

## PENGARUH OTOMATISASI SISTEM MESIN MARKING TERHADAP DOWNTIME MESIN MARKING DENGAN METODE DMAIC PADA PT. XYZ

Dino Afrilian<sup>1\*</sup>, Hanif Rezky Pradana<sup>2</sup>, Najma Faiqi Aribino<sup>3</sup>, Yudi Prasetyo<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Universitas Pelita Bangsa, Indonesia

[dinoafriilian.ie23c10@gmail.com](mailto:dinoafriilian.ie23c10@gmail.com)<sup>1</sup>, [hanifrezkyp@gmail.com](mailto:hanifrezkyp@gmail.com)<sup>2</sup>, [najmafaiqi4@gmail.com](mailto:najmafaiqi4@gmail.com)<sup>3</sup>

Received: 05-04-2025

Revised: 20-04-2025

Approved: 28-04-2025

### ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji dampak penerapan otomatisasi pada mesin marking Telesis TMP-1700 dalam upaya menurunkan downtime dan meningkatkan efisiensi produksi di PT XYZ. Masalah utama yang dihadapi adalah tingginya frekuensi kerusakan pada komponen Toggle Clamp tipe MC07-3 yang menyebabkan waktu henti produksi yang signifikan. Penelitian ini menggunakan metode DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) sebagai kerangka kerja peningkatan kualitas berkelanjutan. Data dikumpulkan secara longitudinal dari tahun 2021 hingga 2024, mencakup durasi downtime, jumlah kerusakan, dan cycle time proses. Hasil menunjukkan bahwa implementasi sistem otomatisasi berupa air cylinder dan PLC berhasil menurunkan downtime dari 500 menit menjadi 31 menit (penurunan lebih dari 90%), serta meningkatkan efisiensi waktu proses sebesar 30,77%. Temuan ini merekomendasikan bahwa integrasi sistem otomatisasi pada lini produksi manufaktur merupakan strategi efektif untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi mesin secara berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Otomatisasi Industri, Downtime, Mesin Marking, PLC, DMAIC, Air Cylinder, Efisiensi Produksi

### PENDAHULUAN

PT XYZ merupakan salah satu perusahaan manufaktur yang berlokasi di Kawasan Industri Jababeka dan bergerak di bidang komponen otomotif. Dalam menjalankan proses produksinya, perusahaan ini mengandalkan mesin-mesin presisi tinggi, termasuk salah satunya adalah mesin marking Telesis TMP-1700. Mesin ini memiliki peran krusial dalam proses identifikasi produk melalui pencetakan kode unik pada permukaan komponen. Salah satu komponen utama pada mesin ini adalah Toggle Clamp tipe MC07-3 yang berfungsi sebagai penahan produk selama proses penandaan berlangsung.

Namun, berdasarkan data historis, mesin marking ini sering mengalami downtime atau waktu henti produksi yang cukup tinggi, yang berdampak langsung terhadap terganggunya alur produksi, menurunnya output harian, serta meningkatnya biaya operasional perusahaan. Kerusakan berulang pada komponen toggle clamp menjadi penyebab dominan, terutama karena keausan akibat pemakaian berulang, kesalahan penyetulan oleh operator, serta tidak adanya sistem deteksi dini terhadap keausan komponen.

Dalam era industri 4.0, perusahaan manufaktur dituntut untuk mengintegrasikan sistem otomasi guna meningkatkan efisiensi dan kestabilan produksi. Otomatisasi terbukti mampu mengurangi ketergantungan terhadap aktivitas manual, meminimalkan potensi kesalahan manusia (human error), serta meningkatkan efisiensi mesin melalui sistem kontrol yang lebih stabil ((Irwanto et al., 2020); (Putra & Taufik, 2023)). Studi oleh Alfaro & Sepúlveda, (2021) menunjukkan bahwa penerapan sistem kendali berbasis PLC dapat menurunkan kerusakan mesin hingga 80% dibandingkan sistem manual.

Untuk memastikan efektivitas penerapan sistem otomatisasi pada mesin, pendekatan Six Sigma dengan metode DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) banyak digunakan sebagai kerangka kerja perbaikan berkelanjutan dalam sektor manufaktur ((Lestari & Purwatmini, 2021); (Farhan et al., 2022)). Metode ini

tidak hanya membantu mengidentifikasi penyebab utama kegagalan sistem, tetapi juga menyediakan strategi perbaikan yang sistematis dan terukur.

