

## Predictive maintenance on machine using failure mode effect analysis

Vico Willy Vilardo<sup>1</sup>, Firman<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Management, Faculty of Economics, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

### ARTICLE INFO

Received 10 February 2021  
Accepted 15 March 2021  
Published 31 March 2021

#### Keywords:

Failure mode effect analysis;  
machine; predictive maintenance

DOI:10.24036/jkmb.xxxxxxx

#### Kata Kunci:

Failure mode effect analysis; mesin;  
predictive maintenance

### ABSTRACT

Industrial manufacturing company is a company whose main result in the production process are in the form of product. To expedite the company's production activities supported by adequate machinery, so even with PT. X. But in maintenance activities, the Downtime that occurs exceeds the set downtime limit, which is 7,2% of 5% toleranacce limit. This study aims to find critical componenets of hammer mill machines based on one year engine failure history at PT. X using the Failure Mode Effecy and Analysis method. From the result of analysis there are 6 critical components of the hammer mill machine, namely: fixed blade, rotor blade, dynamo, V-Belt and gears.

### ABSTRAK

Industri manufaktur adalah perusahaan yang hasil utamanya dalam proses produksinya berupa produk. Untuk memperlancar kegiatan produksi perusahaan didukung dengan mesin yang memadai, begitu pun dengan PT. X. Namun dalam aktivitas *maintenance*, *downtime* yang terjadi melebihi batas *downtime* yang ditetapkan yaitu 7,2% dari batas toleransi 5%. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan komponen kritis mesin *Hammer Mill* berdasarkan riwayat kerusakan mesin selama satu tahun di PT. X menggunakan metode *failure mode and effect analysis*. Dari hasil analisa terdapat 6 komponen kritis mesin *hammer mill*, yaitu: *fixed blade*, *rotor blade*, *dynamo*, *V-Belt* dan *gear*.

**How to cite:** Vilardo, V. W., & Firman. (2021). Predictive maintenance on machine using failure mode effect analysis. *Operations Management and Information System Studies 1* (1), 51-60. DOI: <https://doi.org/10.24036/jkmb.xxxxxxx>



This is an open access article distributed under the Creative Commons 4.0 Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. ©2021 by author.

\* Corresponding author: [firmanfeunp@gmail.com](mailto:firmanfeunp@gmail.com)

## PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi akhir-akhir ini berjalan dengan pesat. Perubahan teknologi yang dipergunakan dapat meningkatkan presentase keberhasilan dalam kegiatan operasional perusahaan (Atasu, Corbett, Huang, & Beril Toktay, 2020; Cachon, 2012; Choi, Wallace, & Wang, 2018; Hitt, Xu, & Carnes, 2016). Salah satu faktor penunjang keberhasilan suatu perusahaan manufaktur dan jasa ditentukan oleh kelancaran proses operasional perusahaan (Kumar, Mookerjee, & Shubham, 2018; Machado, Pinheiro de Lima, Gouvea da Costa, Angelis, & Mattioda, 2017). Sehingga bila proses operasional lancar, maka akan menghasilkan

*output* yang berkualitas. Dimana perusahaan manufaktur merupakan salah satu sektor yang berhasil berkontribusi terhadap sektor ekonomi seperti penyediaan lapangan pekerjaan, pemenuhan kebutuhan masyarakat secara ekonomis, serta pemenuhan kebutuhan masyarakat (Prabowo & Jaya, 2015).

Dalam kegiatan industri, produk merupakan hasil utama dari satu proses produksi yang membentuk suatu sistem proses produksi. Dalam kegiatan produksi maka dibutuhkan kegiatan *maintenance* terhadap peralatan dan mesin-mesin produksi (Nurfaizah, Adiarto, & Prasetyo, 2014). Perawatan dilakukan untuk mencegah kegagalan sistem maupun untuk mengembalikan fungsi sistem jika kegagalan telah terjadi. Pemeliharaan (*maintenance*) mencakup keseluruhan aktivitas yang bertujuan untuk menjaga keseluruhan peralatan sistem agar dapat bekerja, memperpanjang umur pakai fasilitas, menjamin kesiapan operasional seluruh fasilitas, menjamin keselamatan operator, mendukung kemampuan mesin untuk dapat memenuhi kebutuhan sesuai fungsinya, serta untuk mencapai tingkat biaya perawatan optimal (Heizer, Render, & Munson, 2017; Prihastono & Prakoso, 2017).

