



Fabrikasi Engsel Pintu Pagar Baja Panjang 250mm, Lebar 80mm, Tinggi 100mm, Kapasitas 0,7 Set/Jam

Muhammad Afin Khairullah¹, Syamsul Hadi^{2*}, Laldy Agum Sartyo³, Dafa Ahmad Amrizal⁴, Rizky Khairi Sakha⁵

^{1,3-5}Program Studi Diploma III, Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

²Program Studi Doktor Terapan, Optimasi Desain Mekanik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

Email: afinkhairullah@gamil.com¹, syamsul.hadi@polinema.ac.id², laldyagumsat16@gamil.com³, dafaamrizal276@gamil.com⁴, rizkykhairis22@gmail.com⁵

*Penulis Korespondensi: syamsul.hadi@polinema.ac.id

Abstract. Broken or deformed hinges due to the inability to withstand the load of the folding gate door are the problems faced. The purpose of fabrication is to obtain folding gate door hinges from AISI 1020 steel with dimensions of 250x80x3 mm, and a height of 100 mm. The fabrication method includes: design of folding gate door hinges with dimensions of 250x80x3 mm, and a height of 100 mm; cutting 2 sheets of AISI 1020 steel measuring 250x80x3 mm; forging to form a circle with a diameter of 11 mm on the 80 mm wide side; drilling 4 holes with a diameter of 9 mm at the position according to the design; making a hinge shaft from an M10 bolt whose head and thread are connected with a connecting rod to a length of 175 mm; assembling 2 pieces of hinges with a hinge shaft; and quality-dimension-packaging inspection. The fabrication results are a pair of folding gate door hinges made of AISI 1020 steel with dimensions of 250x80x3 mm, and a height of 100 mm with an M10 bolt shaft of 175 mm in length with a production cost of IDR 48,000/unit, and a process duration of 88 minutes/unit which implies that the hinges are ready to be welded to the gate with a maximum load of 50 kg and painted before use.

Keywords: AISI 1020 Steel; Folding Doors; Gate Hinges; Hinge Fabrication; M10 Bolts for Welded Joints.

Abstrak. Patah atau deformasinya engsel karena tidak mempunyainya menahan beban pintu pagar lipat sebagai permasalahan yang dihadapi. Tujuan fabrikasi untuk memperoleh engsel pintu pagar lipat dari baja AISI 1020 dimensi 250x80x3 mm, dan tinggi 100 mm. Metode fabrikasi meliputi: desain engsel pintu pagar lipat dimensi 250x80x3 mm, dan tinggi 100 mm; pemotongan 2 lembar baja AISI 1020 berukuran 250x80x3 mm; penempaan membentuk lingkaran berdiameter 11 mm pada sisi lebar 80 mm; pengeboran 4 buah lubang berdiameter 9 mm pada posisi sesuai desain; pembuatan poros engsel dari baut M10 yang disambung kepala dan ulirnya dengan batang penyambung menjadi panjang 175 mm; perakitan 2 buah keping engsel dengan poros engsel; dan pemeriksaan mutu-dimensi-pengemasan. Hasil fabrikasi berupa sepasang engsel pintu pagar lipat dari baja AISI 1020 dimensi 250x80x3 mm, dan tinggi 100 mm dengan poros baut M10 sepanjang 175 mm dengan biaya produksi Rp 48.000,-/unit, dan durasi proses 88 menit/unit yang berimplikasi bahwa engsel siap dilas pada pintu pagar dengan beban maksimum 50 kg dan dicat sebelum penggunaan.

Kata Kunci: Baja AISI 1020; Baut M10 Sambungan Lasan; Engsel Pintu Pagar; Fabrikasi Engsel; Pintu Lipat.