Penelitian terdahulu oleh (Sahoo & Yadav, 2018) menunjukkan bahwa penggunaan DMAIC mampu menurunkan waktu siklus produksi hingga 30% pada proses produksi pabrik otomotif. Selain itu, penelitian oleh (Yulianto et al., 2023) yang menerapkan DMAIC dalam evaluasi downtime menunjukkan penurunan waktu henti mesin sebesar 92% hanya dalam dua tahun implementasi.

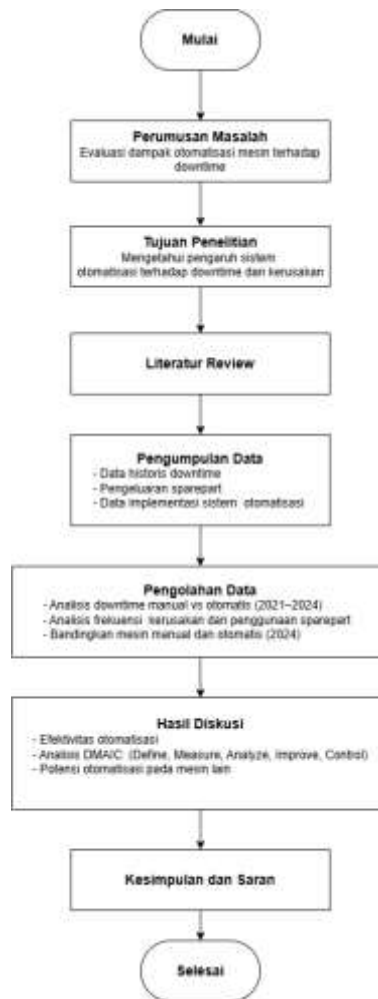
Dengan mengacu pada kerangka tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak penerapan sistem otomatisasi terhadap penurunan downtime pada mesin marking Telesis TMP-1700 di PT XYZ, dengan fokus pada pengaruh kerusakan komponen toggle clamp. Selain itu, kerugian akibat downtime akan dikaji melalui perspektif Six Big Losses guna memberikan pemahaman yang lebih terstruktur mengenai sumber inefisiensi dalam proses produksi.

## **METODE KEGIATAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif melalui metode DMAIC (Define–Measure–Analyze–Improve–Control) yang merupakan bagian dari kerangka kerja Six Sigma dalam upaya peningkatan performa dan efisiensi operasional mesin. Data yang dikumpulkan meliputi:

- a. Objek penelitian adalah mesin marking Telesis TMP-1700 yang digunakan di lini produksi PT XYZ. Total mesin yang diteliti sebanyak 10-unit, yang diotomatisasi secara bertahap mulai tahun 2022 akhir hingga tahun 2024. Data diperoleh dari departemen selama periode tahun 2021–2024.
- b. Total waktu downtime (dalam menit), jumlah gangguan mesin, jumlah penggantian komponen (toggle clamp), siklus waktu proses (cycle time), distribusi mesin menurut sistem manual/otomatis.
- c. Sumber data berasal dari Logbook downtime, laporan pengeluaran sparepart, observasi langsung di lapangan, wawancara teknisi dan operator.
- d. Langkah-Langkah Metode DMAIC
  - Define: Mengidentifikasi masalah downtime tinggi dan pengaruhnya terhadap gangguan produksi.
  - Measure: Melakukan pengukuran dilakukan terhadap durasi downtime, jumlah gangguan, dan cycle time dari 2021–2024 untuk mengetahui tren dan titik kritis.
  - Analyze: Menganalisa akar penyebab dilakukan dengan pendekatan diagram Fishbone (5M) dan data time-series untuk mengidentifikasi faktor utama penyebab downtime.
  - Improve: Mengukur penerapan perbaikan dilakukan melalui otomatisasi sistem penjepitan, penggunaan air cylinder, serta integrasi PLC dan SOP baru.
  - Control: Melakukan studi evaluasi dari perbaikan yang telah dilakukan.

