

Sistem *Monitoring* Produksi Digital Berbiaya Rendah untuk Analisis *Waiting waste* pada Lini Perakitan Eksperimental

Haikal Kamil¹, Muhammad Amir Fajri², Mohammad Fauzan Aulialdi³, Vina Sari Yosephine^{4*}

¹⁻⁴Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jakarta, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : vyosephine@upnvj.ac.id



e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 07 Juli, 2026

Page: 3153-3164

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i7.3181>

Article History:

Received: Mei 06, 2026

Revised: Juni 27, 2026

Accepted: Juli 18, 2026

Abstract : Conventional assembly lines in small and medium industries still rely on manual production monitoring, resulting in suboptimal identification of waiting waste. Studies on low-cost monitoring systems that integrate production data with Lead time and Idle time indicators remain limited for small-scale industrial environments. This study aims to design and evaluate a digital production monitoring system based on the Internet of Things using ESP32, infrared sensors, GM66 barcode scanners, and cloud spreadsheets to automatically record real-time production data on an experimental assembly line. The results show a data reading accuracy of 89.17%, with total Lead time decreasing from 100.38 seconds to 71.27 seconds and total Idle time decreasing from 62.32 seconds to 25.83 seconds. The developed system improves process visibility and supports faster identification of waiting waste compared to conventional methods, making it a flexible and cost-effective digital monitoring solution for small industries and SMEs.

Keywords : Digital Twin, IoT, Sistem Monitoring Produksi, Waiting waste, Industri 4.0

Abstrak : Lini perakitan konvensional pada industri kecil dan menengah masih mengandalkan *monitoring* produksi secara manual sehingga identifikasi *waiting waste* belum optimal. Kajian sistem *monitoring* berbiaya rendah yang menghubungkan data produksi dengan indikator *Lead time* dan *Idle time* masih terbatas untuk lingkungan industri berskala kecil. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji sistem *monitoring* produksi digital berbasis Internet of Things menggunakan ESP32, sensor *infrared*, *barcode scanner* GM66, dan *cloud spreadsheet* untuk mencatat data produksi secara otomatis dan *real-time* pada lini perakitan eksperimental. Hasil pengujian menunjukkan akurasi pembacaan sebesar 89,17% serta penurunan total *Lead time* dari 100,38 detik menjadi 71,27 detik dan total *Idle time* dari 62,32 detik menjadi 25,83 detik. Sistem ini terbukti meningkatkan visibilitas proses dan mendukung identifikasi *waiting waste* lebih cepat dibandingkan metode konvensional, sehingga berpotensi menjadi solusi *monitoring* digital yang fleksibel dan ekonomis bagi industri kecil dan UMKM.

Kata Kunci : Digital Twin, IoT, Sistem Monitoring Produksi, Waiting waste, Industri 4.0

PENDAHULUAN

Industri kecil dan menengah memiliki peran penting dalam perekonomian Indonesia, tetapi masih menghadapi tantangan dalam meningkatkan efisiensi proses produksi (Bianchini et al., 2024). Pada banyak lini perakitan berskala kecil, proses *monitoring* produksi masih dilakukan secara manual melalui pengamatan operator, pencatatan sederhana, atau pemeriksaan hasil akhir (Sbaragli et al., 2025). Pendekatan tersebut relatif mudah diterapkan, tetapi memiliki keterbatasan dalam menyajikan data proses secara cepat, kontinu, dan objektif. Akibatnya, berbagai bentuk pemborosan atau *waste*, terutama waktu tunggu dan keterlambatan aliran proses, sering kali sulit terdeteksi sejak awal (Bianchini et al., 2024). Dalam perspektif perbaikan proses, *waste* merupakan aktivitas atau kondisi yang tidak menambah nilai pada produk, tetapi menggunakan waktu, tenaga, atau sumber daya produksi (Gebeyehu et al., 2022). Pada lini perakitan, salah satu bentuk *waste* yang sering muncul adalah *waiting waste*, yaitu waktu tunggu yang terjadi karena ketidakseimbangan proses, keterlambatan perpindahan produk, atau hambatan pada stasiun kerja tertentu (Khatib Sulaiman Dalam No et al., 2024). Kondisi tersebut dapat meningkatkan *Lead time*, memperbesar *Idle time*, dan menurunkan kelancaran aliran produksi (Gebeyehu et al., 2022). Oleh karena itu, pengukuran waktu proses secara sistematis diperlukan untuk membantu mengenali indikasi *waste* pada lini perakitan (Mohd Yusoo et al., 2023).

Penerapan sistem *monitoring* produksi secara *real-time* dapat membantu meningkatkan visibilitas proses dan mempercepat identifikasi permasalahan produksi (Okuyelu et al., 2024). Namun, sistem *monitoring* komersial atau berskala industri sering kali membutuhkan biaya investasi, infrastruktur, dan kemampuan teknis yang besar (Kumar et al., 2025). Hal ini menjadi tantangan bagi industri kecil dan menengah yang membutuhkan solusi *monitoring* yang lebih sederhana, fleksibel, dan ekonomis (Hawkrige et al., 2021). Teknologi Internet of Things dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengumpulkan data produksi secara otomatis melalui perangkat yang relatif terjangkau (Soori et al., 2023). Dengan Internet of Things, perangkat fisik, seperti sensor, pemindai kode batang, dan mikrokontroler, dapat terhubung dengan media penyimpanan data digital melalui jaringan internet (Barton et al., 2024; De Nerol et al., 2024). Dengan metode ini, data produksi seperti waktu masuk produk, waktu keluar produk, *Cycle time*, *Idle time*, *Lead time*, dan throughput dapat dicatat secara lebih sistematis (Chulakit et al., 2023; M et al., 2023). Dalam konteks *monitoring* produksi, sistem IoT juga berperan sebagai penyedia transparansi informasi (*real-time visibility*) dengan menampilkan kondisi aktual proses produksi berdasarkan data yang diperoleh dari sensor dan perangkat pemindai.