1. LATAR BELAKANG

Industri *manufacturing engineering* manufaktur logam memiliki peran penting dalam mendukung sektor konstruksi melalui penyediaan komponen mekanis yang membutuhkan kekuatan tinggi, ketahanan terhadap beban berulang, dan umur pakai yang panjang. Satu di antara komponen yang banyak digunakan adalah engsel pintu pagar lipat, yaitu elemen mekanis yang berfungsi sebagai sambungan rotasi antar daun pagar, sehingga memungkinkan gerakan membuka dan menutup dengan stabil. Dalam penggunaannya, engsel menerima beban statis dari berat daun pagar dan beban dinamis akibat siklus operasi yang berlangsung berulang. Oleh

karenanya, fabrikasi engsel harus didesain secara sistematis agar ketelitian dimensi produknya baik, kekuatan sambungan memadai, dan konsisten mutunya.

Bahan baja lembaran masih menjadi pilihan utama dalam industri fabrikasi karena baik sifat mekaniknya, pembentukannya mudah, dan kompatibel dengan berbagai proses manufaktur untuk pemotongan, pengeboran, dan pengelasan. Groche et al., (2022) menjelaskan bahwa perkembangan teknologi pembentukan dan *blanking* logam memungkinkan peningkatan mutu produk melalui pemanfaatan model berbasis data untuk mendukung manufaktur yang lebih presisi dan efisien yang menunjukkan bahwa desain fabrikasi harus mempertimbangkan hubungan antara karakteristik bahan, parameter proses, dan mutu produk akhir.

Objek fabrikasi adalah engsel pintu pagar lipat berbahan baja dengan dimensi panjang 250 mm, lebar 80 mm, tinggi engsel 100 mm, dan ketebalan 3 mm yang diproduksi melalui tahapan pemotongan bahan baku, penempaan, penandaan, pengeboran, perakitan, pengelasan, penggerindaan, dan inspeksi mutu. Setiap tahapan berkontribusi terhadap waktu produksi, biaya, dan mutu produk. Zhao et al., (2022) menegaskan bahwa kapabilitas suatu urutan proses manufaktur sangat menentukan kemampuan sistem dalam menghasilkan produk sesuai spesifikasi yang mana penyusunan urutan proses yang tepat menjadi faktor penting dalam mencapai mutu dan efisiensi produksi.

Klocke et al., (2016) menyatakan bahwa estimasi waktu proses yang akurat sangat penting dalam menentukan kapasitas produksi dan mendukung perencanaan manufaktur selama tahap desain dan Pfeiffer et al., (2016) menunjukkan bahwa estimasi *lead time* yang tepat dapat meningkatkan keandalan sistem produksi dan membantu pengambilan putusan dalam penjadwalan.

Efisiensi manufaktur dipengaruhi oleh kecepatan produksi dan kemampuan sistem untuk mengurangi aktivitas yang tidak bernilai tambah. Allwood et al., (2016) yang menjelaskan bahwa peningkatan kecepatan manufaktur dapat dicapai melalui penyederhanaan proses dan optimasi metode kerja. Islam et al., (2022) menambahkan bahwa desain sistem produksi yang baik berpengaruh langsung terhadap kinerja operasional yang mana Martínez-olvera (2022) menjelaskan bahwa efisiensi manufaktur merupakan faktor kunci dalam meningkatkan daya saing dan keberlanjutan industri. Leiber et al., (2022) yang menunjukkan bahwa desain sistem produksi yang efisien dapat meningkatkan produktivitas sekaligus menurunkan biaya investasi dan operasional.

Optimasi proses manufaktur dan desain sistem produksi, integrasi dimensi geometris produk, urutan proses fabrikasi, estimasi waktu siklus, kebutuhan mesin, dan target

produktivitas pada komponen engsel pintu pagar lipat masih terbatas. Padahal, pada komponen tersebut, ketepatan dimensi, kekuatan sambungan las, dan waktu produksi merupakan parameter yang saling berkaitan dan sangat menentukan keberhasilan proses manufaktur.

Kebaruan fabrikasi terletak pada penyusunan konsep fabrikasi engsel pintu pagar lipat berbahan baja dengan dimensi panjang 250 mm, lebar 80 mm, tinggi engsel 100 mm, dan ketebalan 3 mm yang didesain untuk mencapai kapasitas produksi sebesar 0,682 unit/jam yang mengintegrasikan aspek desain produk, urutan proses, estimasi waktu siklus, kebutuhan mesin dan peralatan, dan standar mutu produk ke dalam satu kerangka konseptual yang terpadu.