Berikut ini merupakan gambar tahapan penelitian:



**Gambar 1.** Flowchart Metode Penelitian

Pengumpulan data dilakukan terhadap empat periode tahunan, yakni 2021 hingga 2024. Parameter utama yang dianalisis meliputi jumlah produksi, total downtime (menit), jumlah sparepart yang diganti, serta estimasi persentase downtime terhadap total waktu kerja efektif. Data downtime dikarenakan kerusakan pada part Toogle clamp dihitung berdasarkan jumlah menit kerusakan mesin yang tercatat dalam satu tahun, sementara waktu kerja efektif dihitung berdasarkan jumlah hari kerja aktual dalam satu tahun dikalikan durasi kerja 24 jam per hari. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel X berikut:

**Tabel 1.** Downtime Mesin Marking 2021 - 2024

Periode	Produksi (pcs)	Downtime (menit)	Sparepart Diganti	Downtime (%)	Hari Kerja	Total Waktu Kerja (menit)
Jan-Des 2021	136.800.000	500,00	25	0,1015%	342	492.480
Jan-Des 2022	139.600.000	420,00	21	0,0836%	349	502.560
Jan-Des 2023	142.800.000	32,00	3	0,0062%	357	514.080
Jan-Des 2024	142.000.000	31,00	5	0,0061%	355	511.200
Rata-rata	-	245,75	13,5	0,0483%	-	-

Dalam rangka menganalisis efektivitas sistem otomatisasi pada mesin marking TELESIS TMP-1700, dilakukan perbandingan antara metode operasional sebelum dan sesudah otomatisasi. Evaluasi ini difokuskan pada aspek waktu siklus proses (cycle time), jumlah aktivitas manual, dan keterlibatan operator dalam setiap tahapan kerja. Berikut ini adalah tabel perbandingan langkah antara sebelum dan setelah otomatisasi:

**Tabel 2.** Perbandingan Langkah Kerja

Parameter	Sistem Manual	Sistem Otomatis
Jumlah Tahapan Proses	9 langkah	5 langkah
Intervensi Operator	Tinggi	Rendah
Waktu Siklus (detik)	13 detik	9 detik

Dalam penelitian ini, objek pengamatan mencakup 10-unit mesin marking tipe TELESIS TMP-1700 yang berada di lini produksi PT XYZ. Mesin-mesin tersebut tersebar di berbagai line dan terdiri dari dua jenis sistem operasi: manual dan otomatis. Berdasarkan klasifikasi, pada tahun 2024 sebanyak 4 mesin masih beroperasi secara manual, sedangkan 6 mesin lainnya telah dilengkapi sistem otomatisasi. Tabel berikut menunjukkan distribusi mesin berdasarkan tipe line, lokasi line, serta status operasionalnya:

**Tabel 3.** Implementasi Otomatisasi

No	Tipe Line	Line	No Mesin	Tipe Marking	2021	2022	2023	2024
1	Standar	L1	NSS-CW-DN-03	TELESIS TMP-1700	Manual	Manual	Manual	Manual
2	Standar	L3	NSS-CW-DN-08	TELESIS TMP-1701	Manual	Manual	Manual	Manual
3	Standar	L5	NSS-CW-DN-08	TELESIS TMP-1702	Manual	Manual	Auto	Auto
4	Standar	L7	NSS-CW-DN-04	TELESIS TMP-1703	Manual	Auto	Auto	Auto
5	Standar	L9	NSS-CW-DN-10	TELESIS TMP-1704	Manual	Auto	Auto	Auto
6	Standar	L11	NSS-CW-DN-01	TELESIS TMP-1705	Manual	Auto	Auto	Auto
7	QA	L2	NSS-CW-DN-09	TELESIS TMP-1706	Manual	Manual	Auto	Auto
8	QA	L4	NSS-CW-DN-02	TELESIS TMP-1707	Manual	Manual	Manual	Auto
9	QA	L6	NSS-CW-DN-04	TELESIS TMP-1708	Manual	Manual	Manual	Manual
10	QA	L8	NSS-CW-DN-07	TELESIS TMP-1709	Manual	Manual	Manual	Manual

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Tahap Define – Identifikasi Masalah

Masalah utama yang diidentifikasi adalah tingginya waktu downtime pada mesin marking Telesis TMP 1700, yang secara signifikan dipengaruhi oleh kerusakan berulang pada komponen Toogle Clamp tipe MC07-3. Toogle Clamp ini berfungsi sebagai pengunci produk saat proses marking berlangsung. Kegagalan pada komponen ini menyebabkan proses terhenti dan membutuhkan waktu perbaikan serta penggantian yang cukup sering. Berikut ini adalah gambar bagian Toogle Clamp yang sering mengalami kerusakan:



**Gambar 2.** Kerusakan Toogle Clamp MC07-3

### Tahap Measure – Pengukuran Kinerja Saat Ini

Pengumpulan data dilakukan terhadap waktu downtime, jumlah gangguan, dan penggantian Toogle Clamp dari tahun 2021 hingga 2024. Data pada tabel berikut ini menunjukkan penurunan signifikan setelah sistem otomatisasi diterapkan pada akhir 2022:

