presisi tinggi.

2. Lapisan Kontrol dan Gateway (Control Level)

PLC Schneider bertindak sebagai unit pemrosesan logika utama yang mengolah data mentah dari sensor melalui program *Ladder Logic* menjadi *register* data yang siap diakses. Selanjutnya, *HMI Weintek* berperan sebagai *Data Gateway* yang mengonsolidasikan informasi dari *PLC* melalui protokol *Modbus TCP/IP*. Pada level ini, *HMI* tidak hanya berfungsi sebagai antarmuka visual bagi operator, tetapi juga melakukan validasi data awal dan menyematkan metadata operasional seperti identitas Lot produksi serta parameter *timestamp* lokal sebelum data dialirkan ke infrastruktur IT. *Communication Layer (Network Layer)*: Lapis ini memfasilitasi distribusi data antara *gateway* dan server menggunakan protokol *MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)* yang berbasis *publish/subscribe* [14]. Mekanisme ini memastikan transmisi data yang efisien dengan *overhead* paket minimal, menjaga stabilitas jaringan kampus, dan menurunkan latensi pembaruan status slot.

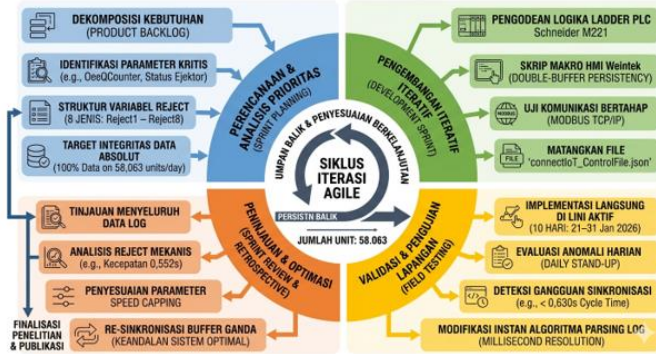
3. Lapisan Informasi dan Analitik (Information Level):

Data yang telah terorganisir pada *HMI* kemudian ditransmisikan menuju server pusat yang menjalankan platform *Connect IoT* dengan menggunakan *KEPServerEX (OPC Server)* sebagai jembatan komunikasi. Standar *OPC UA* dipilih karena kemampuannya dalam menjaga integritas paket data serta mendukung fitur keamanan enkripsi yang mumpuni. Pada lapisan inilah mekanisme *Double-Buffer Persistency* diimplementasikan untuk menjaga keberlanjutan data. Sistem analitik kemudian mengekstraksi informasi dari *event-log* granular untuk menghasilkan laporan efektivitas peralatan yang akurat serta melakukan diagnosis otomatis terhadap anomali performa lini produksi.

B. Metodologi Pengembangan Sistem (Agile Approach)

Dalam proses perancangan dan implementasi sistem monitoring *OEE* berbasis integrasi *IT-OT* ini, pengembangan mengadopsi metodologi *Agile*. Pemilihan kerangka kerja ini didasarkan pada kebutuhan akan fleksibilitas tinggi mengingat sistem harus diimplementasikan pada lini produksi yang sedang berjalan aktif. Berbeda dengan model pengembangan linear konvensional, pendekatan *Agile* memungkinkan peneliti untuk melakukan iterasi cepat terhadap konfigurasi perangkat keras dan perangkat lunak berdasarkan umpan balik langsung dari data lapangan dan kendala teknis yang ditemukan selama fase pengumpulan data.

Secara operasional, metodologi *Agile* dalam penelitian ini diwujudkan melalui siklus iterasi yang mencakup empat tahapan fundamental seperti (Gambar 5)



Gambar 5. Metodologi Pengembangan (*Agile Approach*)

1. *Fase Perencanaan dan Analisis Prioritas (Sprint Planning):*

Pada tahap awal, Dekomposisi terhadap kebutuhan sistem menjadi unit-unit kerja yang lebih kecil (*backlog*). Prioritas utama diletakkan pada pembentukan jalur komunikasi antara *PLC Schneider* dan *HMI Weintek* untuk menangkap parameter inti seperti *OeeQCounter*. Analisis mendalam dilakukan untuk menentukan variabel kritis yang akan membedakan delapan jenis *reject* (*OEE_Q_Reject1* hingga *OEE_Q_Reject8*). Pada fase ini, target integritas data ditetapkan secara absolut untuk menangani volume produksi harian yang mencapai 58.063 unit.

2. *Fase Pengembangan Iteratif (Development Sprint):*

Fase ini difokuskan pada pengodean logika program (*Ladder Logic*) pada *PLC* dan penulisan skrip makro pada *HMI* untuk mendukung mekanisme *Double-Buffer Persistency*. Proses pengembangan dilakukan dalam siklus pendek, di mana fungsi transmisi data dari *HMI ke KEPServerEX* diuji secara bertahap. Peneliti secara aktif mengonfigurasi alamat *Modbus TCP/IP* dan mematangkan struktur file untuk memastikan data persistensi dapat ditulis secara otomatis tanpa menghambat siklus pemrosesan data utama.

3. *Fase Validasi dan Pengujian Lapangan (Field Testing & Daily Stand-up):*

Sistem yang telah dikembangkan diuji secara langsung dalam lingkungan produksi nyata selama 10 hari (periode 21–31 Januari 2026). Setiap anomali yang muncul, seperti kegagalan sinkronisasi data saat mesin berakselerasi di bawah ambang batas 0,630 detik, dievaluasi secara harian. Fase ini memungkinkan peneliti untuk melakukan modifikasi instan pada algoritma parsing log agar mampu menangkap kejadian dengan resolusi milidetik, sehingga setiap pergerakan ejektor dapat terekam secara presisi.