Salah satu perusahaan yang bergerak dalam bidang produksi adalah PT. X. Dalam kegiatan produksi dan pengolahan operasional produksi, PT. X di tunjang dengan mesin-mesin yang kompeten agar menghasilkan produk yang berkualitas. Salah satu mesin penunjang kegiatan produksi pada PT. X adalah mesin *Hammer Mill*. Mesin ini berfungsi untuk memotong atau mencincang bahan baku supaya lebih kecil dan memiliki ukuran yang sama (Armatmontree, San-Um, & Keatmanee, 2019; Eliseev, Zagoruyko, Rybalkin, Leontyev, & Peretyatko, 2018; Ezurike, Osazuwa, Okoronkwo, & Okoji, 2018; Lakshmi Shamvardhini & Sydanna, 2017). Dalam proses operasional PT. X, kerusakan mesin kerap terjadi saat proses produksi sedang berjalan. Pihak perusahaan menetapkan batas *downtime* mesin produksi maksimal 5% dari total waktu kerja efektif mesin, dan pada tahun 2019, total *downtime* mesin melewati batas yang telah ditentukan oleh perusahaan yang mana persentase *downtime* mesin produksi mencapai 7,2 %.

Dari hitoris kerusakan mesin pada PT. X, mesin *Hammer Mill* merupakan mesin dengan penyumbang *downtime* tertinggi yaitu 2.9% dari total waktu *downtime*. Oleh karena itu penelitian ini di fokuskan kepada mesin *Hammer Mill* yang merupakan mesin dengan persentase *downtime* tertinggi pada perusahaan (Amalia et al., 2018; Wibowo, Sidiq, & Ariyanto, 2019).

Upaya perbaikan dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) (Kluse, 2017; Liu, Liu, & Liu, 2013; Mascia et al., 2020; Tayntor, 2010). FMEA adalah sebuah teknik rekayasa yang digunakan untuk menetapkan, mengidentifikasi, dan untuk menghilangkan kegagalan yang diketahui, permasalahan, *error*, dan sejenisnya dari sebuah sistem, desain, proses, dan atau jasa sebelum mencapai konsumen (Mayangsari, F, Adiarto, & Yuniati, 2015).

## KAJIAN LITERATUR

### Pemeliharaan

Pemeliharaan adalah berupa suatu tindakan dalam upaya menjaga, memelihara dan memperbaiki fasilitas yang dimiliki jika terjadi kerusakan saat kegiatan operasional sedang berlangsung, sehingga dilakukan penyesuaian atau pergantian bagian yang dibutuhkan agar mendapatkan kondisi operasional produksi sehingga sesuai dengan perencanaan yang ada (Sun & Geng, 2019; Vitayasak, Pongcharoen, & Hicks, 2019; Wibowo et al., 2019).

### Perawatan prediktif (*predictive maintenance*)

Perawatan prediktif adalah pemikiran atau tindakan yang secara sederhana digunakan saat kondisi operasional dari peralatan perusahaan dan system sedang berjalan dengan tujuan untuk mengoptimalkan total operasional perusahaan (Aivaliotis, Georgoulis, & Chryssolouris, 2019; Berger, 2015; March & Scudder, 2019; Scheibelhofer, Gleispach, Hayderer, & Stadlober, 2016).

### **Failure mode and effect analysis (FMEA)**

Metode *failure mode and effect analysis* adalah teknik rekayasa yang digunakan untuk mendefinisikan, mengidentifikasi masalah, kesalahan, dan sebagainya dari suatu sistem, desain dan proses dari suatu produk atau jasa sebelum diterima oleh konsumen (Mayangsari, F, Adianto, & Yuniati, 2015). Hasil dari metode ini adalah tingkat resiko yang ditimbulkan oleh kegagalan yang teridentifikasi serta rekomendasi dari cara meminimalisir atau pengeliminasian penyebab kegagalan tersebut (Arabian-Hoseynabadi, Oraee, & Tavner, 2010; Liu et al., 2013; Pirouzi, Gorji, Ravaghi, & Afshari, 2020; Wang, Ran, Chen, Yu, & Zhang, 2020). Secara umumnya, FMEA mengidentifikasi:

- a. Penyebab kegagalan yang potensial dari sistem, desain atau proses.
- b. Efek kegagalan yang terjadi pada sistem.
- c. Tingkat kekritisan dari kegagalan tersebut.