Setelah data produksi terbaca dan tersimpan secara *real-time* pada *cloud spreadsheet*, informasi tersebut dapat digunakan untuk mengetahui terjadinya keterlambatan atau waktu tunggu pada stasiun kerja tertentu. Selanjutnya, operator atau pengawas produksi dapat melakukan pemeriksaan terhadap kondisi stasiun kerja yang terindikasi mengalami waktu tunggu, mengidentifikasi penyebab keterlambatan, dan menentukan tindakan operasional yang diperlukan untuk mengurangi waktu tunggu tersebut. Dengan demikian, data *monitoring* tidak hanya berfungsi sebagai catatan produksi, tetapi juga menyediakan dasar informasi untuk mendukung pengambilan tindakan operasional dalam mengurangi indikasi *waiting waste*. Data tersebut kemudian dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi proses dan membandingkan performa produksi sebelum dan sesudah penerapan sistem *monitoring* digital (M et al., 2023). Dengan demikian, *monitoring* berbasis Internet of Things dapat menjadi langkah awal dalam mendukung digitalisasi proses produksi pada lingkungan yang memiliki keterbatasan sumber daya (Farooq et al., 2023).

Sebelum diterapkan pada lingkungan industri aktual, sistem *monitoring* produksi digital perlu diuji pada lingkungan yang lebih terkontrol (Nasser et al., 2024). Lini perakitan eksperimental dapat digunakan sebagai media pengujian awal karena mampu mensimulasikan aliran proses produksi melalui beberapa stasiun kerja (Demčák et al., 2024). Melalui lini eksperimental, proses pencatatan data, pengiriman data ke media penyimpanan digital, serta analisis indikator waktu produksi dapat diamati secara lebih sistematis tanpa mengganggu operasi industri nyata (Atluri, 2025). Dengan demikian, lini perakitan eksperimental berperan sebagai platform awal untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem *monitoring* produksi yang

berpotensi diterapkan pada industri kecil dan menengah (Raharno & Yosephine, 2024; Ziaja & Piętko, 2025).

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas penerapan Internet of Things, sistem *monitoring* produksi, dan konsep *Digital Twin* dalam mendukung peningkatan efisiensi manufaktur (Soori et al., 2023). Namun, masih diperlukan kajian yang menunjukkan bagaimana sistem *monitoring* produksi digital berbiaya rendah dapat digunakan untuk menganalisis indikasi *waste* pada lini perakitan eksperimental (Hawkridge et al., 2021; Vo et al., 2026). Selain itu, kajian yang menghubungkan data *monitoring* produksi dengan perubahan indikator seperti *Lead time* dan *Idle time* masih perlu diperkuat, terutama dalam konteks solusi *monitoring* yang sederhana dan relevan bagi industri skala kecil (Baramachai & Kokaew, 2025; Novaliendry et al., 2024).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem *monitoring* produksi digital berbasis Internet of Things pada lini perakitan eksperimental (Soori et al., 2023; Wong & Chu, 2021). Sistem yang dikembangkan menggunakan ESP32, sensor *infrared*, *barcode scanner*, dan *cloud spreadsheet* untuk mencatat data produksi secara otomatis (De Nerol et al., 2024; Hercog et al., 2023). Data hasil *monitoring* digunakan untuk menganalisis perubahan *Lead time* dan *Idle time* sebagai indikator utama pengurangan *waiting waste* (Gebeyehu et al., 2022). Kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan sistem *monitoring* produksi yang sederhana, fleksibel, dan berbiaya rendah sebagai model awal pendukung digitalisasi proses produksi bagi industri kecil dan menengah (Abdel-Aty et al., 2024; Vuković et al., 2022).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk merancang dan menguji sistem *monitoring* produksi digital berbasis Internet of Things pada lini perakitan eksperimental. Sistem dikembangkan menggunakan ESP32, sensor *infrared*, *barcode scanner*, dan *cloud spreadsheet* untuk melakukan *monitoring* data produksi secara *real-time*. Tahapan penelitian meliputi perancangan sistem, pengujian fungsional, pengambilan data produksi, serta analisis parameter produksi untuk mengidentifikasi *waiting waste*. Penelitian ini menggunakan beberapa komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang dipilih berdasarkan ketersediaan, kemudahan integrasi, dan keterjangkauan biaya guna mendukung pengembangan sistem *monitoring* produksi digital berbasis IoT. Komponen-komponen tersebut berfungsi secara terintegrasi untuk melakukan pengumpulan, pemrosesan, dan pengiriman data produksi secara otomatis pada lini eksperimental. Daftar komponen beserta fungsinya disajikan pada Tabel 1 berikut.