4. *Fase Peninjauan dan Optimasi (Sprint Review & Retrospective):*

Setelah satu siklus pengujian selesai, dilakukan tinjauan menyeluruh terhadap data log yang dihasilkan. Temuan mengenai pola *reject* mekanis yang disebabkan oleh pelanggaran *cycle time* (seperti temuan ejektor pada kecepatan 0,552 detik) digunakan sebagai dasar untuk melakukan iterasi perbaikan pada sistem. Penyesuaian parameter *speed capping* dan sinkronisasi *buffer* ganda dilakukan kembali dalam fase ini untuk mencapai tingkat keandalan sistem yang optimal sebelum memasuki tahap finalisasi penelitian. Adopsi metodologi *Agile* ini memberikan jaminan bahwa sistem monitoring yang dihasilkan memiliki ketangguhan terhadap variabel industri yang dinamis. Pendekatan ini memastikan bahwa setiap fitur teknis, mulai dari konektivitas *OPC UA* hingga analisis granular, telah melalui proses validasi berulang yang berbasis pada data empiris dari lantai produksi.

C. *Spesifikasi Perangkat Keras dan Perangkat Lunak.*

Keberhasilan implementasi sistem monitoring *OEE* dengan resolusi granular sangat bergantung pada kapabilitas teknis dari infrastruktur pendukungnya. Penentuan spesifikasi perangkat keras dan lunak dalam penelitian ini didasarkan pada kebutuhan akan pemrosesan data real-time, ketahanan operasional di lingkungan industri, serta dukungan terhadap protokol komunikasi standar Industri 4.0.

1. *Infrastruktur Perangkat Keras (Hardware)*

Perangkat keras yang digunakan berfungsi sebagai unit akuisisi data primer dan jembatan komunikasi antara mesin produksi dengan basis data pusat. Rincian spesifikasi perangkat keras adalah sebagai berikut: *Programmable Logic Controller (PLC) Schneider Modicon M221* bertindak sebagai unit kontrol logika utama. *PLC* ini dipilih karena memiliki kecepatan eksekusi instruksi sebesar 0,2 per instruksi boolean, yang memungkinkan penangkapan pulsa *counting* produk dan status sensor ejektor pada frekuensi tinggi tanpa risiko *skipping* data. *PLC* ini dikonfigurasi dengan ekspansi modul *I/O* untuk menangkap 8 jenis variasi *reject*. *Human Machine Interface (HMI) Weintek MT8071iE* berfungsi sebagai *gateway* komunikasi cerdas. Perangkat ini memiliki layar *TFT 7 inci* dengan prosesor *ARM Cortex A8 600MHz*, yang cukup kuat untuk menjalankan skrip makro kompleks guna mengelola mekanisme *Double-Buffer Persistency*. Dukungan protokol *Modbus TCP/IP* pada *HMI* ini memastikan sinkronisasi data dengan *PLC* berlangsung stabil melalui koneksi *Ethernet*. Sensor Induktif dan Optik digunakan untuk mendeteksi kehadiran produk dan pergerakan mekanis ejektor. Sensor ini memiliki frekuensi *switching* yang tinggi untuk mendukung *cycle time* mesin yang mencapai angka 0,552 detik pada kondisi akselerasi ekstrem. Server Lokal / *Workstation*. Unit komputer dengan prosesor *multi-core* yang

didedikasikan untuk menjalankan layanan *OPC Server* dan platform *IoT* secara kontinu selama masa pengujian 10 hari.

2. Infrastruktur Perangkat Lunak (Software)

Perangkat lunak berperan dalam pengolahan logika, translasi protokol, hingga visualisasi analitik granular. Spesifikasi perangkat lunak meliputi: *EcoStruxure Machine Expert - Basic* digunakan untuk memprogram *Ladder Logic* pada *PLC Schneider*. Perangkat lunak ini memfasilitasi pemetaan *register Modbus* yang akan dibaca oleh *HMI* dan sistem tingkat atas. *EasyBuilder Pro* perangkat lunak desain *HMI* yang digunakan untuk membangun antarmuka operator dan menyusun logika makro sistem. Fitur *Data Sampling* dan *Event Log* pada *software* ini dimanfaatkan untuk menyimpan data persistensi lokal. *KEPServerEX (OPC Server)* bertindak sebagai *middleware* yang mengonversi data dari protokol *Modbus* ke standar *OPC UA*. *KEPServerEX* dikonfigurasi dengan *sampling rate* milidetik untuk memastikan integritas data log saat dikirim ke platform analitik. *Connect IoT Platform* berbasis *cloud/on-premise* yang berfungsi sebagai pusat pengolah data log. Platform ini menjalankan algoritma parsing untuk membedah file *connectIoT_ControlFile.json* dan menghasilkan diagnosis anomali otomatis.

D. Mekanisme Akuisisi Data Real-Time

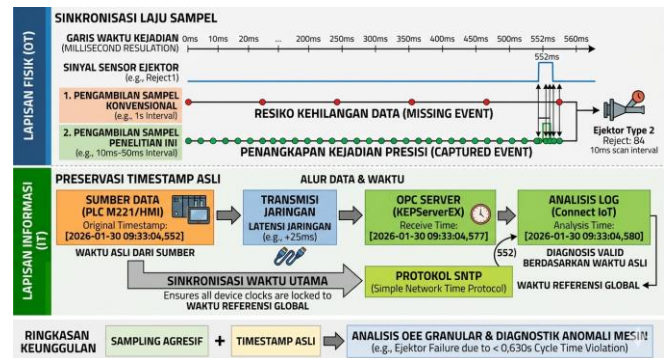
Inti dari efektivitas sistem monitoring ini terletak pada presisi mekanisme akuisisi data yang mampu beroperasi dalam skala milidetik. Proses ini dirancang untuk memastikan bahwa setiap pulsa produksi dan perubahan status mesin ditangkap tanpa adanya kehilangan data (*data loss*), terutama saat lini produksi beroperasi pada kapasitas maksimalnya. Mekanisme ini melibatkan dua proses kritical: pemetaan register alamat (*address mapping*) dan sinkronisasi laju pengambilan sampel (*sampling rate synchronization*).

