

Sistem Monitoring dan Analisis *Bottleneck* Berbasis Internet of Things pada Lini Produksi Eksperimental untuk Mendukung Digitalisasi Produksi Skala Kecil

Muhammad Amir Fajri¹, Mohammad Fauzan Aulialdi², Haikal Kamil³, Vina Sari Yosephine⁴

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

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

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

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

Vol. 04, No. 07 Juli, 2026

Page: 3072-3084

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i7.3163>

Article History:

Received: Mei 21, 2026

Revised: Juni 09, 2026

Accepted: Juli 19, 2026

Abstract : Small-scale industries require simple and affordable production monitoring systems to support digitalization. However, production data recording is still often performed manually, making bottleneck analysis less effective and more subjective. This study develops an Internet of Things based production monitoring system on an experimental production line using ESP32, barcode scanners, Wi-Fi connectivity, Apps Script, and Spreadsheet as cloud-based data storage media. The system is used to record production parameters including cycle time, idle time, throughput, and work in process. The results show that the system is capable of recording and transmitting production data in real-time, enabling production performance analysis to be conducted more objectively. Furthermore, the developed system enables real-time production monitoring, allowing the workstation with the highest cycle time to be objectively identified as the main bottleneck, while also demonstrating the potential implementation of smart manufacturing in small-scale production environments.

Keywords : *Bottleneck; Internet of Things; Monitoring Produksi; Lini Produksi Eksperimental; Industri Skala Kecil; Smart manufacturing*

Abstrak : Industri skala kecil membutuhkan sistem *monitoring* produksi yang sederhana dan terjangkau untuk mendukung digitalisasi. Namun, pencatatan data produksi masih sering dilakukan secara manual sehingga analisis *bottleneck* menjadi kurang efektif dan cenderung subjektif. Penelitian ini mengembangkan sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* pada lini produksi eksperimental menggunakan ESP32, *barcode scanner*, koneksi *Wi-Fi*, *Apps Script*, dan *Spreadsheet* sebagai media penyimpanan data berbasis *cloud*. Sistem digunakan untuk merekam parameter produksi berupa *cycle time*, *idle time*, *throughput*, dan *WIP*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mencatat, memproses, dan mengirimkan data produksi secara real-time dengan tingkat ketepatan yang baik, sehingga analisis performa produksi dapat dilakukan secara lebih objektif, cepat, terukur, dan mendukung pengambilan keputusan operasional. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan memantau data produksi secara *real-time*, sehingga stasiun dengan *cycle time* tertinggi dapat diidentifikasi sebagai *bottleneck* utama secara objektif, sekaligus menunjukkan potensi penerapan *smart manufacturing* pada lingkungan produksi skala kecil.

Kata Kunci : *Bottleneck*; Internet of Things; Monitoring Produksi; Lini Produksi Eksperimental; Industri Skala Kecil; *Smart manufacturing*

PENDAHULUAN

Industri kecil dan menengah memiliki peran penting dalam perekonomian Indonesia, tetapi masih menghadapi berbagai tantangan dalam meningkatkan efisiensi dan visibilitas proses produksi (Indriastuti & Kartika, 2022). Salah satu tantangan tersebut adalah keterbatasan akses terhadap sistem *monitoring* produksi yang mampu menyajikan data secara *real-time*. Pada banyak lingkungan produksi berskala kecil, pemantauan proses masih dilakukan secara manual atau semi-manual melalui pengamatan operator, pencatatan sederhana, atau pengukuran waktu menggunakan *stopwatch*. Cara tersebut relatif mudah diterapkan, tetapi memiliki keterbatasan dari sisi akurasi, konsistensi, kontinuitas, dan kecepatan penyajian data (Huang et al., 2022; Wang et al., 2024). Padahal, data produksi seperti *cycle time*, *idle time*, *throughput*, dan *work in process* (*WIP*) diperlukan untuk memahami kondisi aktual produksi dan mendukung pengambilan keputusan perbaikan proses (Kumbhar et al., 2023; Skoogh et al., 2023).

Salah satu permasalahan penting yang dapat dianalisis melalui data produksi adalah terjadinya *bottleneck*. *Bottleneck* merupakan kondisi ketika suatu stasiun kerja, mesin, atau tahapan proses memiliki kapasitas lebih rendah atau waktu proses lebih lama dibandingkan bagian lain dalam lini produksi. Kondisi ini dapat membatasi keluaran sistem secara keseluruhan, menyebabkan penumpukan *WIP*, meningkatkan waktu tunggu, menurunkan *throughput*, serta mengganggu kelancaran aliran produksi (Skoogh et al., 2023). Dalam sistem produksi yang dinamis, lokasi *bottleneck* juga dapat berubah mengikuti variasi waktu proses, kondisi operasional, dan pola aliran produk (Kumbhar et al., 2022, 2023; Skoogh et al., 2023). Oleh karena itu, identifikasi *bottleneck* membutuhkan data performa yang akurat, kontinu, dan merepresentasikan kondisi aktual pada setiap stasiun kerja.

Penerapan sistem *monitoring* produksi *real-time* pada industri berskala kecil tidak selalu mudah dilakukan. Sistem *monitoring* komersial atau berskala industri umumnya membutuhkan biaya investasi, kesiapan infrastruktur, kemampuan teknis, serta integrasi sistem yang tidak sederhana (Javaid et al., 2021; Kalsoom et al., 2021; Presciuttini & Portioli-Staudacher, 2024). Kondisi tersebut mendorong perlunya pendekatan *monitoring* produksi yang lebih sederhana, terjangkau, dan mudah diimplementasikan, khususnya pada lingkungan produksi berskala kecil dan menengah. Teknologi berbasis *Internet of Things* (*IoT*) menjadi salah satu alternatif yang potensial karena mampu menyediakan akuisisi data produksi secara otomatis dan *real-time* dengan biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan sistem *monitoring* industri konvensional (Azlan et al., 2023; Kalsoom et al., 2021; Noor-A-Rahim et al., 2022).