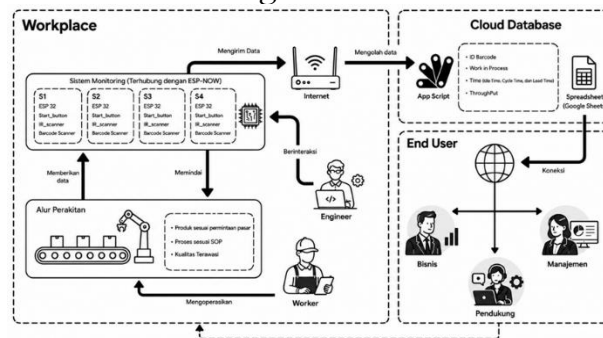
Tabel 1. Alat dan Bahan Penelitian

No	Komponen/Alat	Fungsi
1	ESP 32	<i>Mikrokontroler utama untuk pemrosesan dan pengiriman data</i>
2	<i>Barcode scanner</i> GM66	Membaca identitas produk pada setiap stasiun kerja
3	Sensor <i>Infrared</i>	Mendeteksi keberadaan objek
4	<i>OLED Display</i>	Menampilkan informasi proses produksi
5	<i>Google Spreadsheet</i>	Media penyimpanan data berbasis cloud
6	Breadboard dan Kabel Jumper	<i>Media perakitan rangkaian elektronik</i>
7	Power Supply	<i>Sumber daya sistem</i>

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Komponen tersebut digunakan untuk mendukung proses *monitoring* produksi secara otomatis pada lini eksperimental berbasis IoT dan *Digital Twin*.

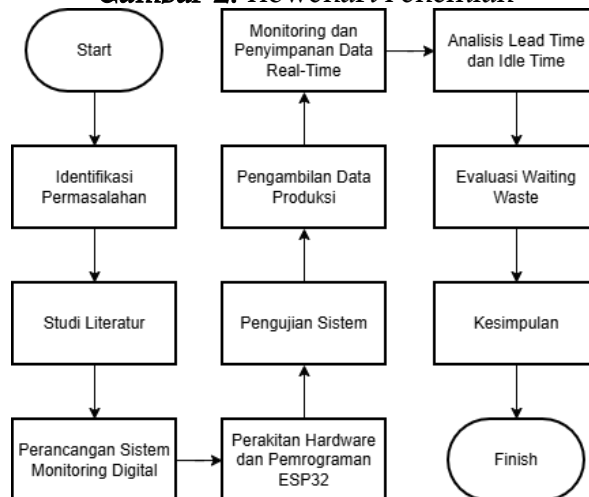
Gambar 1. Diagram Arsitektur Sistem



Sumber: {Dokumen Pribadi}

Sistem *monitoring* produksi digital dirancang menggunakan ESP32, sensor *infrared*, *barcode scanner*, dan *cloud spreadsheet* untuk melakukan *monitoring* data produksi secara *real-time*. Sensor *infrared* digunakan untuk mendeteksi objek, sedangkan *barcode scanner* digunakan untuk mengidentifikasi produk yang diproses (Sitompul et al., 2022). Data hasil pembacaan diproses oleh ESP32 kemudian dikirim ke *cloud spreadsheet* sebagai representasi digital dari sistem fisik. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan mulai dari identifikasi permasalahan, perancangan sistem *monitoring* digital, pengujian sistem, pengambilan data produksi, hingga analisis parameter produksi untuk mengevaluasi *waiting waste* pada lini eksperimental.

Gambar 2. Flowchart Penelitian



Sumber: {Dokumen Pribadi}

Gambar 2 menunjukkan tahapan penelitian yang dilakukan mulai dari identifikasi permasalahan hingga analisis data produksi untuk mengevaluasi *waiting waste* pada lini eksperimental berbasis IoT dan *Digital Twin*. Data dianalisis menggunakan parameter produksi untuk mengevaluasi performa sistem *monitoring* digital dan menganalisis indikasi *waiting waste* pada lini eksperimental. Validasi fungsional dilakukan dengan menguji kemampuan sistem dalam membaca *barcode*, mendeteksi objek menggunakan sensor *infrared*, dan mengirimkan data ke *cloud spreadsheet* secara *real-time* (Chiagunye et al., 2025). Akurasi pembacaan data digunakan untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem *monitoring* dalam membaca dan mengirimkan data produksi secara otomatis. Akurasi dihitung berdasarkan perbandingan jumlah data yang berhasil terbaca oleh sistem terhadap jumlah objek aktual yang diproses pada lini eksperimental, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$Akurasi = \left(\frac{N_{terbaca}}{N_{total}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$N_{terbaca}$: Jumlah Data Terbaca

N_{total} : Seluruh Data yang di uji

Rumus akurasi digunakan untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem *Monitoring* dalam membaca dan mengirimkan data produksi. Validasi data dilakukan menggunakan parameter produksi untuk mengevaluasi performa sistem *monitoring* digital pada lini eksperimental.

Tabel 2. Parameter Analisis Produksi

No	Parameter	Fungsi Analisis
1	<i>Cycle time</i>	Mengukur rata-rata waktu produksi per unit
2	<i>Idle time</i>	Mengidentifikasi waktu tunggu proses produksi
3	<i>Lead time</i>	Mengukur total waktu proses produksi
4	<i>Takt time</i>	Menentukan kecepatan produksi berdasarkan permintaan

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Cycle time (CT) digunakan untuk mengukur waktu yang dibutuhkan untuk memproses satu unit produk pada stasiun kerja tertentu. Nilai *Cycle time* diperoleh dari selisih antara *timestamp* saat objek memasuki stasiun kerja dan *timestamp* saat objek meninggalkan stasiun kerja. Perhitungan *Cycle time* untuk setiap unit produk dirumuskan sebagai berikut.:

$$CT_{i,s} = t_{out,i,s} - t_{in,i,s} \quad (2)$$

$CT_{i,s}$: *Cycle time* unit produk ke-*i* pada stasiun kerja ke-*s* (detik)

$t_{out,i,s}$: *timestamp* saat unit produk ke-*i* keluar dari stasiun kerja ke-*s* (detik)

$t_{in,i,s}$: *timestamp* saat unit produk ke-*i* masuk ke stasiun kerja ke-*s* (detik).