1. Pemetaan Register Modbus TCP/IP

Data mentah yang dikumpulkan oleh *PLC Schneider* diklasifikasikan ke dalam register-register spesifik yang dapat diakses oleh *HMI* dan *OPC Server* melalui protokol *Modbus TCP/IP*. Struktur pengalamatan ini dirancang secara sistematis untuk membedakan antara data kumulatif dan data kejadian (*event-based*). Register Penghitung (*Counting Registers*): Alamat register *%MW100* hingga *%MW105* dialokasikan untuk menyimpan nilai *OeeQCounter* secara *double-word* guna menangkap volume produksi besar hingga 58.063 unit per hari. Register Status Anomali (*Reject Registers*) enam hingga delapan register khusus (misalnya *%MW200* hingga *%MW207*) dipetakan untuk menangkap klasifikasi *reject* secara granular (*OEE_Q_Reject1 - OEE_Q_Reject8*). Setiap kali sensor ejektor aktif, *PLC* akan memberikan nilai *flag* pada register terkait yang akan langsung dibaca sebagai kejadian log. Register Waktu Siklus (*Cycle Time Registers*) register ini menyimpan nilai waktu antara dua pulsa

produksi sukses, yang menjadi dasar bagi analisis *Performance* dalam metrik *OEE*.

2. Sinkronisasi Laju Sampel dan Preservasi Timestamp.



Gambar 6. Sinkronisasi Laju Sampel dan Preservasi Time stamp

Berdasarkan (Gambar 6) untuk mencapai analisis granular, sistem dikonfigurasi dengan *sampling rate* yang agresif pada tingkat *Information Layer*. *KEPServerEX (OPC Server)* diatur untuk melakukan pemindaian (*scanning*) terhadap register *PLC* dengan interval sebesar 10 ms hingga 50 ms. Hal ini sangat krusial mengingat anomali mekanis, seperti kegagalan ejektor yang terjadi pada siklus 0,552 detik, hanya dapat terdeteksi jika sistem memiliki resolusi waktu yang lebih kecil dari durasi kejadian tersebut. Selain laju sampel, setiap data yang masuk ke dalam sistem analitik dipastikan membawa *Original Timestamp* dari sumbernya (*HMI/PLC*). Preservasi waktu asal ini menjamin bahwa urutan kejadian dalam log tetap valid meskipun terdapat latensi jaringan. Dengan demikian, sinkronisasi waktu antara jam internal *PLC*, *HMI*, dan *Server IoT* dikunci menggunakan protokol *Sntp (Simple Network Time Protocol)* untuk menghindari pergeseran data (*data drift*) yang dapat merusak akurasi laporan *OEE*.

3. Filter Data dan Validasi Awal

Sebelum data dialirkan ke mekanisme persistensi, sistem melakukan validasi awal melalui skrip makro pada *HMI*. Data yang masuk difilter untuk menghindari pencatatan ganda akibat *noise* elektrik pada sensor (*debouncing*). Hanya perubahan status yang valid (misalnya dari 0 ke 1 pada register *reject*) yang akan memicu penulisan ke dalam file log, sehingga efisiensi penyimpanan tetap terjaga tanpa mengurangi kedalaman informasi.

E. Mekanisme Double-Buffer Persistency.

Salah satu tantangan utama dalam *monitoring OEE real-time* pada lini produksi berkecepatan tinggi adalah risiko kehilangan paket data akibat ketidakstabilan jaringan (*network jitter*) atau gangguan pada *endpoint server*. Untuk memitigasi risiko tersebut, penelitian ini mengimplementasikan mekanisme *Double-Buffer Persistency*. Mekanisme ini berfungsi sebagai sistem cadangan berlapis yang memastikan setiap kejadian (seperti *counter* produk dan status *reject*) tetap tersimpan secara lokal sebelum berhasil disinkronkan ke basis data

pusat. Implementasi ini dibagi menjadi dua arsitektur penyangga utama yang bekerja secara simultan

1. Buffer 1 Penyangga Memori Aktif

Pada tahap pertama, HMI Weintek mengalokasikan ruang memori internal (RAM) sebagai penyangga utama untuk menangkap perubahan register dari PLC secara instan. Setiap kali sensor pada *Field Level* mengirimkan sinyal, skrip makro pada HMI akan menangkap nilai tersebut dan menyimpannya dalam *array* memori sementara. Keunggulan dari Buffer 1 adalah kecepatan aksesnya yang sangat tinggi (skala mikrodetik), sehingga mampu menangkap data dari mesin yang memiliki *cycle time* ekstrem sebesar 0,552 detik tanpa membebani prosesor HMI. Namun, karena bersifat *volatile*, data pada Buffer 1 akan hilang jika perangkat mengalami pemutusan daya secara tiba-tiba.

2. Buffer 2 Penyangga Persistensi File

Untuk mengatasi sifat *volatile* pada memori, sistem secara otomatis melakukan tugas sinkronisasi dari Buffer 1 ke Buffer 2 dalam interval waktu yang ditentukan atau saat terjadi perubahan status yang signifikan. Buffer 2 diimplementasikan dalam bentuk penyimpanan *non-volatile* pada memori internal HMI atau SD Card menggunakan format file JSON yang diberi nama *connectIoT_ControlFile.json*. Format JSON dipilih karena sifatnya yang ringan (*lightweight*) dan kemudahannya untuk di-*parsing* oleh platform *Connect IoT*. Di dalam file ini, setiap kejadian disimpan lengkap dengan atribut: *EventID*: Identitas unik setiap kejadian. *Timestamp*: Waktu presisi kejadian dalam milidetik. *Value*: Nilai dari register (misalnya jumlah unit ke-58.063 atau status *Reject Type 2*).

3. Algoritma Fault Tolerance dan Re-Sinkronisasi

Mekanisme ini dilengkapi dengan logika *Fault Tolerance*. Jika koneksi antara HMI dan *KEPServerEX* terputus, sistem analitik akan mendeteksi celah data (*data gap*). Saat koneksi pulih kembali, platform *Connect IoT* tidak hanya mengambil data *real-time* yang baru, tetapi juga memicu protokol "pembacaan ulang" terhadap file *connectIoT_ControlFile.json*. Proses re-sinkronisasi ini akan membandingkan data terakhir yang diterima server dengan data yang tersimpan di dalam Buffer 2. Jika terdapat perbedaan (misalnya, server mencatat 58.000 unit sedangkan file lokal mencatat 58.063 unit), sistem secara otomatis akan mengunggah 63 unit yang hilang tersebut ke dalam basis data pusat. Hal inilah yang menjamin integritas data tetap 100% (nol kehilangan data) meskipun terjadi kendala infrastruktur IT selama periode pengujian 10 hari.