**Tabel 4.** Data Pemakaian Toogle Clamp

Tahun	Downtime (menit)	Jumlah Gangguan	Penggantian
2021	500	25	25
2022	420	21	21
2023	32	3	3
2024	31	5	5

Berdasarkan data yang diperoleh, diketahui bahwa pada tahun 2021 dan awal tahun 2022, sistem mesin masih beroperasi secara manual. Pada periode ini, downtime tercatat cukup tinggi, yaitu sebesar 500 menit pada tahun 2021 dan 420 menit pada tahun 2022, dengan jumlah gangguan masing-masing sebanyak 25 dan 21 kali. Selain itu, penggantian toggle clamp juga terjadi cukup sering, yakni sebanyak 25 kali pada 2021 dan 21 kali pada 2022, yang mengindikasikan tingginya frekuensi kerusakan mekanis akibat proses manual. Implementasi sistem otomatisasi yang mulai diterapkan pada akhir tahun 2022 dan pada tahun 2023, downtime menurun drastis menjadi 32 menit dengan hanya 3 kasus gangguan, dan frekuensi penggantian toggle clamp tercatat sebanyak 3 kali. Tren positif ini berlanjut pada tahun 2024, dengan downtime sebesar 31 menit, gangguan sebanyak 5 kali, dan penggantian komponen sebanyak 5 unit. Setelah implementasi otomatisasi dapat mempersingkat langkah kerja 4 langkah dan menghemat waktu 4 detik pada satu kali proses marking.

**Analyze – Analisis Akar Masalah**

Identifikasi akar penyebab dilakukan menggunakan pendekatan Fishbone diagram berbasis 5M (Man, Machine, Method, Material, Environment), yang dirangkum dalam tabel berikut:

**Tabel 5.** Analisa Akar Masalah

Faktor	Man	Machine	Method	Material	Environment
Penyebab	Kesalahan setting oleh operator, kurang pelatihan teknis, kelalaian pemantauan clamp.	Keausan Toogle Clamp MC07-3, keterlambatan penggantian, tidak ada sensor deteksi dini.	Tidak ada SOP inspeksi clamp, sistem kontrol reaktif, tidak terintegrasi dengan maintenance prediktif.	Clamp tidak tahan siklus kerja material produk menimbulkan gaya tekan berlebih.	Lingkungan lembab dan berdebu mempercepat keausan.

**Improve – Solusi Perbaikan**

Berdasarkan temuan pada tahap Analyze, diketahui bahwa sebagian besar downtime dan gangguan pada mesin marking TELESIS TMP-1700 disebabkan oleh aktivitas manual, khususnya pada proses penjepitan dan pelepasan material menggunakan toggle clamp. Selain itu, ketidaksesuaian posisi material pada jig juga turut menyumbang tingginya angka downtime. Sebagai langkah perbaikan, dilakukan penerapan sistem otomatisasi pada mesin marking, yang mencakup:

1. Penggantian sistem penjepitan manual dengan aktuatur pneumatik otomatis,
2. Integrasi sistem kontrol tombol start ke dalam programmable logic controller (PLC),
3. Pelatihan dan penyesuaian SOP bagi operator untuk beradaptasi dengan sistem baru.

Perubahan sistem ini mulai diimplementasikan secara bertahap pada akhir tahun 2022 dan telah berjalan bertahap sejak awal tahun 2023. Hasil dari implementasi sistem otomatisasi menunjukkan dampak yang sangat signifikan terhadap peningkatan efisiensi mesin. Downtime tahunan menurun drastis dari 500 menit (2021) menjadi hanya 31 menit (2024). Selain itu, frekuensi penggantian toggle clamp juga mengalami penurunan tajam, dari 20 unit per tahun menjadi hanya 3-5 unit per tahun setelah otomatisasi. Selain itu otomatisasi juga berhasil mengurangi waktu siklus proses dari 13 detik menjadi 9 detik, yang berarti peningkatan efisiensi waktu proses sebesar sekitar 30,77%. Efisiensi ini berdampak langsung terhadap peningkatan produktivitas dan kapasitas output tanpa penambahan jam kerja atau tenaga operator. Berikut ini adalah gambar dari implementasi otomatisasi mesin marking dari manual ke sistem otomatis:



**Gambar 3.** Mesin Marking Sebelum Otomatisasi



**Gambar 4.** Mesin Marking Setelah Otomatisasi

### **Control**

Tahap Control dalam perbaikan yang telah diterapkan pada sistem otomatisasi mesin marking TELESIS TMP-1700 adalah dilakukan melalui integrasi prosedur standar, pemantauan berkelanjutan, dan pengukuran performa berbasis indikator yang terstruktur. Strategi pengendalian dilakukan melalui empat pendekatan utama, yaitu:

1. Penyusunan ulang alur kerja sistem otomatis ini mencakup tahapan

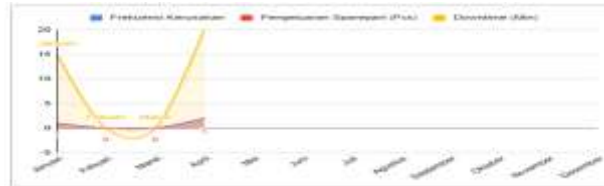


pengecekan awal, pengoperasian mesin, tindakan saat alarm aktif, serta prosedur shutdown. Berikut ini adalah gambar pembaharuan SOP pada mesin marking otomatis:

**Gambar 5.** Pembaharuan SOP

2. Melakukan pencatatan downtime dan mengklasifikasikan jenis gangguan, durasi kerusakan, dan waktu perbaikan. Data ini dikompilasi dan dianalisis setiap akhir bulan. Berikut ini adalah evaluasi terhadap downtime mesin marking bulan Januari – April 2025:

**Gambar 6.** Evaluasi Downtime per April 2025



3. Membuat jadwal perawatan berkala ditetapkan setiap dua minggu dan bulanan untuk memeriksa sistem pneumatik, PLC, dan aktuator, guna mencegah kerusakan mendadak.
4. Untuk meningkatkan kompetensi bagi operator, re-training dilaksanakan setiap 6 bulan sekali untuk memastikan pemahaman terhadap sistem otomatis tetap terjaga.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Implementasi sistem otomatisasi terhadap performa mesin marking pada PT XYZ memberikan dampak positif terhadap produktivitas. Peneliti menganalisis pengaruh penerapan sistem otomatisasi terhadap performa operasional mesin marking Telesis TMP-1700 di PT XYZ, khususnya dalam menurunkan waktu downtime dan meningkatkan efisiensi proses produksi, dari analisis data longitudinal tahun 2021–2024 dan pendekatan metodologis DMAIC, diperoleh beberapa temuan utama sebagai berikut:

1. Penerapan sistem otomatisasi berhasil menurunkan waktu downtime secara signifikan dari 500 menit pada tahun 2021 menjadi 31 menit pada tahun 2024, atau setara dengan efisiensi penurunan lebih dari 90%.
2. Frekuensi gangguan dan penggantian komponen toggle clamp juga mengalami penurunan drastis, dari 25 kejadian pada tahun 2021 menjadi 5 kejadian pada tahun 2024, menunjukkan peningkatan reliabilitas mesin pasca otomatisasi.
3. Efisiensi waktu produksi meningkat secara substansial, ditunjukkan dengan penurunan waktu cycle time proses marking dari 13 detik menjadi 9 detik, setara peningkatan efisiensi waktu sebesar 30,77% tanpa menambah beban kerja atau tenaga kerja baru.
4. Penguatan sistem kendali melalui pembaharuan SOP, penggunaan logbook downtime, serta penerapan preventive maintenance dan retraining operator terbukti mampu menjaga kestabilan performa mesin secara berkelanjutan.

Dengan demikian, penerapan sistem otomatisasi yang terintegrasi dan berbasis data terbukti efektif sebagai strategi peningkatan efisiensi dan keandalan mesin dalam konteks industri manufaktur otomotif.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan dalam pengembangan sistem otomatisasi mesin marking adalah sebagai berikut:

1. Ekspansi otomatisasi ke mesin lain yang saat ini masih beroperasi secara manual untuk menyelaraskan efisiensi antar lini produksi dan mengurangi variasi performa antar unit.
2. Penguatan kompetensi teknis operator melalui pelatihan berbasis teknologi terkini (automation troubleshooting & PLC diagnostics) guna menjaga kemandirian tim produksi.
3. Perlu dilakukan studi ekonomi lebih lanjut yang menghitung return on investment (ROI) dari implementasi otomatisasi terhadap biaya sparepart, produktivitas tenaga kerja, dan total cost of quality (COPQ).