Rumus *Cycle time* digunakan untuk mengetahui rata-rata waktu produksi per unit.

Idle time digunakan untuk mengidentifikasi waktu tunggu yang terjadi selama proses produksi berlangsung pada lini eksperimental. Nilai *Idle time* diperoleh dari selisih antara waktu siklus yang tersedia dengan waktu kerja efektif pada setiap stasiun kerja, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$IT_{i,s} = t_{in,i+1,s} - t_{out,i,s} \quad (3)$$

$IT_{i,s}$: *Idle time* unit produk ke-*i* pada stasiun kerja ke-*s* (detik)

$t_{in,i+1,s}$: *timestamp* saat unit produk berikutnya, yaitu unit ke-*i+1*, masuk ke stasiun kerja ke-*s* (detik).

$t_{out,i,s}$: *timestamp* saat unit produk ke-*i* keluar dari stasiun kerja ke-*s* (detik);

Rumus *Idle time* digunakan untuk mengidentifikasi waktu tunggu pada proses produksi. *Lead time* digunakan untuk mengetahui total waktu yang dibutuhkan suatu produk dalam menyelesaikan seluruh proses produksi pada lini eksperimental. Nilai *Lead time* dihitung berdasarkan selisih antara waktu produk keluar dan waktu produk masuk pada lini perakitan, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$LT_i = CT_{i,s} + IT_{i,s} \quad (4)$$

LT_i : *Lead time* unit produk ke-*i* selama keseluruhan proses produksi (detik)

$CT_{i,s}$: *Cycle time* unit produk ke-*i* pada stasiun kerja ke-*s* (detik)

$IT_{i,s}$: *Idle time* unit produk ke-*i* pada stasiun kerja ke-*s* (detik)

Rumus *Lead time* digunakan untuk mengetahui total waktu proses produksi. *Takt time* digunakan untuk menentukan kecepatan produksi yang diperlukan agar dapat memenuhi permintaan pelanggan. Nilai *Takt time* diperoleh dengan membagi total waktu produksi yang tersedia dengan jumlah permintaan pelanggan dalam periode tertentu, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$TT = \frac{T_{Available}}{D} \quad (5)$$

$T_{Available}$: Waktu Produksi Tersedia

D : Jumlah Permintaan/Unit yang Harus di Produksi

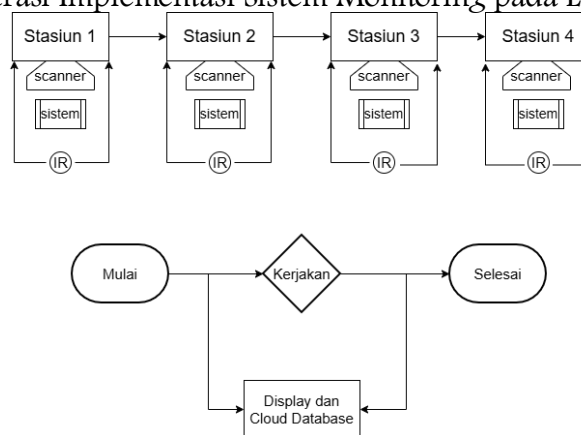
Rumus *Takt time* digunakan untuk menentukan kecepatan produksi berdasarkan permintaan. Parameter produksi tersebut digunakan untuk mengevaluasi performa sistem *monitoring* digital serta menganalisis indikasi *waiting waste* pada lini eksperimental berdasarkan data produksi yang diperoleh secara *real-time*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi Sistem *Monitoring* Digital

Sistem *monitoring* produksi digital berhasil diimplementasikan menggunakan ESP32, sensor *infrared*, *barcode scanner*, dan *cloud spreadsheet* untuk melakukan *monitoring* data produksi secara *real-time*.

Gambar 3. Ilustrasi Implementasi Sistem Monitoring pada Lini Eksperimental



Sumber: {Dokumen Pribadi}

Gambar 3 menunjukkan ilustrasi implementasi sistem *monitoring* digital pada lini eksperimental. Sistem digunakan untuk mensimulasikan proses *monitoring* produksi secara otomatis melalui integrasi sensor *infrared*, *barcode scanner*, dan *cloud spreadsheet* sehingga data produksi dapat dipantau secara *real-time*.

Pengujian dan Validasi Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan pembacaan dan pengiriman data produksi secara otomatis. Jumlah data yang diamati pada penelitian ini sebanyak 120 data produksi yang diperoleh dari empat stasiun kerja pada lini eksperimental. Setiap stasiun kerja dilakukan pengambilan data sebanyak 30 data untuk menguji kemampuan sistem *monitoring* dalam melakukan pembacaan *barcode*, deteksi objek, dan pencatatan waktu secara otomatis. Berdasarkan hasil pengujian, sebanyak 107 data berhasil terbaca oleh sistem, sedangkan 13 data tidak terbaca akibat posisi *barcode*, sudut pembacaan scanner, dan kecepatan objek saat melewati sensor.