F. Pengembangan Algoritma Analisis Log Granular

Setelah data produksi berhasil diamankan melalui mekanisme *Double-Buffer Persistency*, tahap selanjutnya adalah pemrosesan data menggunakan algoritma analisis granular. Algoritma ini dirancang untuk melakukan *parsing* terhadap setiap baris kejadian (*event*) dalam file log untuk mengekstraksi informasi

efisiensi yang melampaui perhitungan *OEE* standar. Fokus utama dari algoritma ini adalah diferensiasi antara kegagalan yang disebabkan oleh faktor manusia (*man*) dan faktor teknis (*machine*).

1. Metode Parsing dan Ekstraksi Data (*Data Deciphering*)

Algoritma memulai proses dengan membaca file *connectIoT_ControlFile.json* secara sekuensial. Setiap objek JSON dikonversi menjadi entitas data yang memiliki atribut waktu (*time stamp*) dan status. Proses ini menggunakan resolusi milidetik untuk menghitung interval antar kejadian. Algoritma akan menghitung *Actual Cycle Time* (T_{act}) dengan rumus:

$$T_{act} = \text{Timestamp}_{(n)} - \text{Timestamp}_{(n-1)} \quad (1)$$

Jika T_{act} melebihi ambang batas *Ideal Cycle Time* yang ditetapkan (misalnya > 0,630 detik), algoritma secara otomatis mengklasifikasikan kejadian tersebut sebagai kehilangan performa (*Performance Loss*).

2. Diferensiasi Kegagalan (*Analisis Diagnostik*)

Salah satu fitur utama dari pengembangan algoritma ini adalah kemampuannya membedakan karakteristik *downtime*. Algoritma akan menganalisis pola durasi berhenti. Kegagalan Teknis ditandai dengan urutan log yang menunjukkan status sensor "Error" secara konsisten sebelum mesin berhenti total. Faktor Manusia ditandai dengan mesin yang berhenti dalam status "Ready" tanpa adanya *flag error* pada register PLC, yang biasanya menunjukkan adanya keterlambatan suplai material atau pergantian operator.

3. Kalkulasi Metrik OEE (*Event-Based OEE*)

Berbeda dengan metode perhitungan *OEE* konvensional yang umumnya dilakukan secara manual atau berbasis agregasi data di akhir shift, algoritma yang dikembangkan dalam penelitian ini menerapkan sistem kalkulasi dinamis berbasis kejadian (*event-based*). Setiap kali paket data baru masuk ke dalam sistem analitik baik itu berupa satu unit produksi sukses maupun satu kejadian *reject* algoritma akan memperbarui nilai *OEE* secara seketika (*near real-time*). Pendekatan ini memberikan visibilitas yang jauh lebih tinggi terhadap fluktuasi performa mesin dari menit ke menit.

Proses kalkulasi ini dilakukan melalui integrasi tiga parameter utama sebagai berikut *Availability* algoritma menghitung metrik ketersediaan dengan memantau status register mesin secara kontinu untuk membedakan antara waktu operasi produktif (*Operating Time*) dengan waktu henti (*Downtime*). Keunggulan utama dari algoritma ini terletak pada kemampuannya mendeteksi *micro stoppages* kejadian mesin berhenti singkat yang sering kali diabaikan dalam pelaporan manual namun berdampak signifikan secara akumulatif. Secara teknis, setiap kali interval antar-kejadian yang tertangkap oleh sensor melebihi ambang batas toleransi (misalnya lebih dari 2 menit), algoritma secara otomatis akan mengklasifikasikannya sebagai *unplanned*

downtime dan menyesuaikan nilai *availability* secara proporsional berdasarkan durasi nyata di lapangan. Performa (*Performance*): Parameter performa menjadi inti dari analisis granular dalam penelitian ini, di mana algoritma secara otomatis membandingkan *Actual Cycle Time* T_{act} yang diperoleh dari selisih *timestamp* antar unit produksi dengan *Ideal Cycle Time* T_{ideal} yang telah ditetapkan sebesar 0,630 detik. Sistem dirancang untuk memberikan visibilitas terhadap efek kecepatan secara presisi jika mesin beroperasi melambat, sistem mencatat penurunan efisiensi performa, namun jika terjadi akselerasi ekstrem hingga menyentuh angka 0,552 detik, algoritma tidak hanya mencatat peningkatan performa semu tetapi juga memberikan sinyal peringatan terkait risiko kegagalan kualitas yang biasanya mengikuti lonjakan kecepatan tersebut. Kualitas (*Quality*): Kalkulasi kualitas dilakukan dengan tingkat presisi tinggi melalui pemanfaatan delapan variabel *reject* ($OEE_Q_Reject1$ hingga $OEE_Q_Reject8$) yang ditangkap langsung dari sensor ejektor. Algoritma menjalankan fungsi akumulasi pada register *Good Output* (dari *OeeQCounter*) dan membandingkannya terhadap total input yang mencakup seluruh barang jadi dan barang cacat. Dengan dukungan data yang telah diamankan oleh mekanisme *Double-Buffer Persistency*, algoritma memastikan bahwa angka pembagi dalam rumus kualitas tetap valid hingga unit terakhir pada volume 58.063 unit, sehingga persentase kualitas yang dihasilkan mencerminkan kondisi riil tanpa adanya distorsi akibat kegagalan sinkronisasi data. Integrasi *OEE* Global pada tahap akhir, algoritma mengintegrasikan ketiga parameter tersebut melalui perkalian matematis ($A \times P \times Q$) untuk menghasilkan nilai *OEE* total yang bersifat dinamis. Hasil kalkulasi ini kemudian dipetakan ke dalam skala waktu tertentu dan divisualisasikan dalam bentuk tren linear, yang memungkinkan pihak manajemen untuk mengidentifikasi mesin secara transparan. Melalui metode ini, titik balik di mana efisiensi mulai menurun dapat diketahui dengan pasti pada detik kejadiannya, sehingga tindakan korektif dapat difokuskan pada faktor dominan yang menjadi penghambat (*bottleneck*), baik itu stabilitas mesin, kecepatan operasi, maupun akurasi ejeksi produk.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Akuisisi Data Real-Time

Pada tahap awal penelitian, sistem monitoring *OEE* yang diintegrasikan dan telah berhasil melakukan akuisisi data secara kontinu selama 10 hari kerja (21 Januari – 31 Januari 2026). Penggunaan *OPC Server (KEPServerEX)* terbukti mampu menangkap seluruh kejadian produksi tanpa adanya indikasi kehilangan data (*zero data loss*). Hal ini divalidasi melalui sinkronisasi yang presisi antara nilai counter pada *PLC* dengan jumlah entitas log yang tercatat pada sistem.