Selain mendukung proses *monitoring* produksi, penerapan *IoT* juga menjadi bagian penting dalam pengembangan *smart manufacturing* pada sistem produksi modern (Kalsoom et al., 2021; Wang et al., 2024; Waters et al., 2022). Integrasi sensor, komunikasi data, dan sistem *monitoring* berbasis *cloud* memungkinkan kondisi produksi dipantau secara *real-time* sehingga proses analisis performa produksi dapat dilakukan secara lebih cepat dan terstruktur (Tapia et al., 2024; Wang et al., 2024). Pendekatan tersebut juga meningkatkan visibilitas terhadap kondisi produksi dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data pada lingkungan manufaktur (Javaid et al., 2021; Presciuttini & Portioli-Staudacher, 2024; Žemla et al., 2023).

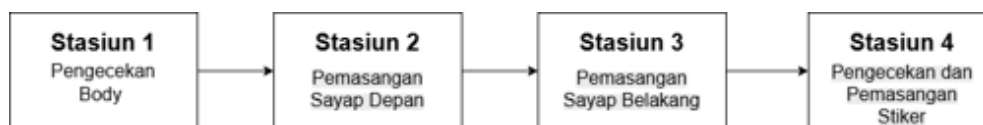
Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa penerapan sistem manufaktur cerdas berbasis *Internet of Things* dan konsep *virtual workstation* mampu meningkatkan integrasi data produksi, visibilitas proses, serta efektivitas *monitoring* produksi secara *real-time* pada lingkungan manufaktur *labor-intensive* (Raharno & Yosephine, 2024). Meskipun pengembangan sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* telah banyak diteliti pada berbagai lingkungan manufaktur, implementasinya pada industri berskala kecil dan menengah masih relatif terbatas karena keterbatasan biaya, infrastruktur, dan kompleksitas integrasi sistem.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* menggunakan ESP32, *barcode scanner*, *OLED display*, dan *Google Spreadsheet* pada lini produksi eksperimental. Sistem yang dikembangkan digunakan untuk

melakukan *monitoring data* produksi secara *real-time* serta mendukung proses identifikasi *bottleneck* berdasarkan parameter performa produksi berupa *cycle time*, *idle time*, *throughput*, dan *WIP*. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif solusi *monitoring* produksi yang sederhana, terjangkau, dan mudah diimplementasikan pada lingkungan produksi berskala kecil.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan pengembangan sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* dan pengujian sistem pada lini produksi eksperimental. Lini produksi eksperimental merupakan lini produksi skala laboratorium yang digunakan untuk mensimulasikan aliran produksi melalui beberapa stasiun kerja sehingga kondisi produksi nyata dapat direpresentasikan dalam lingkungan pengujian yang terkontrol. Sistem *monitoring* produksi dikembangkan menggunakan *ESP32* sebagai mikrokontroler utama, *barcode scanner* sebagai perangkat input data, *OLED display* sebagai media tampilan informasi, serta *Google Spreadsheet* sebagai media penyimpanan data berbasis *cloud* secara *real-time*. Sistem dirancang untuk melakukan pencatatan data produksi secara otomatis pada setiap stasiun kerja guna mendukung proses identifikasi *bottleneck* pada lini produksi. Penelitian dilakukan menggunakan empat stasiun kerja yang saling terhubung dalam satu aliran produksi eksperimental, yaitu:



Gambar 1. Pengerjaan Pada Setiap Stasiun

Setiap stasiun kerja dilengkapi dengan *barcode scanner*, *ESP32*, dan *OLED display* yang digunakan untuk melakukan *monitoring data* produksi secara otomatis. Sistem dirancang agar setiap stasiun dapat mengirimkan data produksi secara terus-menerus melalui jaringan *Wi-Fi* menuju *Google Spreadsheet* sebagai *database cloud*. Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan pada lini produksi terkait *bottleneck*. Selanjutnya dilakukan studi literatur mengenai sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT*, parameter performa produksi, dan metode identifikasi *bottleneck*. Setelah itu dilakukan perancangan sistem *monitoring* produksi, perancangan arsitektur komunikasi data, serta pengujian sistem pada lini produksi eksperimental. Alur kerja sistem *monitoring* produksi dimulai ketika produk dipindai menggunakan *barcode scanner* pada masing-masing stasiun kerja. Data hasil pemindaian diterima oleh *ESP32* melalui komunikasi serial *UART*. Selanjutnya *ESP32* mengolah data dan mengirimkannya melalui jaringan *Wi-Fi* menggunakan *Google Apps Script API* menuju *Google Spreadsheet*. Data yang tersimpan kemudian digunakan untuk menghitung parameter performa produksi berupa *cycle time*, *throughput*, *idle time*, dan *WIP* untuk proses analisis *bottleneck*.

Tabel 1. Variabel Penelitian

Variabel	Pengertian	Satuan	Sumber Data
<i>Cycle time</i>	Waktu proses per produk pada tiap stasiun	Detik/ unit	<i>Data sistem monitoring</i>
<i>Throughput</i>	Jumlah produk yang dihasilkan dalam periode waktu tertentu	Unit/ waktu	<i>Data sistem monitoring</i>
<i>Idle time</i>	Waktu menganggur stasiun kerja saat menunggu proses sebelumnya	Detik	<i>Data sistem monitoring</i>
<i>Work in Process (WIP)</i>	Jumlah produk yang sedang berada dalam proses produksi	Unit	<i>Data sistem monitoring</i>
<i>Timestamp</i>	Waktu pencatatan data produksi	Waktu	Google Spreadsheet
<i>Serial number Produk</i>	Identitas unik produk yang diproses	–	<i>Barcode scanner</i>

Parameter *throughput* dihitung menggunakan persamaan berikut (Standridge & Wynne, 2021):

$$T = \frac{N}{t}$$

Keterangan:

T = *Throughput* (unit/waktu)

N = Jumlah produk (unit)

t = Total waktu produksi (detik)

Nilai *throughput* diperoleh dari perbandingan antara jumlah produk yang berhasil diproses dengan total waktu produksi selama pengujian berlangsung pada masing-masing stasiun kerja. Parameter *cycle time* dihitung menggunakan persamaan berikut (University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia & Todić, 2023):

$$CT = \frac{t}{N}$$

Keterangan:

CT = *Cycle time* (detik/unit)

t = Total waktu produksi (detik)

N = Jumlah produk (unit)

Hubungan antara *WIP*, *throughput*, dan *cycle time* mengikuti *Little's Law* sebagai berikut (Deenen et al., 2024):

$$WIP = T \times CT$$

Keterangan:

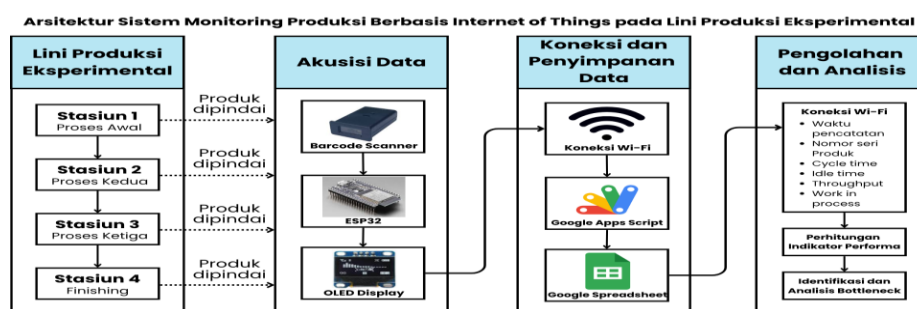
WIP = Jumlah produk dalam proses (unit)

T = *Throughput* (unit/waktu)

CT = *Cycle time* (detik/unit)

Idle time dihitung berdasarkan selisih waktu ketika stasiun kerja selesai memproses produk sebelumnya hingga produk berikutnya mulai diproses pada stasiun tersebut. Data yang diperoleh dianalisis dengan membandingkan nilai *cycle time* dan jumlah *WIP* pada setiap stasiun kerja. Stasiun dengan nilai *cycle time* tertinggi dan penumpukan *WIP* terbesar diidentifikasi sebagai *bottleneck* pada sistem produksi.

Diagram Arsitektur Sistem



Gambar 2. Diagram Arsitektur Sistem

Sistem monitoring produksi berbasis *IoT* pada penelitian ini terdiri dari empat stasiun kerja yang saling terhubung melalui sistem *monitoring real-time*. Setiap stasiun menggunakan *barcode scanner* untuk membaca identitas produk, kemudian data dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi serial. ESP32 memproses data dan mengirimkannya ke *Google Spreadsheet* menggunakan jaringan *Wi-Fi* dan *Google Apps Script API*. *Google Spreadsheet* berfungsi sebagai *database cloud* untuk

menyimpan data produksi secara *real-time*. Data tersebut kemudian digunakan untuk melakukan analisis performa produksi meliputi *cycle time*, *throughput*, *idle time*, dan *WIP*. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi *bottleneck* pada lini produksi.

Diagram *Wiring Sistem* dan Konfigurasi Stasiun Kerja

Penelitian dilakukan menggunakan empat stasiun kerja pada lini produksi eksperimental. Penambahan jumlah stasiun dilakukan untuk menghasilkan variasi aliran produksi yang lebih kompleks *sehingga* proses identifikasi *bottleneck* dapat dilakukan dengan lebih realistis. Sistem produksi yang digunakan terdiri dari empat tahapan proses yang saling terhubung melalui sistem *monitoring* berbasis *IoT*.

Tabel 2. Proses Kerja Tiap Stasiun

No	Stasiun	Jenis Pengerjaan
1	Stasiun 1	Pengecekan <i>Body</i>
2	Stasiun 2	Pemasangan sayap depan
3	Stasiun 3	Pemasangan sayap belakang
4	Stasiun 4	Pemasangan stiker dan pengecekan

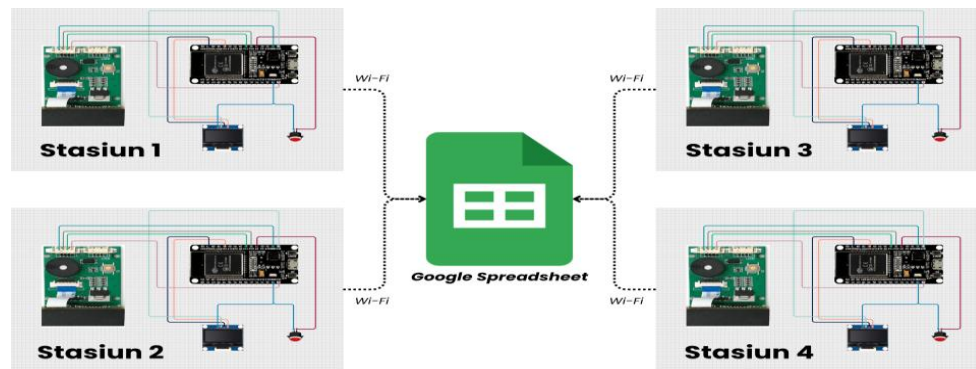
Setiap stasiun kerja dilengkapi dengan *barcode scanner*, ESP32, dan *OLED display* yang saling terhubung melalui konfigurasi *wiring* tertentu. *Barcode scanner* digunakan untuk membaca identitas produk pada setiap tahapan proses produksi, kemudian data hasil pembacaan dikirim menuju ESP32 melalui komunikasi serial *UART* untuk diproses lebih lanjut. Selain *barcode scanner*, setiap stasiun kerja juga dilengkapi dengan *push button* yang digunakan sebagai tombol *reset* sistem. Selanjutnya, informasi hasil pembacaan *barcode* ditampilkan pada *OLED display* sebagai indikator keberhasilan pembacaan dan status pengiriman data. Hubungan antar perangkat pada sistem ditunjukkan melalui diagram *wiring* sistem, sedangkan detail koneksi pin antar komponen dijelaskan pada Tabel konfigurasi koneksi komponen. Diagram *wiring* digunakan untuk menggambarkan alur komunikasi data antar perangkat keras pada setiap stasiun kerja sehingga proses integrasi sistem *monitoring* produksi dapat berjalan secara *real-time* dan terstruktur.