## **METODE**

Penelitian ini termasuk jenis penelitian deskriptif. Menurut Huda et al., (2014) penelitian deskriptif merupakan penelitian yang ciri utamanya adalah memberikan penjelasan objektif, komparasi, dan evaluasi sebagai bahan pengambilan keputusan bagi yang berwenang. Tujuan dari penelitian deskriptif adalah mencari penjelasan atas suatu fakta atau kejadian yang sedang terjadi, misalnya kondisi atau hubungan yang ada, pendapat yang sedang berkembang, akibat atau efek yang terjadi, atau kecenderungan yang sedang berlangsung (Sekaran & Bougie, 2017). Dalam penelitian ini pendekatan yang digunakan adalah kualitatif yang terdiri dari data fungsi mesin dan kegagalan, data penyebab kegagalan, dan efek yang ditimbulkan jika terjadi kegagalan.

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data primer yang didapatkan melalui wawancara dan diskusi dengan kepala dan anggota sektor perbengkelan PT. X. Setelah data terkumpul maka akan dilakukan analisis dengan tahapan-tahapan sebagai berikut;

1. Menentukan komponen dan fungsi komponen (*componen and function*),  
Kegiatan yang dilakukan pada tahap ini adalah menjelaskan fungsi dan cara kerja dari mesin.
2. Menentukan mode kegagalan (*potential failure*).  
Pada langkah ini, kegiatan yang dilakukan adalah berupa mengidentifikasi potensi moda kegagalan yang muncul yang berkaitan dengan proses yang dijalani komponen.
3. Identifikasi efek kegagalan (*potential effect of failure*),  
Kegiatan pada tahapan ini adalah mengidentifikasi potensi mode kegagalan yang muncul berkaitan dengan proses yang dilalui oleh mesin.
4. Menentukan *Rating Severity*.  
Kegiatan pada tahap ini adalah memberikan penilaian terhadap setiap potensi mode kegagalan yang ada.
5. Menentukan penyebab kegagalan (*potential cause of failure*).  
Kegiatan pada tahapan ini adalah mengidentifikasi segala penyebab kegagalan yang berkemungkinan muncul.
6. Menentukan nilai occurrence (OCC),  
Menganalisis dan memberikan penilaian frekuensi terjadinya kegagalan dari skala 1-10.
7. Menentukan nilai detection (DET)  
Pengukuran terhadap kemampuan mendeteksi atau mengontrol kegagalan yang dapat terjadi.
8. Menentukan nilai RPN.

Langkah ini adalah tahap dengan tujuan agar memperoleh urutan tingkat kepentingan dihitung dengan menggunakan *Risk Priority Number*.

9. Tahap selanjutnya adalah rekomendasi perawatan (*recomended action*) yang harus dilakukan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Uraian data kerusakan

Data kerusakan yang diperoleh merupakan data kerusakan mesin *Hammer Mill* pada 1 tahun terakhir. Tabel 1 merupakan jumlah kejadian kerusakan mesin *Hammer Mill* dalam waktu 1 tahun yang didapatkan dari data perusahaan.

**Tabel 1. Uraian Jumlah Kerusakan Hammer Mill**

Komponen	Jumlah kerusakan	Downtime (menit)
Bearing	2	120
Pisau tetap	8	425
Pulley	4	240
Rantai pendayung	4	260
Rinamo pendayung	5	315
V-Belt	4	150
Konveyor	7	440
Rantai konveyor	3	185
Roda gigi	7	420
Bearing konveyor	4	240
Dynamo	5	315
Pisau putar	8	505
Pompa	5	175
Total	66	3790

*Sumber: Data historis perawatan perusahaan (2020)*

### 2. Kegagalan yang terjadi

Setelah mengetahui akumulasi kegagalan komponen, selanjutnya yaitu mencatat daftar kegagalan potensial pada komponen mesin *Hammer Mill*. Setelah dilakukan pengamatan dan wawancara, terdapat 28 potensi kegagalan seperti tabel 2.