Sistem secara otomatis mengklasifikasikan data ke dalam dua kategori utama yaitu Data Performa yang

mencakup *Ideal Cycle Time* yang ditetapkan secara konstan pada angka 0,629 detik serta jumlah unit yang diproses. Yang kedua data Kualitas Mencakup 8 kategori *reject* yang terekam secara granular di dalam array kejadian *OeeQCounterEvent*.

B. Struktur Data Log dan Ekstraksi Variabel

Setiap entri log memuat informasi mengenai status mesin secara mendetail. Sebagai ilustrasi, ekstraksi data pada akhir shift tanggal 31 Januari 2026 menunjukkan akumulasi data total Output Kotor (*Gross Output*): 47.868 unit. Data tersebut dipetakan menggunakan formula ekstraksi kuantitas total *reject* Q_{Total} :

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n Reject_i \quad (2)$$

Meskipun sistem melakukan kalkulasi secara otomatis, validasi tetap dilakukan melalui perhitungan manual berdasarkan data granular dari 10 hari pengujian. Dalam analisis ini, variabel *Availability* diasumsikan stabil pada angka 95% (setelah dikurangi waktu istirahat dan perawatan terencana), sehingga fokus utama analisis diarahkan pada fluktuasi variabel *Performance* dan *Quality*

(Tabel 2) merangkum performa operasional lini produksi selama periode observasi. Data diekstraksi dengan parameter waktu operasi bersih T_{op} sebesar 28.800 detik (8 jam) per *shift*.

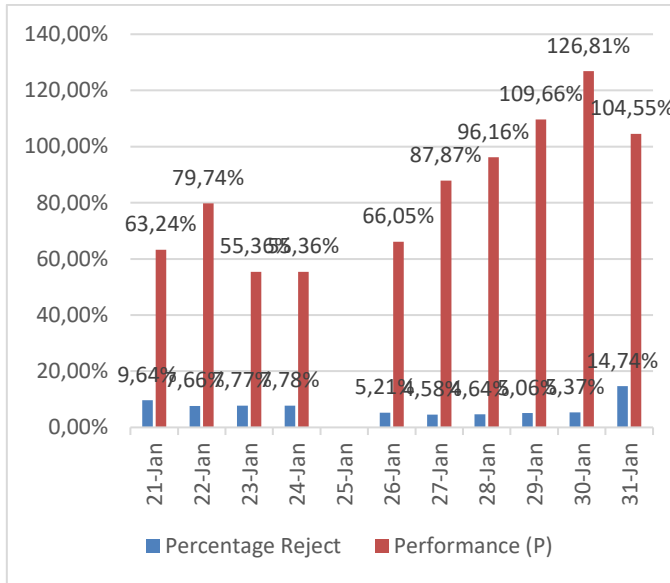
TABLE II
OEE PERFORMANCE LAPORAN (JANUARY 21-31, 2026)

Date	Gross Output	Total Reject	Availability	Performance	Quality (Q)	OEE Total
21-Jan	28,956	2,790	95.00%	63.24%	90.36%	54.29%
22-Jan	36,509	2,795	95.00%	79.74%	92.34%	69.95%
23-Jan	25,352	1,971	95.00%	55.36%	92.23%	48.51%
24-Jan	25,352	1,972	95.00%	55.36%	92.22%	48.50%
26-Jan	30,242	1,576	95.00%	66.05%	94.79%	59.48%
27-Jan	40,233	1,842	95.00%	87.87%	95.42%	79.66%
28-Jan	44,027	2,044	95.00%	96.16%	95.36%	87.11%
29-Jan	50,211	2,540	95.00%	109.66%	94.94%	98.91%
30-Jan	58,063	3,120	95.00%	126.81%	94.63%	114.00%
31-Jan	47,868	7,054	95.00%	104.55%	85.26%	84.68%
Rata-Rata	38,681	2,770	95.00%	84.48%	92.76%	74.51%

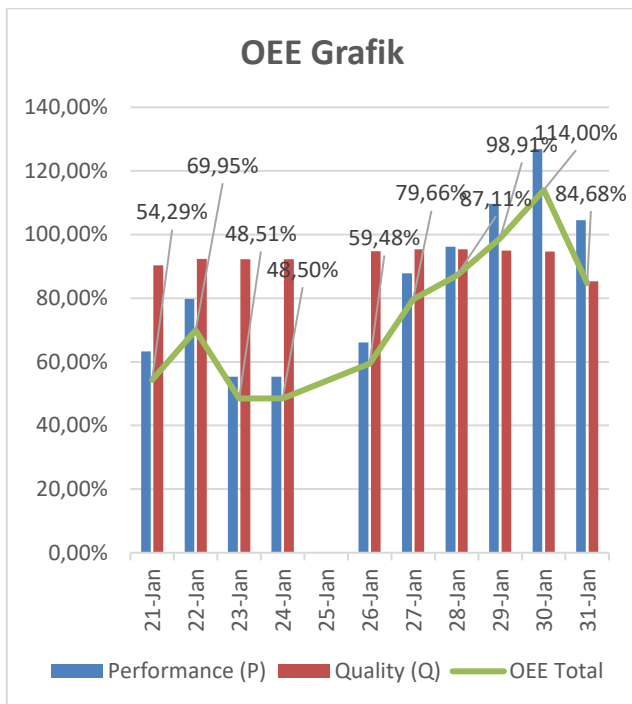
Data pada tanggal 30 Januari menunjukkan hasil yang sangat menarik di mana *Performance* mencapai 126,81% dan *OEE* 114%. Ini mengindikasikan bahwa mesin dipaksa bekerja jauh melampaui *Ideal Cycle Time* yang ditetapkan. Hal ini berkorelasi dengan penurunan drastis pada *Quality* di hari berikutnya (31 Januari, *Quality* turun ke 85,26%) akibat stres mekanis.