Pada sistem yang dikembangkan, ESP32 berfungsi sebagai mikrokontroler utama yang menerima data hasil pembacaan *barcode*, mengolah data produksi, serta mengirimkan data menuju *Google Spreadsheet* menggunakan jaringan *Wi-Fi* dan *Google Apps Script API*. Data yang berhasil dikirim kemudian digunakan sebagai dasar analisis performa produksi seperti *cycle time*, *throughput*, *idle time*, dan *WIP*.

Tabel 3. Konfigurasi Koneksi Komponen

No	Komponen	Pin ESP32	Fungsi
1	<i>Barcode scanner TX</i>	<i>RX</i> ESP32	Mengirim data <i>barcode</i>
2	<i>Barcode scanner RX</i>	<i>TX</i> ESP32	Komunikasi serial
3	<i>OLED SDA</i>	<i>GPIO</i> 21	Jalur data I2C
4	<i>OLED SCL</i>	<i>GPIO</i> 22	Jalur <i>clock</i> I2C
5	<i>VCC OLED</i>	3.3V	Sumber daya
6	<i>GND OLED</i>	<i>GND</i>	<i>Ground</i>
7	<i>Button Pin</i>	<i>GPIO</i> 4	Jalur data
8	<i>Button GND</i>	<i>GND</i>	<i>Ground</i>
9	ESP32 <i>Wi-Fi</i>	Internal	Pengiriman data <i>cloud</i>

Melalui konfigurasi *wiring* tersebut, setiap komponen dapat bekerja secara terintegrasi dalam mendukung proses *monitoring* produksi secara otomatis. Dengan demikian, diagram *wiring* dan konfigurasi koneksi komponen menjadi bagian penting dalam mendukung keberhasilan implementasi sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* pada lini produksi eksperimental.



Gambar 3. Diagram *Wiring* Sistem *Monitoring* Produksi Berbasis *IoT* pada Lini Produksi Eksperimental

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Implementasi Sistem *IoT*

Sistem *monitoring* produksi berbasis *Internet of Things* berhasil diimplementasikan pada lini produksi eksperimental menggunakan empat stasiun kerja yang saling terhubung melalui jaringan internet. Sistem terdiri dari ESP32 sebagai mikrokontroler utama, *barcode scanner* sebagai perangkat *input data*, *OLED display* sebagai media tampilan informasi, serta *Google Spreadsheet* sebagai media penyimpanan data produksi secara *real-time*. Implementasi sistem ini juga menjadi dasar awal pengembangan *digital twin* pada sistem produksi skala kecil. Pada setiap stasiun kerja, *barcode scanner* digunakan untuk membaca identitas produk yang sedang diproses. Data hasil pembacaan *barcode* kemudian dikirim menuju ESP32 melalui komunikasi serial *UART* untuk diproses lebih lanjut. Selanjutnya, ESP32 mengirimkan data produksi menuju *Google Spreadsheet* menggunakan koneksi *Wi-Fi* dan *Google Apps Script API*. Selain itu, *OLED display* digunakan untuk menampilkan status pembacaan *barcode* dan proses pengiriman data pada masing-masing stasiun kerja.

Dengan adanya sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT*, proses *monitoring* produksi menjadi lebih efektif karena data produksi dapat diperoleh secara otomatis dan kontinu. Data tersebut kemudian digunakan untuk melakukan analisis performa produksi seperti *cycle time*, *throughput*, *idle time*, dan *work in process* dalam proses identifikasi *bottleneck* pada lini produksi eksperimental. Setiap perubahan kondisi produksi dapat langsung ditampilkan pada *Google Spreadsheet* sehingga operator dapat melakukan pemantauan performa produksi tanpa pencatatan manual.

Pengujian Sistem dan Skenario Eksperimen

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem *monitoring* produksi berbasis *Internet of Things* dalam melakukan *monitoring* data produksi secara *real-time* serta mendukung proses identifikasi *bottleneck* pada lini produksi eksperimental. Pengujian dilakukan menggunakan empat stasiun kerja yang saling terhubung melalui jaringan *Wi-Fi* dan *Google Spreadsheet* sebagai media penyimpanan data produksi berbasis *cloud*. Skenario pengujian dilakukan dengan mengalirkan produk secara berurutan melalui seluruh stasiun kerja, mulai dari Stasiun 1 hingga Stasiun 4. Setiap produk dipindai menggunakan *barcode scanner* pada masing-masing stasiun kerja sehingga sistem dapat merekam data produksi secara otomatis pada setiap tahapan proses. Data hasil pembacaan *barcode* diterima oleh ESP32 melalui komunikasi serial *UART* untuk diproses lebih lanjut, kemudian dikirim menuju *Google Spreadsheet* menggunakan *Google Apps Script API* melalui jaringan *Wi-Fi*.

Pengujian dilakukan sebanyak dua kali percobaan. Pada percobaan pertama, sistem mengalami kendala pada Stasiun 4 akibat ketidakstabilan koneksi ESP32 sehingga proses pengiriman data belum berjalan secara optimal. Setelah dilakukan penggantian modul ESP32 dan optimasi koneksi *Wi-Fi*, percobaan kedua menunjukkan bahwa seluruh stasiun kerja mampu melakukan pengiriman data secara *real-time* dan sinkron. Pada setiap percobaan digunakan 10 produk uji yang diproses secara berurutan melalui seluruh stasiun kerja pada lini produksi eksperimental. Dengan empat stasiun kerja yang digunakan, total data utama yang berhasil dikumpulkan mencapai 40 data proses produksi pada setiap percobaan. Data yang direkam

meliputi *timestamp*, *serial number* produk, *cycle time*, *idle time*, *output*, dan *work in process* pada masing-masing stasiun kerja. Data hasil pengujian kemudian digunakan untuk mengevaluasi performa sistem *monitoring* produksi dan melakukan analisis *bottleneck* berdasarkan parameter performa produksi pada setiap stasiun kerja.