Validasi Fungsional

Validasi fungsional dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem *monitoring* dalam membaca dan mengirimkan data produksi secara otomatis pada lini eksperimental. Pengujian dilakukan menggunakan 120 data yang diperoleh dari empat stasiun kerja, dengan masing-masing stasiun dilakukan pengambilan data sebanyak 30 data. Hasil pengujian fungsional sistem disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Validasi Fungsional

No	Parameter	Hasil
1	Total Data	120
2	Data Terbaca	107

3	Data Tidak Terbaca	13
4	Akurasi Sistem	89,17%

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil membaca 107 dari 120 data yang diuji dan memperoleh tingkat akurasi pembacaan sebesar 89,17%. Meskipun sebagian besar data berhasil dibaca dan dikirimkan oleh sistem, terdapat 13 data yang tidak berhasil direkam (*missed-scanning*). Kegagalan pembacaan pada pengujian ini dipengaruhi oleh posisi *barcode* dan kecepatan objek saat melewati sensor. Dengan demikian, nilai akurasi 89,17% menunjukkan bahwa sistem telah mampu menjalankan fungsi pembacaan dan pengiriman data pada sebagian besar pengujian, tetapi masih terdapat keterbatasan dalam keandalan proses akuisisi data yang perlu dipertimbangkan dalam analisis hasil produksi.

Validasi Data

Validasi data dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan pencatatan dan pengiriman data produksi secara otomatis pada lini eksperimental. Proses *monitoring* dilakukan menggunakan sensor *infrared* dan *barcode scanner* yang terhubung dengan ESP32 serta *cloud spreadsheet* secara *real-time*.

Gambar 4. Validasi Data Sistem

Timestamp	ID Barcode	WIP	Cyclotime	Idle Time	Total Out	LeadTime
5/21/2026 14:58:47	COMP-01-L-FWINGS	0	10,45	0,00	1	10,45
5/21/2026 14:59:09	COMP-02-L-FWINGS	0	13,54	8,15	2	21,69
5/21/2026 14:59:24	COMP-03-L-FWINGS	0	8,18	6,78	3	14,96
5/21/2026 14:59:39	COMP-04-L-FWINGS	0	8,71	6,89	4	15,6
5/21/2026 15:00:03	COMP-05-L-FWINGS	0	15,17	6,36	5	21,53
5/21/2026 15:00:25	COMP-06-L-FWINGS	0	14,50	10,57	6	25,07
5/21/2026 15:00:49	COMP-07-L-FWINGS	0	16,58	6,58	7	23,16
5/21/2026 15:01:09	COMP-08-L-FWINGS	0	13,21	5,86	8	19,07
5/21/2026 15:01:25	COMP-09-L-FWINGS	0	10,43	6,76	9	17,19
5/21/2026 15:01:41	COMP-10-L-FWINGS	0	10,57	5,42	10	15,99
5/21/2026 15:02:36	COMP-11-L-FWINGS	0	7,71	12,31	11	20,02
5/21/2026 15:02:55	COMP-12-L-FWINGS	0	15,84	5,38	12	21,22
5/21/2026 15:03:16	COMP-13-L-FWINGS	0	12,16	7,29	13	19,45
5/21/2026 15:03:36	COMP-14-L-FWINGS	0	12,74	5,62	14	18,36
5/21/2026 15:03:53	COMP-15-L-FWINGS	0	17,46	6,68	15	24,14

Sumber: {Dokumen Pribadi}

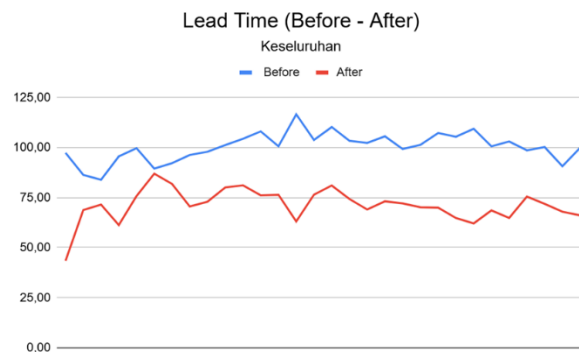
Data hasil *monitoring* menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pencatatan parameter produksi secara otomatis dan *real-time* ke *cloud*. Analisis data produksi dilakukan dengan membandingkan nilai total *Lead time* dan total *Idle time* sebelum dan sesudah implementasi sistem *monitoring* digital pada lini eksperimental. *Lead time* merupakan total waktu yang dibutuhkan suatu produk untuk menyelesaikan seluruh proses produksi dari awal hingga akhir lini perakitan, sedangkan *Idle time* merupakan waktu tunggu yang terjadi akibat ketidakseimbangan proses antar stasiun kerja. Perbandingan kedua parameter tersebut disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Analisis Data Produksi Total Lead time dan Idle time

No	Parameter	Sebelum	Sesudah
1	Total <i>Lead time</i>	100,38	71,27
2	Total <i>Idle time</i>	62,32	25,83