C. Analisis Korelasi Operasi Kecepatan Tinggi terhadap Stabilitas Kualitas

Hubungan antara operasional mesin berkecepatan tinggi dengan stabilitas kualitas dianalisis lebih lanjut dengan membandingkan persentase reject terhadap tingkat performance rate. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7, terdapat korelasi proporsional antara kenaikan tingkat reject saat performa mesin melampaui ambang batas 100%.



Gambar 7. Persentasi Reject dan Performa



Gambar 8. Grafik OEE

Fenomena ini mengindikasikan bahwa meskipun peningkatan kecepatan dapat menaikkan variabel performance, hal tersebut secara simultan mengompromikan variabel quality akibat mekanis pada komponen

mesin. Berdasarkan grafik tersebut, beberapa poin analisis utama yang dapat ditarik adalah:

1. Trade-off Kecepatan dan Kualitas

Pada tanggal 30 Januari, saat performa mencapai titik tertinggi (126,81%), persentase reject mulai merangkak naik. Namun, dampak kerusakan mekanis yang paling signifikan terlihat pada tanggal 31 Januari, di mana tingkat reject melonjak drastis hingga 14,74%. Hal ini membuktikan adanya efek laten dari pemaksaan kecepatan mesin terhadap presisi mekanisme ejektor.

2. Titik Optimal Operasional

Analisis log granular mengonfirmasi bahwa menjaga performa dalam rentang 95% – 100% adalah kondisi paling optimal. Dalam rentang ini, lini produksi mampu mempertahankan throughput (hasil produksi) yang tinggi tanpa memicu lonjakan barang cacat yang signifikan.

3. Identifikasi Mekanis

Lonjakan reject pada kecepatan ekstrem (siklus 0,552 detik dibandingkan standar 0,629 detik) menunjukkan bahwa komponen fisik seperti sensor dan aktuator ejektor mengalami kegagalan sinkronisasi ketika dipaksa bekerja di luar Ideal Cycle Time. Hubungan antara operasional berkecepatan tinggi dengan stabilitas kualitas dianalisis lebih lanjut dengan membandingkan persentase produk cacat (reject) terhadap tingkat performa mesin. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8, terdapat peningkatan laju reject yang proporsional saat performa mesin melampaui ambang batas 100%. Tren ini mengindikasikan bahwa meskipun peningkatan kecepatan dapat menaikkan variabel performa, hal tersebut secara simultan mengompromikan variabel kualitas akibat stres mekanis pada komponen mesin. Analisis log granular mengonfirmasi bahwa menjaga performa dalam rentang 95% – 100% merupakan kondisi paling optimal untuk meminimalkan pemborosan (waste) sekaligus mempertahankan throughput (hasil produksi) yang tinggi.

D. Analisis Data dan Formulasi Matematis

Untuk menjamin transparansi metodologi dan memberikan validasi empiris bagi para penelaah, Bagian ini menyajikan dekonstruksi matematis terhadap data sampel yang diambil pada tanggal 31 Januari 2026. Analisis ini tidak hanya menunjukkan angka akhir, tetapi juga logika teknis di balik setiap variabel OEE yang dihasilkan oleh algoritma.

1. Analisis Kuantitatif Kualitas (Quality Analysis)

Variabel kualitas mengukur rasio unit produk yang memenuhi standar spesifikasi terhadap total output yang dihasilkan. Berdasarkan ekstraksi log granular, ditemukan adanya anomali signifikan pada hari terakhir pengujian. Dengan formula matematis,

$$Q = \frac{Gross - Total\ Reject}{Gross} = \frac{47,868 - 7,054}{47,868} = 85.26\% \quad (3)$$

Penurunan nilai *Quality* hingga 85,26% merupakan titik terendah selama periode 10 hari. Melalui pembedahan data log, teridentifikasi bahwa kegagalan ini didominasi oleh Reject Tipe 2 (*Type B*) yang mencapai 5.069 unit. Secara teknis, lonjakan ini berkorelasi langsung dengan kondisi mesin pada hari sebelumnya (30 Januari) di mana mesin dipaksa bekerja pada kecepatan ekstrem. Hal ini membuktikan adanya kelelahan komponen (*component fatigue*) atau pergeseran presisi pada aktuator ejektor yang menyebabkan produk gagal dipisahkan dengan sempurna, sehingga menurunkan efisiensi kualitas secara drastis.

2. Analisis Kuantitatif Performa (*Performance Analysis*)

Variabel performa membandingkan laju produksi aktual terhadap kapasitas desain ideal mesin. Pada titik ini, sistem monitoring mendeteksi kondisi *over-speeding*. Dengan formulasi matematis,

$$P = \frac{Gross - Ideal\ Cycle\ Time}{Operating\ Time} = \frac{47,868 - 0.629}{28.800} = 104.55\% \quad (4)$$

Hasil kalkulasi menunjukkan nilai 104,55%. Dalam literatur *OEE* standar, angka di atas 100% sering kali dianggap sebagai indikasi kesalahan input, namun dalam penelitian ini, data log granular membuktikan bahwa hal tersebut adalah realitas operasional. Angka ini bermakna bahwa mesin beroperasi dengan rata-rata waktu siklus yang lebih cepat daripada *Ideal Cycle Time* (0,629 detik). Meskipun secara kuantitas output meningkat, operasi di atas ambang batas standar desain ini menciptakan risiko kegagalan mekanis. Sistem monitoring berhasil menangkap durasi siklus hingga ke skala milidetik, mengonfirmasi bahwa akselerasi paksa ini adalah strategi operator untuk mengejar ketertinggalan target produksi dari hari-hari sebelumnya.