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Alfaro, J., & Sepúlveda, C. (2021). PLC-based automation strategies in automotive component marking systems. *Journal of Manufacturing Systems*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.06.007>
- Farhan, M., Lubis, A. H., & Widodo, B. (2022). DMAIC Method Application in Reducing Defective Rate in Metal Processing Line. *Jurnal Teknik Industri Indonesia*.
- Irwanto, E., Puspitasari, A., & Mulyana, E. (2020). Otomatisasi Sistem Produksi Berbasis PLC dan HMI pada Industri Manufaktur. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Komputer*.
- Lestari, E., & Purwatmini, R. (2021). Penerapan Metode DMAIC dalam Mengurangi Defect Produk pada Proses Produksi. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*.  
<https://doi.org/10.30813/jiti.v19i1.2536>
- Putra, A. R., & Taufik, M. (2023). Implementation of Smart Pneumatic Systems in Industrial Automation to Reduce Downtime. *International Journal of Industrial Engineering*.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijie.2023.01.004>
- Sahoo, S., & Yadav, A. K. (2018). Lean Six Sigma approach for sustainable manufacturing in small and medium enterprises. *International Journal of Lean Six Sigma*.  
<https://doi.org/10.1108/IJLSS-02-2017-0014>
- Yulianto, H., Priyandoko, G., & Sari, D. (2023). Optimization of Equipment Efficiency Using DMAIC Approach. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*.
- Claudia, M., Putri, R. A., & Saputra, D. (2017). Analisa Kerusakan Komponen Mekanis pada Mesin Produksi: Studi Kasus Toggle Clamp. *Jurnal Teknik Mesin dan Industri*, 5(2), 101–107.
- Gijo, E. V., & Antony, J. (2014). Reducing patient waiting time in outpatient department using Lean Six Sigma methodology. *Quality and Reliability Engineering International*, 30(8), 1481–1491. <https://doi.org/10.1002/qre.1552>
- Hidayat, D., Suryadi, T., & Nugraha, R. (2020). Analisis Six Big Losses untuk Mengidentifikasi Sumber Downtime pada Proses Produksi. *Jurnal Teknik Industri*, 21(1), 45–53.
- Irwanto, E., Puspitasari, A., & Mulyana, E. (2020). Otomatisasi Sistem Produksi Berbasis PLC dan HMI pada Industri Manufaktur. *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, 8(3), 210–218.
- Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to Statistical Quality Control* (8th ed.). Wiley.
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press.
- Purnomo, S., Setiawan, H., & Sari, F. (2022). Efektivitas Air Cylinder dalam Sistem Pengunci Otomatis pada Mesin Produksi. *Jurnal Riset Teknologi dan Inovasi Manufaktur*, 7(1), 33–40.
- Shah, R., & Ward, P. T. (2007). Defining and developing measures of Lean production. *Journal of Operations Management*, 25(4), 785–805. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.019>
- Wibisono, D. (2021). Analisis Produktivitas Produksi melalui Pengukuran Downtime pada Mesin Otomatis. *Jurnal Sistem Produksi*, 19(2), 120–127.
- Wahab, S., Mukhtar, M., Sulaiman, R., & Idris, S. (2013). A Conceptual Model of Lean Manufacturing Dimensions. *Procedia Technology*, 11, 1292–1298.  
<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.327>
- George, M. L. (2002). *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Production Speed*. McGraw-Hill.
- Gunawan, R., & Santosa, P. (2020). Implementation of preventive maintenance in the

- manufacturing industry. *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, 11(2), 85–91.
- Kurniawan, B., & Hartono, Y. (2022). Performance evaluation of pneumatic systems in automated clamping. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 14(4), 101–108.
- Tan, C. M., & Lee, C. H. (2023). Adaptive control strategies in PLC-based manufacturing systems. *International Journal of Automation Technology*, 17(2), 88–96.
- Susanti, R., & Ramadhan, M. (2022). Optimization of downtime using Lean Six Sigma in automotive industry. *Indonesian Journal of Industrial Engineering*, 13(1), 25–34.
- Huang, Y., & Zhang, H. (2021). Predictive maintenance using PLC-based monitoring for smart factories. *Procedia CIRP*, 97, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.018>
- Nasution, A., & Rizal, M. A. (2023). Integration of IoT and PLC in predictive control system for downtime reduction. *International Journal of Industrial Technology*, 9(2), 44–51.
- Wijaya, D., & Sembiring, F. (2020). Comparative study of pneumatic and hydraulic actuators in automated manufacturing systems. *Journal of Automation and Control Engineering*, 8(3), 55–60.