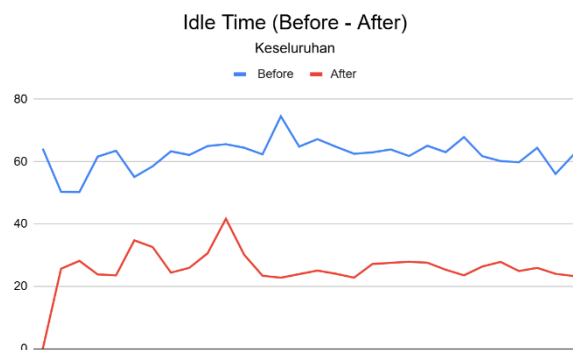
Sumber: {Dokumen Pribadi}

Berdasarkan hasil pengujian, implementasi sistem *monitoring* digital menunjukkan penurunan total *Lead time* dari 100,38 detik menjadi 71,27 detik. Selain itu, total *Idle time* juga mengalami penurunan dari 62,32 detik menjadi 25,83 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *monitoring* produksi secara *real-time* membantu meningkatkan visibilitas proses dan mendukung identifikasi *waste* secara lebih cepat dibandingkan metode manual.

Gambar 5. Grafik Perbandingan Total Lead time Sebelum dan Sesudah Implementasi Sistem

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Berdasarkan Gambar 5, total *Lead time* mengalami penurunan setelah implementasi sistem *monitoring* digital. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses *monitoring* produksi menjadi lebih terkontrol dibandingkan metode manual.

Gambar 6. Grafik Perbandingan Total Idle time Sebelum dan Sesudah Implementasi Sistem

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Berdasarkan Gambar 6, total *Idle time* mengalami penurunan setelah implementasi sistem *monitoring* digital. Penurunan *Idle time* menunjukkan berkurangnya waktu tunggu (*waiting waste*) pada lini eksperimental sehingga proses *monitoring* menjadi lebih responsif dan terukur. Perlu dicatat bahwa 13 data yang tidak terbaca pada tahap validasi fungsional berpotensi merambat (*error propagation*) ke dalam perhitungan total *Lead time* dan *Idle time* yang disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Apabila data yang hilang tersebut terkonsentrasi pada kondisi proses tertentu, misalnya pada stasiun kerja dengan kecepatan objek tinggi atau posisi *barcode* yang kurang ideal, maka nilai total *Lead time* dan *Idle time* yang dihitung dapat mengalami bias, baik berupa *under-estimasi* maupun *over-estimasi*, tergantung karakteristik data yang tidak terekam tersebut. Dengan kata lain, penurunan *Lead time* dari 100,38 detik menjadi 71,27 detik serta *Idle time* dari 62,32 detik menjadi 25,83 detik perlu diinterpretasikan secara hati-hati, karena validitas perbandingan *before-after* pada Gambar 5 dan Gambar 6 turut dipengaruhi oleh proporsi *missed-scanning* pada masing-masing kondisi pengukuran, bukan semata-mata mencerminkan perbaikan proses yang sesungguhnya.

Untuk memitigasi permasalahan *missed-scanning* tersebut pada pengembangan selanjutnya, penerapan algoritma data *filtering*, misalnya *moving average* atau deteksi *outlier* berbasis *interquartile range* (IQR), dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengoreksi data yang hilang atau menyimpang sebelum digunakan dalam perhitungan parameter produksi. Selain itu, penerapan interlokasi sensor (*sensor interlocking*) antara sensor *infrared* dan *barcode* scanner dapat digunakan agar kedua sensor saling memverifikasi hasil pembacaan, sehingga apabila salah satu sensor gagal mendeteksi objek, sistem dapat memicu mekanisme pembacaan ulang (*redundancy check*) atau notifikasi kegagalan secara *real-time*. Kedua pendekatan tersebut

berpotensi meningkatkan keandalan data serta memperkuat validitas analisis *before-after* pada penelitian selanjutnya.

Evaluasi Implementasi Sistem *Monitoring* Produksi Berbasis *Digital Twin*

Evaluasi implementasi sistem *monitoring* produksi berbasis *Digital Twin* dilakukan dengan membandingkan kondisi operasional lini perakitan sebelum dan sesudah penerapan sistem secara menyeluruh. Perbandingan ini mencakup beberapa aspek operasional meliputi metode pemantauan, kecepatan deteksi *waste*, akurasi data produksi, parameter proses, dan keterlacakan produk. Hasil perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Dampak Implementasi Sistem Monitoring Digital pada Lini Perakitan

Aspek Operasional	Sebelum Implementasi Sistem <i>Monitoring</i> (Konvensional)	Sesudah Implementasi Sistem <i>Monitoring</i> Digital
Metode Pemantauan	Manual, intermiten, atau reaktif.	Otomatis, kontinu, dan <i>real-time</i> .
Kecepatan Deteksi <i>Waste</i>	Lambat; masalah baru diketahui setelah menumpuk atau di inspeksi akhir lini.	Dini/cepat; anomali langsung terdeteksi melalui sensor.
Akurasi Data Produksi	Rentan <i>human error</i> , pencatatan dilakukan secara manual dan kurang akurat	Akurasi tinggi (89,17%), pencatatan data dilakukan secara otomatis langsung masuk ke <i>cloud spreadsheet</i> .
Parameter Proses (<i>Cycle time</i>)	Sulit diukur presisinya karena variabilitas manusia.	Terhitung otomatis sejak objek melewati sensor IR.
Keterlacakan (<i>Traceability</i>)	Lemah; berisiko terjadi kehilangan produk dan defect yang tidak teridentifikasi kapan dan dimana terjadinya.	Kuat; dibantu pemindaian <i>barcode scanner</i> GM66 dan data spreadsheet

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Berdasarkan Tabel 5, implementasi sistem *monitoring* digital mampu meningkatkan proses *monitoring* produksi dibandingkan metode konvensional. Sistem memungkinkan proses *monitoring* dilakukan secara otomatis dan *real-time* sehingga identifikasi *waste* dan pencatatan data produksi menjadi lebih cepat dan terukur (Wang et al., 2024).