Tabel 4. Hasil Pengujian Sistem

Parameter	Eksperimen 1	Eksperimen 2
Jumlah Stasiun	3 dari 4	4 dari 4
Pengiriman data	Tidak stabil	Stabil
Sinkronisasi <i>Spreadsheet</i>	Tidak <i>real-time</i>	<i>Real-time</i>
Status Sistem	Perlu perbaikan	Berhasil

Monitoring Data Produksi Secara *real-time*

Sistem *monitoring* produksi berbasis *Internet of Things* berhasil melakukan *monitoring* data produksi secara *real-time* menggunakan *Google Spreadsheet* sebagai media penyimpanan data berbasis *cloud*. Data yang dikirim oleh setiap stasiun kerja tersimpan secara otomatis sehingga dapat diakses untuk proses analisis performa produksi secara langsung. Data produksi yang tersimpan meliputi *timestamp*, *serial number* produk, *cycle time*, *idle time*, serta *throughput* pada setiap stasiun kerja. Dengan adanya sistem *monitoring real-time*, operator dapat memantau kondisi produksi secara langsung tanpa melakukan pencatatan manual sehingga proses pengumpulan data menjadi lebih efektif dan akurat. Implementasi *monitoring real-time* juga meningkatkan visibilitas terhadap kondisi produksi karena perubahan performa pada setiap stasiun dapat diketahui secara langsung. Data yang tersimpan pada *Google Spreadsheet* kemudian digunakan sebagai dasar analisis *bottleneck* berdasarkan parameter performa produksi pada masing-masing stasiun kerja.

Monitoring Data Produksi pada Stasiun 1

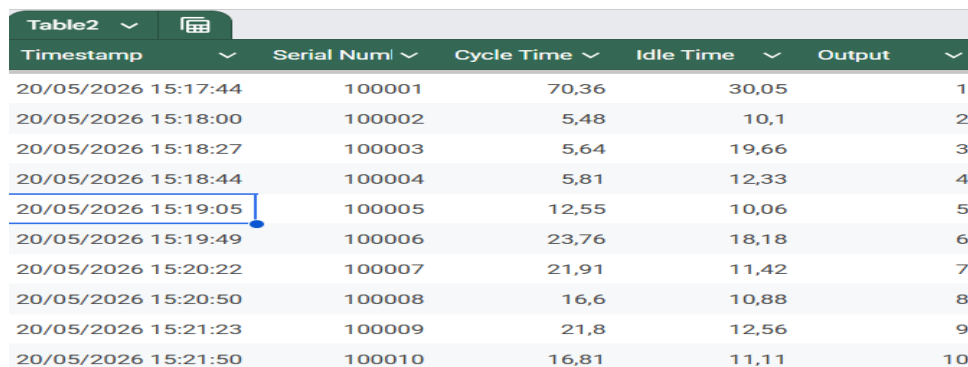


Timestamp	Serial Num	Cycle Time	Idle Time	Output	
20/05/2026 15:17:36	100001	8,68	6,32		1
20/05/2026 15:17:51	100002	9,16	16,84		2
20/05/2026 15:18:17	100003	8,97	18		3
20/05/2026 15:18:33	100004	9,01	7,91		4
20/05/2026 15:18:49	100005	5,98	8,87		5
20/05/2026 15:19:20	100006	19,75	12,26		6
20/05/2026 15:19:56	100007	27,52	6,97		7
20/05/2026 15:20:29	100008	24,77	8,27		8
20/05/2026 15:20:59	100009	21,61	7,91		9
20/05/2026 15:21:31	100010	10,61	21,8		10

Gambar 4. Monitoring Data Produksi *real-time* pada Stasiun 1

Gambar 4 menunjukkan hasil *monitoring* data produksi pada Stasiun 1. Sistem berhasil mencatat data produksi berupa *timestamp*, *serial number*, *cycle time*, *idle time*, dan *throughput* secara otomatis pada *Google Spreadsheet*. Pada Stasiun 1, nilai *cycle time* berada pada rentang 5,98–27,52 detik dengan *throughput* yang meningkat secara bertahap sesuai jumlah produk yang diproses.

Monitoring Data Produksi pada Stasiun 2



Timestamp	Serial Num	Cycle Time	Idle Time	Output	
20/05/2026 15:17:44	100001	70,36	30,05		1
20/05/2026 15:18:00	100002	5,48	10,1		2
20/05/2026 15:18:27	100003	5,64	19,66		3
20/05/2026 15:18:44	100004	5,81	12,33		4
20/05/2026 15:19:05	100005	12,55	10,06		5
20/05/2026 15:19:49	100006	23,76	18,18		6
20/05/2026 15:20:22	100007	21,91	11,42		7
20/05/2026 15:20:50	100008	16,6	10,88		8
20/05/2026 15:21:23	100009	21,8	12,56		9
20/05/2026 15:21:50	100010	16,81	11,11		10

Gambar 5. Monitoring Data Produksi *real-time* pada Stasiun 2

Gambar 5 menunjukkan hasil *monitoring* data produksi pada Stasiun 2. Berdasarkan data yang diperoleh, Stasiun 2 memiliki nilai *cycle time* tertinggi dibandingkan stasiun lainnya dengan nilai maksimum mencapai 70,36 detik. Nilai *cycle time* yang tinggi menunjukkan bahwa Stasiun 2 membutuhkan waktu proses lebih lama sehingga berpotensi menjadi *bottleneck* pada lini produksi eksperimental.

Monitoring Data Produksi pada Stasiun 3

Timestamp	Serial Numl	Cycle Time	Idle Time	Output
20/05/2026 15:17:57	100001	10,66	89,98	1
20/05/2026 15:18:10	100002	6,75	5,85	2
20/05/2026 15:18:39	100003	10,09	17,84	3
20/05/2026 15:18:57	100004	10,45	8,66	4
20/05/2026 15:19:25	100005	16,77	10,06	5
20/05/2026 15:20:02	100006	9,32	27,23	6
20/05/2026 15:20:39	100007	12,73	25,62	7
20/05/2026 15:21:09	100008	13,36	13,59	8
20/05/2026 15:21:40	100009	10,89	20,29	9
20/05/2026 15:22:15	100010	10,89	17,08	10

Gambar 6. Monitoring Data Produksi *real-time* pada Stasiun 3

Gambar 6 menunjukkan hasil *monitoring* data produksi pada Stasiun 3. Berdasarkan data hasil *monitoring*, Stasiun 3 memiliki nilai *idle time* yang relatif tinggi dibandingkan stasiun lainnya dengan nilai maksimum mencapai 89,98 detik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa Stasiun 3 lebih sering berada dalam kondisi menunggu proses dari stasiun sebelumnya.