**Tabel 2. Kerusakan Komponen**

No	Komponen	Jenis Kegagalan
1	Bearing	Bearing Pecah Korosi Kebocoran pelumas
2	Pisau tetap	Pisau Tumpul Pisau patah
3	Pully	Aus Putaran tidak sesuai dengan sumbu porosnya
4	Rantai pendayung	Putus Kendor
5	Dynamo pendayung	Dynamo rusak Overheating
6	V Belt 147	Kendor Putus
7	Konveyor	Koyak Putus
8	Rantai conveyor	Rantai kendor Rantai putus
9	Roda gigi	Korosi Alur beberapa gigi patah Aus Overheating
10	Bearing konveyor	Pecah Korosi
11	Dynamo	Overheating Rusak total
12	Pompa air	Tersumbat
13	Pisau putar	Patah Tumpul

Sumber: Data diolah (2020)

### 3. Perhitungan RPN

Setelah mengidentifikasi *failure mode*, *effect of failure*, *cause effect*, tahap selanjutnya menetapkan nilai *severity rating*, menetapkan nilai *occurance rating*, menentukan *current control*, menetapkan nilai *detection*, dan menghitung *Risk Priority Number* (RPN). Tujuan akhir dari FMEA adalah menentukan komponen yang memiliki andil besar atas breakdown mesin. Ketika nilai RPN telah diketahui, maka dapat ditentukan urutan penanganan kegagalan pada proses kerja mesin sehingga bisa menekan angka *downtime* pada mesin di PT. X. Tabel 3 menunjukkan urutan prioritas penanganan 4 kerusakan.

**Tabel 3. Perhitungan Nilai RPN**

Komponen	RPN	% RPN	Kumulatif %
Pisau tetap	343	15.31%	15.31%
Pisau putar	294	13.13%	28.44%
Roda gigi	288	12.86%	41.29%
Pully	250	11.16%	52.46%
Dynamo	192	8.57%	61.03%
V-Belt	180	8.04%	69.06%
Bearing konveyor	150	6.70%	75.76%
Rantai pendayung	140	6.25%	82.01%
Dynamo pendayung	108	4.82%	86.83%
Pompa air	98	4.38%	91.21%
Rantai konveyor	96	4.29%	95.49%
Konveyor	56	2.50%	97.99%
Bearing	45	2.01%	100.00%
Total	2240	100%	

Sumber: Data diolah (2020)

#### 4. Penentuan komponen kritis

Setelah nilai RPN komponen dan total nilai RPN diketahui, selanjutnya yang dilakukan adalah menentukan komponen kritis pada mesin. Hasil dari komponen kritis pada mesin dapat dilihat pada tabel 4.

**Tabel 4. Komponen Kritis mesin *Hammer Mill***

Komponen	Kerusakan	S	D	O	RPN
Pisau tetap	Pisau Tumpul	7	7	7	343
	Pisau patah				
Pully	Aus	5	10	5	250
	Putaran tidak sesuai dengan sumbu porosnya				
V-Belt	Kendor	6	6	5	180
	Putus				
Roda gigi	Korosi	6	8	6	288
	Alur beberapa gigi patah				
Dynamo	Aus	8	4	6	192
	Overheating				
	Rusak total				

Komponen	Kerusakan	S	D	O	RPN
Pisau tumpul	tumpul	6	7	7	294
	Patah				

Sumber: Data diolah (2020)

Dari tabel 4 diketahui bahwa terdapat 6 komponen kritis pada mesin *Hammer Mill* yang mana memiliki nilai RPN lebih tinggi dari pada nilai kritis RPN, yang merupakan prioritas utama dalam penanganan kerusakan pada mesin *Hammer Mill*.

Berdasarkan hasil penelitian dengan menggunakan metode *FMEA* pada PT.X, maka penulis menyarankan kepada perusahaan sebaiknya dalam kegiatan perawatan agar menambahkan kegiatan *predictive maintenance* (Dalzochio et al., 2020; Sahal, Breslin, & Ali, 2020; Vitayasak et al., 2019). Dimana *predictive maintenance* dilaksanakan dengan melakukan perencanaan dalam menetapkan interval pergantian komponen untuk proses perawatan dan perbaikan komponen, agar bisa mendapatkan jangka waktu yang optimal untuk melakukan pergantian komponen sehingga bisa mengurangi probabilitas terjadinya *breakdown* dan dapat mengurangi *downtime* saat proses produksi berjalan sehingga kegiatan produksi tetap berlanjut dan dapat mencapai target produksi (March & Scudder, 2019; Sarker, Omar, Kamrul Hasan, & Essam, 2013).