Tujuan fabrikasi untuk memperoleh engsel pintu pagar lipat berbahan baja yang efektif dan efisien dengan penentuan tahapan produksi yang sesuai, perkiraan waktu siklus untuk memenuhi target kapasitas 0,682 unit/jam, dan menghasilkan dasar desain sistem produksi pada industri fabrikasi logam.

2. KAJIAN TEORITIS

Fabrikasi logam merupakan rangkaian proses manufaktur yang bertujuan mengubah bahan baku menjadi produk jadi melalui tahapan pemotongan, pembentukan, perakitan, dan penyambungan. Dalam fabrikasi harus didesain secara sistematis agar mampu menghasilkan produk sesuai spesifikasi teknis dengan penggunaan waktu dan biaya yang efisien. Bucko et al., (2020) menjelaskan bahwa penerapan *lean manufacturing* pada lini fabrikasi dapat menyederhanakan aliran proses, menghilangkan aktivitas yang tidak memberikan nilai tambah, dan meningkatkan efisiensi produksi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penyusunan urutan kerja yang efektif merupakan faktor penting dalam meningkatkan kapasitas produksi komponen logam.

Bahan fabrikasi berupa baja karbon rendah dengan ketebalan 3 mm yang banyak dimanfaatkan dalam industri konstruksi, karena kebaikan sifat mekaniknya, pembentukannya mudah, dan mampu lasnya tinggi. Kadar karbon yang rendah memberikan kombinasi kekuatan dan keuletan yang memadai, sehingga risiko retak selama proses pengelasan relatif kecil. Ammar et al., (2021) menyatakan bahwa mutu bahan berpengaruh langsung terhadap kestabilan manufaktur dan kinerja produk akhir. Oleh karenanya, pemilihan baja karbon rendah sebagai bahan utama pembuatan engsel merupakan putusan yang tepat karena bahan tersebut mampu memenuhi kebutuhan kekuatan, ketahanan, dan kemudahan proses fabrikasi. Produktivitas merupakan indikator utama dalam sistem manufaktur modern. Dengan target kapasitas produksi sebesar 0,682 unit/jam, waktu siklus maksimum yang tersedia untuk setiap unit dapat dihitung dengan rumus (1).

$$t_c = 3600 / \text{Kapasitas Produksi} \dots\dots\dots(i)$$

$$t_c = 3600 / 50 = 72 \text{ detik/unit} \dots\dots\dots(ii)$$

Menurut Deshpande (2019), penerapan *total quality management* dan *concurrent engineering* dapat meningkatkan kinerja manufaktur melalui koordinasi yang lebih baik antara desain produk dan proses produksi. Gardner (2020) menyatakan bahwa keseimbangan antara kecepatan proses dan mutu produk sangat menentukan efektivitas sistem manufaktur secara keseluruhan. Waktu siklus yang terlalu panjang menurunkan kapasitas produksi, sedangkan waktu siklus yang terlalu singkat tanpa pengendalian mutu yang memadai dapat meningkatkan jumlah produk cacat.

Pengendalian mutu bertujuan memastikan bahwa setiap engsel yang diproduksi memenuhi spesifikasi dimensi, kekuatan sambungan, dan fungsi mekanis yang telah ditetapkan. Dalam konteks *quality engineering*, parameter mutu utama meliputi ketepatan dimensi, keselarasan poros engsel, kelancaran gerakan rotasi, dan kekuatan sambungan las. Faria et al., (2019) menjelaskan bahwa integrasi data proses dengan biaya mutu memungkinkan perusahaan menentukan metode inspeksi yang terefektif. Escobar et al., (2021) menegaskan bahwa konsep *Quality 4.0* memanfaatkan data dan analitik untuk meningkatkan akurasi pengambilan putusan dalam sistem manufaktur.