Monitoring Data Produksi pada Stasiun 4

Timestamp	Serial Numl	Cycle Time	Idle Time	Output
20/05/2026 15:18:39	100001	7,59	34,63	1
20/05/2026 15:18:58	100002	7,57	11,93	2
20/05/2026 15:19:18	100003	7,37	11,95	3
20/05/2026 15:19:39	100004	8,32	13,1	4
20/05/2026 15:19:57	100005	7,65	10,59	5
20/05/2026 15:20:24	100006	8,15	14,45	6
20/05/2026 15:20:55	100007	6,06	10,4	7
20/05/2026 15:21:30	100008	7,21	14,3	8
20/05/2026 15:22:01	100009	7,75	13,08	9
20/05/2026 15:22:58	100010	11,02	32,21	10

Gambar 7. Monitoring Data Produksi *real-time* pada Stasiun 4

Gambar 7 menunjukkan hasil *monitoring* data produksi pada Stasiun 4 sebagai stasiun *finishing* dan pengecekan produk. Data hasil *monitoring* menunjukkan bahwa proses produksi pada stasiun ini berjalan relatif stabil dengan nilai *cycle time* berada pada rentang 6,06–11,02 detik.

Analisis Performa Produksi

Data hasil *monitoring* produksi diolah untuk memperoleh parameter performa produksi berupa *cycle time*, *idle time*, dan *throughput* pada masing-masing stasiun kerja.

Rata-rata Cycle time

Tabel 5. Data Rata-rata *Cycle time*

No	Stasiun	Rata-rata <i>Cycle time</i> (detik/unit)
1	Stasiun 1	14,61
2	Stasiun 2	20,07
3	Stasiun 3	11,19
4	Stasiun 4	7,95

Berdasarkan Tabel 5 rata-rata *cycle time*, Stasiun 2 memiliki nilai *cycle time* tertinggi dibandingkan stasiun lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa Stasiun 2 membutuhkan waktu proses lebih lama sehingga berpotensi menjadi *bottleneck* pada sistem produksi.

Cycle time Maksimum

Tabel 6. Data *Cycle time* Maksimum

No	Stasiun	<i>Cycle time</i> Maksimum
1	Stasiun 1	27,52
2	Stasiun 2	70,36
3	Stasiun 3	16,77
4	Stasiun 4	11,02

Berdasarkan Tabel 6, Stasiun 2 memiliki nilai *cycle time* maksimum tertinggi yaitu sebesar 70,36 detik. Nilai tersebut menunjukkan adanya variasi waktu proses yang cukup besar pada stasiun tersebut sehingga dapat menyebabkan keterlambatan aliran produksi.

Idle time

Tabel 7. Data Rata-rata *Idle time*

No	Stasiun	Rata-rata <i>Idle time</i> (detik)
1	Stasiun 1	11,51
2	Stasiun 2	14,64
3	Stasiun 3	23,62
4	Stasiun 4	16,46

Berdasarkan Tabel 7, Stasiun 3 memiliki nilai *idle time* tertinggi dibandingkan stasiun lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa stasiun tersebut lebih sering berada dalam kondisi menunggu proses dari stasiun sebelumnya.

Throughput

Tabel 8. Data *Throughput*

No	Stasiun	<i>Throughput</i>
1	Stasiun 1	0,068 unit/detik
2	Stasiun 2	0,050 unit/detik
3	Stasiun 3	0,089 unit/detik
4	Stasiun 4	0,126 unit/detik

Berdasarkan Tabel 8, nilai *throughput* pada setiap stasiun menunjukkan perbedaan kemampuan output produksi. Stasiun 4 memiliki *throughput* tertinggi sebesar 0,126 unit/detik, sedangkan Stasiun 2 memiliki *throughput* terendah sebesar 0,050 unit/detik. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kecepatan proses produksi pada masing-masing stasiun tidak sama sehingga mempengaruhi kelancaran aliran produksi pada lini produksi eksperimental.

Work in Process

Tabel 9. Data *WIP*

No	Stasiun	<i>WIP</i>
1	Stasiun 1	1
2	Stasiun 2	3
3	Stasiun 3	2
4	Stasiun 4	1

Berdasarkan Tabel 9, nilai *WIP* pada setiap stasiun menunjukkan jumlah produk yang berada dalam proses produksi pada saat *monitoring* dilakukan. Meskipun jumlah produk yang diproses pada seluruh stasiun relatif sama, nilai *throughput* dapat berbeda karena dipengaruhi oleh perbedaan waktu proses pada masing-masing stasiun kerja. Hal ini dapat mempengaruhi nilai *WIP* karena adanya perbedaan waktu proses pada masing-masing stasiun kerja. Stasiun 2 memiliki nilai *WIP* tertinggi dibandingkan stasiun lainnya. Kondisi tersebut menunjukkan adanya akumulasi produk pada stasiun tersebut akibat waktu proses yang lebih lama dibandingkan stasiun lain.

Tingginya nilai *cycle time* pada Stasiun 2 menyebabkan aliran produksi menjadi lebih lambat sehingga produk cenderung menunggu untuk diproses.

Selain itu, nilai *WIP* pada Stasiun 3 juga relatif lebih tinggi dibandingkan Stasiun 1 dan Stasiun 4. Hal ini menunjukkan bahwa keterlambatan proses pada Stasiun 2 memengaruhi kelancaran aliran produksi pada stasiun berikutnya. Dengan demikian, data *WIP* mendukung hasil analisis bahwa Stasiun 2 merupakan *bottleneck* utama pada lini produksi eksperimental.