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dengan menggunakan metode *FMEA* pada analisis kerusakan mesin *Hammer mill* di PT. X dapat disimpulkan bahwa;

1. Pada mesin *Hammer Mill* di PT. X, terdapat 28 jenis kerusakan, yang berasal dari 13 komponen mesin *Hammer Mill*.
2. Dari hasil perhitungan *Risk Priority Number* terdapat 6 kerusakan komponen yang dominan dari total 13 komponen yang ada, 6 komponen tersebut memiliki nilai *Risk Priority Number* melebihi nilai kritis RPN, yang artinya keenam komponen ini adalah komponen kritis yang harus diprioritaskan dalam perawatan mesin. Dimana masing-masing komponen memiliki nilai RPN sebagai berikut:
  - a. Pisau tetap : RPN = 343, % RPN = 15,31 %
  - b. Pisau putar : RPN = 294, % RPN = 13,13 %
  - c. Roda gigi : RPN = 288, % RPN = 12,86 %
  - d. Pully : RPN = 250, % RPN = 11,16 %
  - e. Dynamo : RPN = 192, % RPN = 8,57%
  - f. V-Belt : RPN = 180, % RPN = 8,04%
3. Komponen mesin dengan total nilai RPN dari yang tertinggi sampai yang terendah berturut-turut adalah: Pisau tetap 343, Pisau putar 294, Roda gigi 288, Pully 250, Dynamo 192, V-Belt 180, Bearing konveyor 150, rantai pendayung 140, dynamo pendayung 108, pompa air 98, rantai konveyor 56, konveyor 56, bearing 45.

Bagi peneliti selanjutnya, disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut tentang *predictive maintenance*. Penelitian bisa dilanjutkan dengan menganalisis interval kerusakan dan pergantian komponen serta penghitungan biaya perawatan dan pergantian mesin.

## REFERENSI

- Aivaliotis, P., Georgoulas, K., & Chryssolouris, G. (2019). The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(11).
- Amalia, K., Amrullah, H. N., Subekti, A., Ashari, M. L., Hidayat, E. P., Mudjiono, U., & Widodo, H. A. (2018). Fire risk assessment on hammer mill machine with human reliability assessment (HRA) and component reliability approaches. *MATEC Web of Conferences*, 204.
- Arabian-Hoseynabadi, H., Oraee, H., & Tavner, P. J. (2010). Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 32(7).
- Armatmontree, A., San-Um, W., & Keatmanee, C. (2019). Design and Analysis of a Hammer Mill Machine in High-Efficacy Recycle Process. *Proceedings of the Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy, ICUE, 2018-October*.
- Atasu, A., Corbett, C. J., Huang, X., & Beril Toktay, L. (2020). Sustainable operations management through the perspective of manufacturing & service operations management. *Manufacturing and Service Operations Management*, 22(1).
- Berger, R. (2015). Predictive maintenance—Is the timing right for predictive maintenance in the manufacturing sector? *Roland Berger*, (november).
- Cachon, G. P. (2012). What is interesting in operations management? *Manufacturing and Service Operations Management*, Vol. 14.
- Choi, T. M., Wallace, S. W., & Wang, Y. (2018). Big Data Analytics in Operations Management. *Production and Operations Management*, 27(10).
- Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges. *Computers in Industry*, Vol. 123.
- Eliseev, M. S., Zagoruyko, M. G., Rybalkin, D. A., Leontyev, A. A., & Peretyatko, A. V. (2018). Determination of speed range of Hammer mill grinder. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(8).
- Ezurike, B. O., Osazuwa, O. J., Okoronkwo, C. A., & Okoji, K. I. (2018). Design, construction and performance evaluation of a flat screen hammer mill machine. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*, 10(6).
- Fitria Mayangsari, D., Adiando, H., & Yuniati, Y. (2015). Usulan pengendalian kualitas produk isolator dengan metode failure mode and effect analysis (FMEA) dan fault tree analysis (FTA). *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 03(2), 2338–5081.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2017). *Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management* (Twelfth Ed). USA: Pearson.