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan sistem *monitoring* produksi digital berbasis Internet of Things dan *Digital Twin* menggunakan ESP32, sensor *infrared*, *barcode scanner*, dan *cloud spreadsheet* pada lini eksperimental. Sistem mampu melakukan *monitoring* dan pencatatan data produksi secara otomatis dan *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memperoleh akurasi pembacaan data sebesar 89,17% serta mampu menghasilkan parameter produksi seperti *Cycle time*, *Idle time*, *Lead time*, throughput, dan *Work in Process* (WIP). Implementasi sistem juga menunjukkan penurunan *Lead time* dan *Idle time* yang mengindikasikan berkurangnya waktu tunggu (*waiting waste*) pada proses produksi. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan mampu meningkatkan visibilitas proses produksi dan mendukung *monitoring* berbasis data secara lebih responsif dibandingkan metode manual. Selain itu, penggunaan komponen sederhana, menjadikan sistem berpotensi diterapkan sebagai solusi *monitoring* digital yang lebih fleksibel dan ekonomis bagi industri kecil maupun UMKM.

Perlu ditegaskan bahwa hasil dan kesimpulan di atas berlaku dalam batasan kondisi operasional (*boundary conditions*) penelitian ini, yaitu pada lini perakitan eksperimental berskala kecil dengan empat stasiun kerja, jumlah sampel data terbatas (120 data), serta lingkungan pengujian yang relatif terkontrol dan bebas dari gangguan elektromagnetik maupun kepadatan lalu lintas data yang tinggi. Kinerja sistem, termasuk tingkat akurasi pembacaan yang diperoleh, belum tentu merepresentasikan kondisi rantai produksi riil yang memiliki jumlah stasiun kerja lebih banyak, kecepatan proses lebih tinggi, dan potensi interferensi sinyal yang lebih kompleks.

Oleh karena itu, generalisasi hasil penelitian ini ke skala industri yang lebih besar perlu dilakukan secara hati-hati dan disertai pengujian lanjutan pada lingkungan yang lebih representatif. Sebagai sistem *monitoring* berbiaya rendah, keandalan pembacaan data pada penelitian ini turut bergantung pada kestabilan jalur transmisi data antara sensor, ESP32, dan cloud spreadsheet. Oleh karena itu, penerapan sistem ini pada rantai produksi riil memerlukan pengkondisian lingkungan transmisi data yang memadai, misalnya melalui jaringan *ESP-NOW* atau Wi-Fi yang stabil dan bebas dari gangguan interferensi, agar tingkat akurasi pembacaan yang diperoleh pada penelitian ini dapat dipertahankan pada skala implementasi yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jakarta atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Aty, T. A., McFarlane, D., Brooks, S., Salter, L., Abubakar, A. S., Evans, S., Hawkrige, G., Price Thomas, K., Negri, E., Mukherjee, A., Yilmaz, G., & Macchi, M. (2024). The Role of Low-Cost Digital Solutions in Supporting Industrial Sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/su16031301>
- Atluri, P. R. (2025). *Smart Factories in the Cloud: How Real-time Data Pipelines Are Powering IoT-Driven Manufacturing*. <https://doi.org/10.32996/jcsts>
- Baramachai, M., & Kokaew, V. (2025). Real-time Production Monitoring System: An IoT and Open-Source Solution for SMEs. *2025 11th International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology (ICEAST)*, 223–226. <https://doi.org/10.1109/ICEAST64767.2025.11088201>
- Barton, M., Budjac, R., Tanuska, P., Sladek, I., & Nemeth, M. (2024). Advancing Small and Medium-Sized Enterprise Manufacturing: Framework for IoT-Based Data Collection in Industry 4.0 Concept. *Electronics (Switzerland)*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/electronics13132485>
- Bianchini, A., Savini, I., Andreoni, A., Morolli, M., & Solfrini, V. (2024). Manufacturing Execution System Application within Manufacturing Small-Medium Enterprises towards Key Performance Indicators Development and Their Implementation in the Production Line. *Sustainability (Switzerland)*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/su16072974>
- Chiagunye, T. T., Ilo, S. F., Ndukwe, G. I., Udeani, H., & Okey, O. (2025). Development of an Automated Aquarium Monitoring System with an IoT Interface using Google Sheets. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*. <https://doi.org/10.53982/ajerd.2025.0802.07-j>
- Chulakit, S., Sadun, A. S., Jalaludin, N. A., Jalani, J., Ahmad, S., Hanapi, M. H. M., & Sabarudin, N. A. (2023). A Centralized IOT-Based Process Cycle time Monitoring System for Line Balancing Study. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 105(1), 58–67. <https://doi.org/10.37934/aram.105.1.5867>
- De Nerol, I., Putra Syam Satria, R., Rasyid Parmana, R., Octavia, N., Mukti Darmawan, M. D., Mohamad Alvin Renaldi, M., Firdayanti, Nurfadillah, F., Kharismatunnisaa, F., Angeline, E., Kamil, D., & Saputra, Y. (2024). IoT-Based Barcode Scanning System for Production and Warehouse Management. *Journal of Applied Science, Technology & Humanities*, 1(1), 72–86. <https://doi.org/10.62535/Ozv1h756>
- Demčák, J., Židek, K., & Krenický, T. (2024). Digital Twin for Monitoring the Experimental Assembly Process Using RFID Technology. *Processes*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/pr12071512>
- Farooq, M. S., Abdullah, M., Riaz, S., Alvi, A., Rustam, F., Flores, M. A. L., Galán, J. C., Samad, M. A., & Ashraf, I. (2023). A Survey on the Role of Industrial IoT in Manufacturing for Implementation of Smart Industry. In *Sensors (Basel, Switzerland)* (Vol. 23, Number 21). <https://doi.org/10.3390/s23218958>