Analisis *Bottleneck* pada Lini Produksi

Analisis *bottleneck* dilakukan dengan membandingkan parameter *cycle time*, *idle time*, *throughput*, dan *WIP* pada setiap stasiun kerja. Dalam sistem produksi, stasiun kerja dengan *cycle time* tertinggi cenderung menjadi hambatan utama karena membutuhkan waktu proses lebih lama dibandingkan stasiun lainnya. Kondisi tersebut dapat memengaruhi kelancaran aliran produksi, menurunkan *throughput* sistem, serta menyebabkan penumpukan produk pada proses tertentu.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Stasiun 2 memiliki rata-rata *cycle time* sebesar 20,07 detik/unit dengan *cycle time* maksimum mencapai 70,36 detik/unit. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan Stasiun 1, Stasiun 3, dan Stasiun 4 sehingga Stasiun 2 teridentifikasi sebagai *bottleneck* pada lini produksi eksperimental. Tingginya *cycle time* pada Stasiun 2 menunjukkan bahwa proses pada stasiun tersebut membutuhkan waktu lebih lama untuk menyelesaikan satu produk sehingga kapasitas produksinya lebih rendah dibandingkan stasiun lainnya.

Kondisi tersebut memengaruhi parameter performa produksi lainnya, khususnya *throughput* dan *WIP*. Berdasarkan hasil pengamatan, Stasiun 2 memiliki *throughput* terendah sebesar 0,050 unit/detik. Nilai *throughput* yang rendah menunjukkan bahwa kemampuan *output* produksi pada stasiun tersebut lebih kecil dibandingkan stasiun lainnya sehingga aliran produksi menjadi lebih lambat. Selain itu, Stasiun 2 juga memiliki nilai *WIP* tertinggi sebesar 3 unit. Tingginya nilai *WIP* menunjukkan adanya penumpukan produk pada stasiun tersebut akibat waktu proses yang lebih lama dibandingkan stasiun lainnya.

Hubungan antara *cycle time*, *throughput*, dan *WIP* menunjukkan bahwa peningkatan *cycle time* pada Stasiun 2 menyebabkan laju perpindahan produk menjadi lebih lambat sehingga produk cenderung menunggu lebih lama untuk diproses. Kondisi ini mengakibatkan akumulasi produk pada area proses dan meningkatkan nilai *WIP* pada stasiun tersebut. Dengan demikian, kombinasi nilai *cycle time* yang tinggi, *throughput* yang rendah, dan *WIP* yang besar memperkuat identifikasi bahwa Stasiun 2 merupakan *bottleneck* utama pada lini produksi. Selain itu, hasil pengamatan menunjukkan bahwa *bottleneck* yang terjadi bersifat dinamis karena nilai *cycle time* maksimum pada Stasiun 2 mengalami peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan nilai rata-ratanya. Hal ini mengindikasikan adanya variasi waktu proses yang dipengaruhi oleh kondisi operasional selama simulasi produksi berlangsung. Variasi tersebut menyebabkan tingkat kelancaran aliran produksi berubah selama proses produksi berjalan.

Dampak *bottleneck* pada Stasiun 2 juga terlihat pada nilai *idle time* Stasiun 3 yang mencapai 23,62 detik dan merupakan nilai *idle time* tertinggi dibandingkan stasiun lainnya. Tingginya *idle time* menunjukkan bahwa Stasiun 3 lebih sering berada dalam kondisi menunggu produk dari proses sebelumnya akibat keterlambatan proses pada Stasiun 2. Kondisi ini menunjukkan bahwa *bottleneck* tidak hanya memengaruhi stasiun yang mengalami hambatan, tetapi juga memengaruhi performa stasiun kerja berikutnya melalui peningkatan waktu tunggu dan ketidakseimbangan aliran produksi. Berdasarkan hubungan antara *cycle time*, *throughput*, *WIP*, dan *idle time* tersebut, dapat disimpulkan bahwa Stasiun 2 merupakan *bottleneck* utama pada lini produksi eksperimental karena memiliki waktu proses paling tinggi, kemampuan *output* paling rendah, serta menyebabkan penumpukan produk dan peningkatan waktu tunggu pada stasiun berikutnya.

Pembahasan Umum

Implementasi *IoT* pada penelitian ini memberikan kemampuan monitoring produksi secara *real-time* sehingga proses identifikasi *bottleneck* dapat dilakukan lebih cepat dibandingkan metode konvensional. Sistem yang dikembangkan mampu mengintegrasikan proses pengambilan data, pengiriman data, dan penyimpanan data secara otomatis tanpa intervensi manual. Penggunaan ESP32 sebagai mikrokontroler utama memberikan fleksibilitas dalam pengiriman data melalui jaringan internet dengan konsumsi daya yang relatif rendah. Selain itu, penggunaan *Google Spreadsheet* sebagai media penyimpanan memungkinkan data produksi dapat diakses dan

dianalisis secara langsung. Pendekatan berbasis *IoT* juga meningkatkan visibilitas terhadap kondisi produksi karena operator dapat mengetahui perubahan performa setiap stasiun secara *real-time*. Dengan demikian, proses pengambilan keputusan untuk mengatasi *bottleneck* dapat dilakukan lebih cepat dan berbasis data aktual.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* mampu mendukung proses analisis performa produksi melalui parameter *cycle time*, *idle time*, *throughput*, dan *WIP*. Berdasarkan hasil monitoring tersebut, *bottleneck* pada lini produksi eksperimental dapat diidentifikasi secara lebih terstruktur dibandingkan metode pencatatan manual. Penelitian ini masih dilakukan pada skala laboratorium dengan jumlah produk dan variasi proses yang terbatas sehingga sistem yang dikembangkan belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi industri yang kompleks. Selain itu, sistem monitoring produksi berbasis *IoT* yang dikembangkan belum dilengkapi dengan *dashboard* visual interaktif maupun analisis *bottleneck* otomatis secara *real-time*. Meskipun demikian, sistem yang dikembangkan memiliki potensi untuk diterapkan pada lingkungan produksi yang lebih besar dengan penambahan fitur *monitoring* dan integrasi sistem analisis data yang lebih kompleks pada penelitian selanjutnya.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* berhasil diimplementasikan pada lini produksi eksperimental menggunakan empat stasiun kerja yang terintegrasi melalui jaringan internet. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan *monitoring* data produksi secara *real-time* menggunakan ESP32, *barcode scanner*, *OLED display*, dan *Google Spreadsheet* sebagai media penyimpanan data berbasis *cloud*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pengiriman data produksi secara otomatis dan sinkron pada setiap stasiun kerja setelah dilakukan perbaikan pada modul ESP32 yang mengalami gangguan koneksi. Implementasi sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* memungkinkan proses *monitoring* produksi dilakukan secara lebih efektif dibandingkan metode pencatatan manual karena data produksi dapat diperoleh secara kontinu dan *real-time*.