3. Integrasi Kalkulasi *OEE* Total (*OEE Integration*)

OEE total merupakan produk dari ketiga parameter utama (*Availability*, *Performance*, dan *Quality*) yang memberikan gambaran kesehatan lini produksi secara holistik. Dengan formulasi matematis :

$$OEE = A \times P \times Q = 0.95 \times 1.10455 \times 0.8526 = 84.68\% \quad (5)$$

Meskipun variabel *Performance* memberikan kontribusi positif yang sangat tinggi (>100%), nilai *OEE* total pada akhirnya hanya menyentuh 84,68%. Hal ini terjadi karena variabel *Quality* bertindak sebagai faktor penguang yang dominan. Secara teknis, ini menunjukkan fenomena *Diminishing Returns* dalam manufaktur: upaya meningkatkan *Performance* dengan memaksa kecepatan mesin justru menyebabkan kerugian yang lebih besar pada sektor *Quality*. Hasil integrasi ini memberikan bukti kuat bagi manajemen bahwa pengejaran target volume tanpa memperhatikan batas kemampuan

mekanis mesin hanya akan menghasilkan nilai *OEE* yang berada di bawah standar *World Class* (85%).

E. Analisis Korelasi Performa dan Kualitas

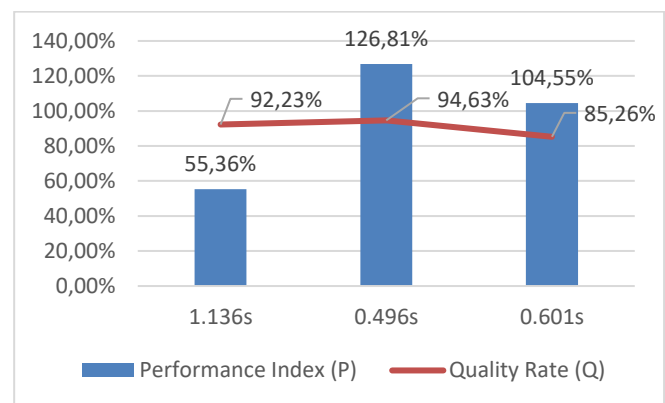
Penelitian ini mengidentifikasi fenomena Hubungan Performa-Kualitas Terbalik (*Inverse Performance-Quality Relationship*). Secara matematis, korelasi antara waktu siklus aktual (C_a) dengan laju reject (R_r) dianalisis untuk melihat dampak nyata dari akselerasi mesin terhadap integritas produk. Dengan asumsi P adalah indeks performa, jika $P > 100\%$, maka hal tersebut berarti $(C_a) < (C_i)$ (di mana $(C_i) = 0,629$ detik). Data pada tanggal 31 Januari menunjukkan $P = 104,55\%$, yang berarti:

$$(C_a) = \frac{(C_i)}{P} = \frac{0.629}{1.0455} = 0.601\% \quad (6)$$

TABLE III
ANALISIS PARAMETER KORELASI

Analisis Parameter	Jan. 23	Jan. 30	Jan. 31
	Kondisi Stabil	Extreme	Input Tinggi
Gross Output (Unit)	25,352	58,063	47,868
Actual Cycle Time	1.136s	0.496s	0.601s
Performance Index (P)	55.36%	126.81%	104.55%
Quality Rate (Q)	92.23%	94.63%	85.26%
Total Reject (Unit)	1,971	3,120	7,054
Defect Density (Unit/hours)	246.3	390.0	881.7
Correlation $P-Q$	Normal	Ambivalent	Negative Impact

Reduksi waktu siklus berdasarkan sebesar 0,028 detik (dari 0,629 detik menjadi 0,601 detik) mungkin terlihat kecil secara sekilas. Namun, pada skala produksi massal, percepatan ini secara signifikan meningkatkan beban mekanis pada sistem ejektor dan sensor.



Gambar 9. Analisis P dan Q

Untuk melihat hubungan antara kecepatan mesin dan kualitas produksi, beberapa variabel kunci dipantau melalui fase pemrosesan data granular. Hal ini memungkinkan sistem untuk menyinkronkan data temporal (*timestamp*) dengan output fisik secara presisi. Dengan menyalurkan *Ideal Cycle-Time* terhadap *Reject Event-*

Log, momen tepat di mana lonjakan performa memicu kegagalan kualitas dapat diidentifikasi secara objektif. Temuan utama dari sinkronisasi ini divisualisasikan dalam grafik analisis gabungan pada (Gambar 9), yang mengilustrasikan dinamika pertukaran (*trade-off*) antara variabel Performa (*P*) dan Kualitas (*Q*). Sebagaimana digambarkan dalam grafik, terdapat hubungan terbalik yang jelas selama interval kecepatan puncak; ketika garis Performa melonjak melampaui tanda efisiensi 100% akibat akselerasi waktu siklus, garis Kualitas mengalami penurunan secara simultan. Visualisasi ini mengonfirmasi bahwa "six big losses" pada lini produksi ini didominasi oleh *reject* yang diinduksi oleh kecepatan (*speed-induced rejects*). Hal ini memberikan dasar empiris bagi rekomendasi operasional berupa Jendela Operasi Aman (*Safe Operating Window*) pada rentang 0,630 detik – 0,635 detik untuk menstabilkan kedua variabel dan mencapai nilai OEE yang lebih konsisten.