Keberhasilan fabrikasi engsel pintu pagar lipat dipengaruhi oleh pemilihan bahan yang tepat, penyusunan urutan proses yang efisien, pengaturan parameter pengelasan yang optimal, dan penerapan pengendalian mutu secara konsisten. Meskipun berbagai penelitian telah membahas peningkatan efisiensi dan mutu pada proses fabrikasi logam, masih terbatas pada integrasi karakteristik produk, target kapasitas produksi 0,682 unit/jam, dan persyaratan mutu pada komponen engsel pintu pagar lipat. Oleh karenanya, fabrikasi yang efektif dan efisien sesuai dengan spesifikasi produk harus ditetapkan.

Pada fabrikasi silinder engsel pintu pagar baja, proses penempaan digunakan untuk membentuk bagian silinder sebagai rumah poros engsel yang mana penempaan dilakukan dengan memberikan pembengkokan berulang pada bahan, sehingga diperoleh bentuk silinder yang sesuai dengan dimensi desain yang memiliki kekuatan mekanik yang lebih baik (Antonius et al., 2022). Benda hasil penempaan lebih kuat dan untuk bentuk benda kerja yang rumit dapat diproduksi lebih mudah dan murah, serta sebagian hasil tempa terdapat serpihan yang terbuang atau terlepas.

Setelah penempaan rumah silinder engsel, perlakuan panas berupa austenisasi dan *quenching* dapat dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik komponen. Proses pendinginan cepat mampu mengubah struktur mikro bahan menjadi martensit, sehingga meningkatkan

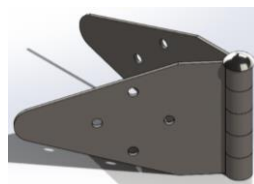
kekerasan, kekuatan tarik, dan ketahanan aus. Oleh karenanya, metode *quenching* berpotensi diterapkan pada fabrikasi engsel pintu pagar baja agar diperoleh komponen yang lebih kuat dan tahan terhadap beban berulang selama pengoperasian yang mana Sari, (2017) menyatakan bahwa pemanasan spesiman pada 900°C durasi 30 menit dan pendinginan cepat ke dalam air dapat membentuk struktur martensit baja, sehingga menghasilkan baja yang keras.

3. METODE PENELITIAN

Fabrikasi engsel pintu pagar lipat berbahan baja karbon rendah secara sistematis dan terstruktur dipilih karena mampu memberikan penjelasan menyeluruh mengenai kondisi aktual maupun konseptual dari proses produksi tanpa melakukan manipulasi variabel. Analisis tahapan proses produksi mulai dari pemotongan bahan, penempaan, pemotongan, pengeboran, perakitan hingga *finishing* dan inspeksi mutu juga identifikasi kebutuhan bahan, spesifikasi mesin dan peralatan yang digunakan, dan alur kerja dipilih yang paling efektif dalam proses fabrikasi.

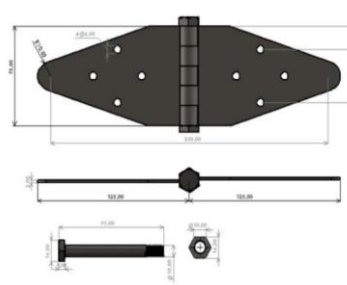
Industrial engineering juga digunakan sebagai dasar analisis dalam mengevaluasi waktu kerja dan kapasitas produksi, sehingga diperoleh gambaran mengenai efisiensi proses dan potensi *bottleneck* dalam sistem manufaktur yang memungkinkan evaluasi keterkaitan antara desain produk, proses produksi, dan target luaran yang ditetapkan.

Selain aspek teknis, metode deskriptif juga digunakan untuk memberikan estimasi awal terhadap biaya produksi berdasarkan kebutuhan bahan, waktu kerja, dan penggunaan mesin dan peralatan yang hasilnya dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kelayakan proses fabrikasi engsel pintu pagar lipat dalam skala industri kecil dan menengah. Objek pembuatan engsel pintu pagar lipat dengan spesifikasi: (1) Bahan: baja karbon rendah, (2) Panjang: 250 mm, (3) Lebar: 80 mm, (4) Tinggi: 100 mm, dan (5) Tebal: 3 mm dengan desain sebagaimana Gambar 1.