- Gebeyehu, S. G., Abebe, M., & Gochel, A. (2022). Production *Lead time* improvement through lean manufacturing. *Cogent Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2034255>
- Hawkridge, G., Mukherjee, A., Mcfarlane, D., Tlegenov, Y., Parlikad, A. K., Reyner, N. J., & Thorne, A. (2021). *Monitoring on a Shoestring: Low Cost Solutions for Digital Manufacturing*.
- Hercog, D., Lerher, T., Truntiĉ, M., & Težak, O. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. *Sensors*, 23(15). <https://doi.org/10.3390/s23156739>
- Khatib Sulaiman Dalam No, J., Paulo Silambi, Y., & Indiyanto, R. (2024). Lean Manufacturing Analysis to Minimize *Waste* on The Production Process at CV. ABC. *Indonesian Journal of Computer Science Attribution*, 13(1), 707.
- Kumar, R., Dutta, G., & Phanden, R. K. (2025). Digitalization Adoption Barriers in the Context of Sustainability and Operational Excellence: Implications for SMEs. *Engineering Management Journal*, 37(4), 355–371. <https://doi.org/10.1080/10429247.2024.2372519>
- M, R. C. S., V, A., K.P, P., & K.E.K, V. (2023). *Intelligent VSM Model: A way to adopt Industry 4.0 Technologies in Manufacturing Industry*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2702005/v1>
- Mohd YusooF, M. Y., Nik Mohamed, N. M. Z., Nelfiyanti, & Md Yasir, A. S. H. (2023). Assessment of Man and Method Toward the Assembly Line Improvement in Automotive Manufacturing. *Journal of Modern Manufacturing Systems and Technology*, 7(1), 7–14. <https://doi.org/10.15282/jmmst.v7i1.9017>
- Nasser, A. I., Sahrab, A. A., & Kadhim, H. M. (2024). Design and simulation of remote *monitoring* of the intelligent automatic control system in the production line. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 13(1), 133–142. <https://doi.org/10.11591/ijai.v13.i1.pp133-142>
- Novaliendry, D., Saputra, R. F. Y., Febrianti, N., Yanto, D. T. P., Saragih, F. M., & Rahiman, W. M. Y. (2024). Development of a *Digital Twin* Prototype for Industrial Manufacturing *Monitoring* System Using IoT and Augmented Reality. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, 20(3), 4–23. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v20i03.47101>
- Okuyelu, O., Adaji, O. O., & Doskenov, B. (2024). Advancing Manufacturing Efficiency through *Real-time* Production *Monitoring* and Control Systems. *Journal of Engineering Research and Reports*, 26(4), 184–193. <https://doi.org/10.9734/jerr/2024/v26i41125>
- Raharno, S., & Yosephine, V. S. (2024). Intelligent flexible assembly system for labor-intensive factory using the configurable virtual workstation concept. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 18(1), 465–478. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01567-3>
- Sbaragli, A., Ghafoorpoor, P. Y., Thiede, S., & Pilati, F. (2025). A cyber-physical architecture to monitor human-centric reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02558-1>
- Sitompul, E., Wulandari, T., & Galina, M. (2022). *A Prototype of an IoT-based Production Performance and Quality Monitoring System Using NodeMCUESP8266*.
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review. In *Internet of Things and Cyber-Physical Systems* (Vol. 3, pp. 192–204). KeAi Communications Co. <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>
- Vo, C. D., Nguyen, T. T., & Dang, D. A. (2026). A low-cost IoT architecture with RF communication and data analytics for *real-time* productivity *monitoring* in garment manufacturing. *IScience*, 29(1). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.114536>
- Vuković, M., Jorg, O., Hosseinifard, M., & Fantoni, G. (2022). Low-Cost Digitalization Solution through Scalable IIoT Prototypes. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/app12178571>
- Wang, X., Hu, H., Wang, Y., & Wang, Z. (2024). IoT *Real-time* Production *Monitoring* and Automated Process Transformation in Smart Manufacturing. *Journal of Organizational and End User Computing*, 36(1). <https://doi.org/10.4018/JOEUC.336482>

- Wong, Q. Y., & Chu, Y. B. (2021). A Mobile Production *Monitoring* System Based on Internet of Thing (IoT) and Random Forest Classification. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications*, 10(4), 243–250. <https://doi.org/10.18178/ijeetc.10.4.243-250>
- Ziaja, S., & Piętka, K. (2025). OEE *Monitoring* System for Production Processes Based on Integration of IoT Sensor Data. *Inżynieria Mineralna*, 1(1), 61–66. <https://doi.org/10.29227/IM-2025-01-09>