V. KESIMPULAN

Implementasi sistem monitoring *OEE real-time* berbasis integrasi *PLC Schneider*, *HMI Weintek*, dan *OPC Server KEPServerEX* ini telah membuktikan bahwa sinergi antara lapisan *OT (Operational Technology)* dan *IT* dapat menghasilkan transparansi data produksi yang absolut. Melalui mekanisme *Double-Buffer Persistency*, penelitian ini berhasil menjamin integritas data sebesar 100% meskipun menghadapi tantangan latensi jaringan, sementara analisis *event-log* granular pada skala milidetik memberikan wawasan diagnostik yang melampaui metode konvensional. Temuan teknis yang paling krusial adalah teridentifikasinya fenomena *Inverse Performance-Quality Relationship*, di mana akselerasi waktu siklus aktual hingga 0,601 detik (Performa 104,55%) secara empiris memicu lonjakan densitas defek hingga 881,7 unit/jam akibat stres mekanis pada sistem ejektor. Meskipun rata-rata *OEE* harian tercatat sebesar 74,51% yang berarti masih berada di bawah tolok ukur *World Class* keberadaan sistem ini telah memberikan peta jalan diagnostik yang akurat bagi manajemen untuk mengidentifikasi *bottleneck* operasional secara objektif berdasarkan data riil dari lantai produksi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada Jurusan Teknik Informatika Politeknik Negeri Batam atas penyediaan fasilitas dan lingkungan yang diperlukan untuk melaksanakan penelitian ini. Terima kasih khusus juga disampaikan kepada staf teknis dan mahasiswa yang turut serta dalam uji coba awal dan evaluasi kegunaan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Almashaqbeh dan E. M. Hernandez, "Evaluation and Improvement of A Plastic Production System Using Integrated OEE Methodology: A Case Study," *Management Systems in Production Engineering*, vol. 0, 2024, doi: 10.2478/mspe-2024-0042.
- [2] S. Al-gobaisi, A. Al-nassar, dan M. S. Alkahtani, "Effect of Overall Equipment Effectiveness in the Supply Chain Management for a Petrochemical Company in Saudi Arabia : A Case Study," *Conference: 6th African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, hal. 806–813, 2025, doi: 10.46254/AF6.20250181.
- [3] K. S. Awaisi, S. Member, Q. Ye, dan S. Member, "A Survey of Industrial AIoT : Opportunities , Challenges , and Directions," *IEEE Access*, vol. 12, no. Juli 2024, 2025.
- [4] D. C. G. Maria dkk, "The Overall Equipment Effectiveness (OEE) Calculation to Improve Productivity: A Case Study of a SME," *Nanotechnology Perceptions*, vol. 8, hal. 951–964, 2024.
- [5] A. Jeacfy, G. Go, F. Biabdillah, dan A. Wajiansyah, "Smart Agriculture : Pemanfaatan Sensor DHT11 Berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan suhu dan kelembapan udara," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, 2026
- [6] L. Rigó, J. Fabianová, dan L. Cabaniková, "Digital Twin of a Material Handling System Based on a Physical Construction-Kit Model for Educational Applications," 2026.
- [7] S. Di Luoizzo, F. Starmoni, dan M. M. Schiraldi, "On the relationship between human factor and overall equipment effectiveness (OEE) : An analysis through the adoption of analytic hierarchy process and ISO 22400," vol. 15, hal. 1–13, 2023, doi: 10.1177/18479790231188548.
- [8] J. Kim, "applied sciences Design and Implementation of OPC UA-Based VR / AR Collaboration Model Using CPS Server for VR Engineering Process," 2022.
- [9] M. B. Mojapelo, "A Case Study on Evaluating Overall Equipment Effectiveness and Recommending Solutions to Minimize Machine Breakdown in an Industry," vol. 2024, hal. 157–168, 2024, doi: 10.46254/GC02.20240040.
- [10] H. Thi, K. Nguyen, D. Thi, dan M. Khue, "Improving The Overall Equipment Effectiveness Of Sheet-Fed Offset Printers : A Case Study," vol. 19, no. 8, hal. 493–500, 2024.
- [11] S. Seyedzadeh, V. Christodoulou, A. Turner, and S. Lotfian, "Optimising Manufacturing Efficiency : A Data Analytics Solution for Machine Utilisation and Production Insights," hal. 1–25, 2025.
- [12] S. Pani, S. Pal, dan O. Pattnaik, "Emerging Trends in Industrial IoT : Shaping the Future of Smart Manufacturing," vol. 7, no. 4, hal. 1–12.
- [13] B. R. Harkins, "Overall Equipment Effectiveness (OEE) as a Quality System Metric," no. February, hal. 56–57, 2024.
- [14] A. A. Saputra, "Implementation of Overall Equipment Effectiveness (OEE) to Minimize Six Big Losses in Machining Process : A Case Study," no. 2021, hal. 132–

140, 2024, doi: 10.46254/AU03.20240065.

- [15] A. L. Tau dan C. Mbohwa, "Improvement of Overall Equipment Effectiveness Through Planned Equipment Maintenance : A Case Study," vol. 14, no. 3, hal. 8–9, 2023.
- [16] M. Y. Fardiansyah, S. Informasi, F. I. Komputer, dan U. Narotama, "Optimasi jaringan internet menggunakan kombinasi load balancing dan queue pada router mikrotik," no. 51, doi: 10.26623/elektrika.
- [17] H. Suprijono dkk, "Perancangan Sistem Autentikasi Pengguna dan Monitoring Kelistrikan CNC Router G-Weike WK1212 Berbasis Internet of Thing (IoT)," hal. 97–104.
- [18] A. D. Pambudi dkk., "Monitoring Sistem Kontrol Mesin Drying Kopi Secara Real Time Berbasis IoT".
- [19] G. D. Perkasa dkk., "Advanced line follower robot dengan sensor ultrasonik untuk dynamic obstacle avoidance dan smartphone-based control," no. 1, doi: 10.26623/elektrika.v17i1.11813.
- [20] S. Agatha dkk., "Pengembangan sistem web untuk perencanaan jaringan backbone dwdm dengan visualisasi interaktif dan estimasi kebutuhan perangkat," vol. 17, no. 2, 2025, doi: 10.26623/elektrika.v17i2.12645.
- [21] D. I. Kamera, "Prototype sistem parkir berbasis iot menggunakan esp32, sensor infrared , dan firebase dengan integrasi kamera," vol. 18, no. 1, hal. 1–9, 2025, doi: 10.26623/elektrika.v18i1.12798.
- [22] F. Lazuardi, "Implementasi sistem iot berbasis lora dan arima untuk optimasi distribusi air bersih", doi: 10.26623/elektrika.v17i2.12654.