Berdasarkan hasil analisis performa produksi, Stasiun 2 teridentifikasi sebagai *bottleneck* pada lini produksi eksperimental karena memiliki rata-rata *cycle time* tertinggi sebesar 20,07 detik/unit, *throughput* terendah sebesar 0,050 unit/detik, serta memengaruhi peningkatan *idle time* pada Stasiun 3. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keterlambatan proses pada Stasiun 2 menyebabkan aliran produksi menjadi tidak seimbang. Selain itu, implementasi *IoT* pada penelitian ini berhasil meningkatkan visibilitas kondisi produksi sehingga proses identifikasi *bottleneck* dapat dilakukan secara lebih cepat dan berbasis data aktual. Sistem yang dikembangkan juga menunjukkan potensi untuk mendukung penerapan *smart manufacturing* melalui integrasi monitoring produksi dan analisis performa produksi secara digital. Meskipun penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *monitoring* produksi berbasis *IoT* memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut pada skala industri dengan penambahan fitur *monitoring* yang lebih kompleks dan integrasi sistem analisis data secara otomatis.

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

- Azlan, A. T. B. N. N., Mativenga, P. T., Zhu, M., & Mirhosseini, N. (2023). Industry 4.0 energy monitoring system for multiple production machines. *Procedia CIRP*, 120, 613–618. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.047>
- Deenen, P. C., Middelhuis, J., Akcay, A., & Adan, I. J. B. F. (2024). Data-driven aggregate modeling of a semiconductor wafer fab to predict WIP levels and *cycle time* distributions. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 36(2), 567–596. <https://doi.org/10.1007/s10696-023-09501-1>

- Huang, Z., Jowers, C., Kent, D., Dehghan-Manshadi, A., & Dargusch, M. S. (2022). The implementation of Industry 4.0 in manufacturing: From lean manufacturing to product design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(5–6), 3351–3367. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09511-7>
- Indriastuti, M., & Kartika, I. (2022). The Impact of Digitalization on MSMEs' Financial Performance: The Mediating Role of Dynamic Capability. *Jurnal Economia*, 18(2), 240–255. <https://doi.org/10.21831/economia.v18i2.42790>
- Javaid, M., Abid Haleem, Pratap Singh, R., Rab, S., & Suman, R. (2021). Upgrading the manufacturing sector via applications of Industrial Internet of Things (IIoT). *Sensors International*, 2, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100129>
- Kalsoom, T., Ahmed, S., Rafi-ul-Shan, P. M., Azmat, M., Akhtar, P., Pervez, Z., Imran, M. A., & Ur-Rehman, M. (2021). Impact of IoT on Manufacturing Industry 4.0: A New Triangular Systematic Review. *Sustainability*, 13(22), 12506. <https://doi.org/10.3390/su132212506>
- Kumbhar, M., Ng, A. H. C., & Bandaru, S. (2022). Bottleneck Detection Through Data Integration, Process Mining and Factory Physics-Based Analytics. In A. H. C. Ng, A. Syberfeldt, D. Högborg, & M. Holm (Eds.), *Advances in Transdisciplinary Engineering*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/ATDE220192>
- Kumbhar, M., Ng, A. H. C., & Bandaru, S. (2023). A digital twin based framework for detection, diagnosis, and improvement of throughput bottlenecks. *Journal of Manufacturing Systems*, 66, 92–106. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.11.016>
- Noor-A-Rahim, M., John, J., Fryaguna, F., Zorbas, D., Sherazi, H. H. R., Kushch, S., Connell, E. O., Pesch, D., Flynn, B. O., Hayes, M., & Armstrong, E. (2022). *Wireless Communications for Smart manufacturing and Industrial IoT: Existing Technologies, 5G, and Beyond* (arXiv:2208.06697). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.06697>
- Presciuttini, A., & Portioli-Staudacher, A. (2024). Applications of IoT and Advanced Analytics for manufacturing operations: A systematic literature review. *Procedia Computer Science*, 232, 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.032>
- 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 (IJIDeM)*, 18(1), 465–478. <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01567-3>
- Skoogh, A., Thürer, M., Subramaniyan, M., Matta, A., & Roser, C. (2023). Throughput bottleneck detection in manufacturing: A systematic review of the literature on methods and operationalization modes. *Production & Manufacturing Research*, 11(1), 2283031. <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2283031>
- Standridge, C., & Wynne, M. (2021). Validation of production system throughput potential and simulation experiment design. *International Journal of Production Management and Engineering*, 9(1), 15. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2021.14483>
- Tapia, E., Lopez-Novoa, U., Sastoque-Pinilla, L., & López-de-Lacalle, L. N. (2024). Implementation of a scalable platform for real-time monitoring of machine tools. *Computers in Industry*, 155, 104065. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104065>
- University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, 21000 Novi Sad, Serbia, & Todić, V. (2023). Integrated model of product manufacturing cycle time estimation. *Journal of Production Engineering*, 26(2), 7–12. <https://doi.org/10.24867/JPE-2023-02-007>
- 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), 1–25. <https://doi.org/10.4018/JOEUC.336482>
- Waters, M., Waszczuk, P., Ayre, R., Dreze, A., McGlinchey, D., Alkali, B., & Morison, G. (2022). Open Source IIoT Solution for Gas Waste Monitoring in Smart Factory. *Sensors*, 22(8), 2972. <https://doi.org/10.3390/s22082972>

Žemla, F., Cigánek, J., Rosinová, D., Kučera, E., & Haffner, O. (2023). Smart Platform for Monitoring and Control of Discrete Event System in Industry 4.0 Concept. *Applied Sciences*, *13*(19), 10697. <https://doi.org/10.3390/app131910697>