- Hitt, M. A., Xu, K., & Carnes, C. M. (2016). Resource based theory in operations management research. *Journal of Operations Management*, 41.
- Huda, A. T. N., Novareza, O., & Andriani, D. P. (2014). *Maintenance Activities Analysis of Hds Machine in Hulling Station*. 3(2), 311–321.
- Kluse, C. (2017). Failure Modes and Effects Analysis (FMEA): Factors affecting execution and implementation of the FMEA and an alternate method for process risk assessment. *Journal of Management & Engineering Integration*, 10(1).
- Kumar, S., Mookerjee, V., & Shubham, A. (2018). Research in operations management and information systems interface. *Production and Operations Management*, 27(11).
- Lakshmi Shamvardhini, P., & Sydanna, T. R. (2017). Manufacturing with design and analysis of rotor shaft of hammer mill crusher. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, 06(05).
- Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, Vol. 40.
- Machado, C. G., Pinheiro de Lima, E., Gouvea da Costa, S. E., Angelis, J. J., & Mattioda, R. A. (2017). Framing maturity based on sustainable operations management principles. *International Journal of Production Economics*, 190.
- March, S. T., & Scudder, G. D. (2019). Predictive maintenance: strategic use of IT in manufacturing organizations. *Information Systems Frontiers*, 21(2).
- Mascia, A., Cirafici, A. M., Bongiovanni, A., Colotti, G., Lacerra, G., di Carlo, M., Kisslinger, A. (2020). A failure mode and effect analysis (FMEA)-based approach for risk assessment of scientific processes in non-regulated research laboratories. *Accreditation and Quality Assurance*, 25(5–6).
- Nurfaizah, U., Adiarto, R. H., & Prassetiyo, H. (2014). Rancangan Penerapan Total Productive Maintenance (TPM) Di Bagian Press II PT. XYZ. *Reka Integra*, 2(1).
- Pirouzi, M., Gorji, H. A., Ravaghi, H., & Afshari, A. (2020). Health care failure mode and effect analysis in the operating room setting. *Quality Management in Health Care*, 29(4).
- Prabowo, H., & Jaya, T. E. (2015). Pengaruh sistem informasi akuntansi manajemen, strategi, dan inovasi terhadap kinerja operasional perusahaan manufaktur dalam memasuki era perdagangan bebas. *Jurnal Wahana Akuntansi*, 10(2).
- Prihastono, E., & Prakoso, B. (2017). Perawatan preventif untuk mempertahankan utilitas performance pada mesin cooling tower di CV. Arhu Tapselindo Bandung. *Dinamika Teknik*, 10, 17–27.
- Sahal, R., Breslin, J. G., & Ali, M. I. (2020). Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case. *Journal of Manufacturing Systems*, 54.
- Sarker, R., Omar, M., Kamrul Hasan, S. M., & Essam, D. (2013). Hybrid Evolutionary Algorithm for job scheduling under machine maintenance. *Applied Soft Computing Journal*, 13(3).

- Scheibelhofer, P., Gleispach, D., Hayderer, G., & Stadlober, E. (2016). A Methodology for Predictive Maintenance in Semiconductor Manufacturing. *Austrian Journal of Statistics*, 41(3).
- Sekaran, U., & Bougie, R. (2017). Metode Penelitian Bisnis Edisi 6 Buku 2. In *Jakarta: Salemba Empat*.
- Sun, X., & Geng, X. N. (2019). Single-machine scheduling with deteriorating effects and machine maintenance. *International Journal of Production Research*, 57(10).
- Tayntor, C. (2010). The Failure Modes and Effects Analysis (FMEA). In *Project Management Tools and Techniques for Success*.
- Vitayasak, S., Pongcharoen, P., & Hicks, C. (2019). Robust machine layout design under dynamic environment: Dynamic customer demand and machine maintenance. *Expert Systems with Applications: X*, 3.
- Wang, Z., Ran, Y., Chen, Y., Yu, H., & Zhang, G. (2020). Failure mode and effects analysis using extended matter-element model and AHP. *Computers and Industrial Engineering*, 140.
- Wibowo, H., Sidiq, A., & Ariyanto, A. (2019). penjadwalan perawatan komponen kritis dengan pendekatan reliability centered maintenance (RCM) pada perusahaan karet. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 6(2).