Gambar 1. Engsel Pintu Pagar Lipat dari Baja Karbon Rendah, Panjang: 250 mm, Lebar: 80 mm, Tinggi: 100 mm, danTebal: 3 mm.

Dimensi Engsel Pintu Pagar Lipat dari Baja Karbon Rendah, Panjang: 250 mm, Lebar: 80 mm, Tinggi: 100 mm, danTebal: 3 mm sebagaimana Gambar 2.



Gambar 2. Dimensi Engsel Pintu Pagar Lipat dari Baja Karbon Rendah.

Fabrikasi engsel disusun secara sistematis agar sesuai dengan standar produksi industri, meliputi: (1) Pembelian bahan, (2) Pemotongan, (3) Penempaan, (4) Penandaan (*marking*), (5) Pengeboran, (6) Penggerindaan, (7) Finishing, (8) Perakitan, (9) Inspeksi mutu dan pengemasan. Target produksi ditetapkan sebesar 0.682 unit/jam, sehingga waktu siklus maksimum yang diperbolehkan untuk setiap unit dapat dihitung dengan Rumus (1).

Waktu siklus produksi = $60/\text{Jumlah produk} \dots\dots\dots(iii)$

$t_c = 60/0,682 = 87,97$ menit/Unit, atau dibulatkan 88 menit/Unit.....(iv)

Setiap satu unit engsel harus selesai diproduksi dalam waktu 88 menit/unit atau luaran 0,682 unit/jam. Implementasi *line balancing* bertujuan untuk mereduksi *idle time*, membuat beban kerja antar stasiun seimbang, dan meminimalkan *bottleneck* proses dengan waktu siklus yang lebih lama. Meskipun waktu total proses/unit secara individual cukup besar, sistem tetap dapat mencapai luaran tinggi melalui pembagian beban kerja yang efisien dalam suatu lini produksi. Pendekatan tersebut juga memungkinkan peningkatan produktivitas tanpa harus mengurangi mutu produk, karena setiap stasiun kerja dapat difokuskan pada satu jenis proses tertentu dengan kontrol yang lebih baik. Pengendalian mutu dilakukan melalui: (1) pemeriksaan dimensi produk, (2) pemeriksaan visual hasil las (porositas, retak, *spatter*), (3) pengujian kesesuaian gerak engsel (rotasi), dan (4) evaluasi kekuatan engsel.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pembuatan tersebut membahas konsep proses fabrikasi engsel pintu pagar lipat berbahan baja karbon rendah dengan pendekatan deskriptif berdasarkan alur proses produksi, kebutuhan waktu siklus, dan kapasitas produksi yang ditargetkan sebesar 0,682 unit/jam. Hasil desain menunjukkan bahwa proses fabrikasi dapat disusun secara sistematis melalui beberapa tahapan utama, yaitu pemotongan bahan, pengeboran, pembentukan, pengelasan, penggerindaan, dan *finishing*. Tahap awal proses dimulai dari pemotongan baja karbon rendah sesuai spesifikasi desain yaitu panjang 250 mm, lebar 80 mm, tinggi 100 mm, dan tebal 3 mm. Pemotongan memakai mesin potong logam atau gerinda potong untuk memperoleh dimensi

awal yang presisi. Setelah hal tersebut dilakukan proses pengeboran untuk membuat lubang sambungan sesuai desain engsel. Ketelitian pada tahap tersebut sangat menentukan kesesuaian antar komponen pada proses perakitan.

Engsel merupakan komponen penting yang berfungsi sebagai penghubung dua bagian konstruksi, sehingga memungkinkan terjadinya gerakan rotasi dan menahan beban yang bekerja pada sistem. Dalam aplikasi pintu, engsel harus mampu menahan beban statis dan dinamis (Rayyan dan Mardiyana, 2025). Beban statis dan dinamis engsel harus mampu ditahan engsel. Dalam aspek produktivitas, target produksi ditetapkan sebesar 0,682 unit/jam.

Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh tahapan proses harus didesain agar tidak melebihi 88 detik/unit. Rahman dan Khan (2021) menyatakan bahwa optimasi waktu siklus melalui *balancing* dapat meningkatkan kapasitas produksi secara signifikan dalam sistem manufaktur. Selain hal tersebut, Santos et al., (2019) menjelaskan bahwa penerapan *lean manufacturing* dalam fabrikasi logam mampu mengurangi waktu proses tak bernilai tambah, sehingga meningkatkan efisiensi produksi secara keseluruhan. Li et al., (2021) juga menambahkan bahwa optimasi alur proses produksi dapat menurunkan *lead time* dan meningkatkan stabilitas sistem manufaktur. Estimasi biaya produksi dan durasi fabrikasi engsel pintu pagar lipat berbahan baja karbon rendah sebagaimana Tabel 1.

Tabel 1. Estimasi Biaya Produksi dan Waktu Fabrikasi Engsel Pintu Pagar Lipat Berbahan Baja Karbon Rendah.

No.	Tahapan Proses	Biaya Produksi (Rp)	Durasi Proses (Menit)
1	Desain engsel pintu pagar lipat panjang 250 mm, lebar 80	5.000	10
2	Pemotongan 2 lembar baja AISI 1020 berukuran 250x80x3 mm	5.000	5
3	Penempaan membentuk lingkaran berdiameter 11 mm pada sisi lebar 80 mm	5.000	15
4	Pengeboran 4 buah lubang berdiameter 9 mm pada posisi sesuai desain	6.000	12
5	Pembuatan poros engsel dari baut M10 yang disambung kepala dan ulirnya dengan batang penyambung menjadi panjang 175 mm	9.000	15
6	Perakitan 2 buah keping engsel dengan poros engsel	11.000	16
7	Pemeriksaan mutu-dimensi-pengemasan	7.000	15
	Jumlah	48.000	88
	Pajak 10%	4.800	
	Laba 15%	7.200	
	Total/Harga jual per unit	60.000	

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil fabrikasi sepasang engsel pintu pagar lipat dari baja AISI 1020 dimensi 250x80x3 mm, tinggi 100 mm dengan poros dari baut M10 sepanjang 175 mm dengan biaya produksi Rp 48.000,-/unit, dan durasi proses 12 menit/unit yang berimplikasi bahwa engsel siap dilas pada pintu pagar dengan beban maksimum 50 kg dan dicat sebelum penggunaan.

Saran tindak lanjut atas simpulan adalah perlu: (1) pengukuran waktu kerja secara langsung (*time study*) pada setiap tahapan proses agar data waktu siklus lebih akurat dan sesuai kondisi nyata industri, (2) penerapan metode *lean manufacturing* secara lebih mendalam untuk menurunkan kegiatan tak bernilai tambah, sehingga produktivitas meningkat, (3) pengujian mekanis (kekuatan geser dan kekuatan lentur) untuk memastikan mutu hasil engsel sesuai standar teknis, (4) penggunaan *jig* dan *fixture* untuk meningkatkan ketelitian perakitan dan mengurangi waktu setup produksi, dan (5) analisis biaya produksi (*cost analysis*) agar konsep fabrikasi tidak hanya efisien dari sisi waktu, tetapi juga ekonomis untuk implementasi industri.

DAFTAR REFERENSI

- Allwood, J. M., Childs, T. H. C., Clare, A. T., Silva, A. K. M. D., Dhokia, V., Hutchings, I. M., Leach, R. K., Leal-Ayala, D. R., Lowth, S., Majewski, C. E., Marzano, A., Mehnen, J., Nassehi, A., Ozturk, E., Raffles, M. H., Roy, R., Shyha, I., & Turner, S. (2016). Manufacturing at double the speed. *Journal of Materials Processing Technology*, 229, 729–757. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.10.028>
- Ammar, H. R., Galyon, G. T., & Samuel, A. M. (2021). Influence of low carbon steel properties on weldability and structural performance. *Metals*, 11(4), 563. <https://doi.org/10.3390/met11040563>
- Antonnius, A., Afdal, A., Mukhnizar, M., Abu, R., & Azman, A. (2022). Perencanaan mesin tempa logam dengan sistem forging hammer. *Jurnal Teknik, Komputer, Agroteknologi dan Sains*, 1(2), 163–174. <https://doi.org/10.56248/marostek.v1i2.29>
- Bucko, O., Karkula, M., & Weiszer, M. (2020). Improving production efficiency by implementing lean tools in welding processes. *Applied Sciences*, 10(21), 7686. <https://doi.org/10.3390/app10217686>
- Deshpande, A. S. (2019). Total quality management and concurrent engineering for manufacturing performance improvement. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 36(8), 1358–1374. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2018-0124>
- Escobar, C. A., McGovern, M. E., & Morales-Menendez, R. (2021). Quality 4.0: A review and framework for future research in manufacturing systems. *Applied Sciences*, 11(15), 6843. <https://doi.org/10.3390/app11156843>
- Faria, J. A., Tortorella, G. L., & Cauchick-Miguel, P. A. (2019). Integrating process data and cost of quality to support manufacturing inspection decisions. *International Journal of Production Economics*, 214, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.03.016>

- Gardner, M. (2020). Cycle time reduction and manufacturing system effectiveness: A review of industrial applications. *Procedia Manufacturing*, 51, 1387–1394. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.193>
- Groche, P., Liewald, M., Bergs, T., Behrens, B.-A., Briesenick, D., Müller, M., Niemietz, P., Kubik, C., & Müller, F. (2022). Perspectives on data-driven models and its potentials in metal forming and blanking technologies. *Production Engineering*, 16(5), 607–625. <https://doi.org/10.1007/s11740-022-01115-0>
- Islam, M. H., Chavez, Z., Birkie, S. E., & Bellgran, M. (2022). Enablers in the production system design process impacting operational performance. *Production & Manufacturing Research*, 10(1), 257–280. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2076753>
- Klocke, F., Stauder, J., Mattfeld, P., & Müller, J. (2016). Modeling of manufacturing technologies during ramp-up. *Procedia CIRP*, 51, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.098>
- Leiber, D., & Reinhart, G. (2022). Economic efficiency of automated manufacturing systems design. *Procedia CIRP*, 112, 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.040>
- Li, Y., Wang, X., & Zhang, H. (2021). Lead time reduction in manufacturing systems using process optimization techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.09.007>
- Martínez-Olvera, C. (2022). The role of manufacturing efficiency in the achievement of sustainable mass customization 4.0. *Production & Manufacturing Research*, 10(1), 132–159. <https://doi.org/10.1080/21693277.2022.2064360>
- Pfeiffer, A., Gyulai, D., Kádár, B., & Monostori, L. (2016). Manufacturing lead time estimation with the combination of simulation and statistical learning methods. *Procedia CIRP*, 41, 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.018>
- Rahman, M. M., & Khan, M. A. (2021). Cycle time optimization in manufacturing systems using process balancing approach. *International Journal of Production Economics*, 240, 108247. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108247>
- Rayyan, M., & Mardiyana, D. (2025). Analisis engsel pintu box belakang truk jenis Mitsubishi Canter 125 PS menggunakan Autodesk Inventor. *Prosiding TAU SNARSTEK Seminar Nasional Rekayasa dan Teknologi*, 5(1), 99–103. <https://doi.org/10.47970/snarstek.v2i1.777>
- Santos, J. P., et al. (2019). Productivity improvement in sheet metal fabrication using lean manufacturing tools. *Procedia Manufacturing*, 38, 1111–1118. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.093>
- Sari, N. H. (2017). Perlakuan panas pada baja karbon: Efek media pendinginan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, 6(4), 263–267. <https://doi.org/10.22441/jtm.v6i4.2091>
- Zhao, C., Dinar, M., & Melkote, S. N. (2022). A data-driven framework for learning the capability of manufacturing process sequences. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.05.009>