

Implementasi Sistem Kendali Otomatis Pada Industri Manufaktur: Kajian Literatur

Mohammad Simar Kurniawan¹⁾, Kahfi Wijaya²⁾, Humiras Hardi Purba³⁾

*Program Studi Teknik Industri, Universitas Mercu Buana
Jalan Meruya Selatan No.1 Kembangan Jakarta Barat 11650 Jakarta^{1),2),3)}
E-Mail : simarsir13@gmail.com^{1)*}*

ABSTRACT

The implementation of automatic control systems has become a crucial element in the development of modern industries and smart home technologies. These systems, comprising sensors, controllers, and actuators, enable more efficient operations, reduce human errors, and increase productivity. In the era of Industry 4.0, the application of automatic control has expanded from manufacturing to various aspects of daily life, such as smart homes that can automatically regulate temperature and lighting. Various control techniques, such as PID, fuzzy, and model predictive control, have been developed to meet the specific needs of different industries. This literature review aims to provide comprehensive insights into the basic concepts, techniques, and methods used in automatic control systems, as well as to identify existing challenges and opportunities. Through a systematic review of 35 relevant articles, this study reveals various practical applications and benefits of automatic control systems and suggests broader and more effective adoption of this technology to enhance quality and efficiency across various sectors.

Keywords: Automatic Control in Manufacture, Industry 4.0, PID, Fuzzy, Model Predictive Control, Production Efficiency.

ABSTRAK

Implementasi sistem kendali otomatis telah menjadi elemen krusial dalam perkembangan industri modern dan teknologi rumah pintar. Sistem ini, yang terdiri dari sensor, pengontrol, dan aktuator, memungkinkan proses operasi yang lebih efisien, mengurangi kesalahan manusia, dan meningkatkan produktivitas. Dalam era Industri 4.0, penerapan kendali otomatis telah meluas dari manufaktur ke berbagai aspek kehidupan sehari-hari, seperti rumah pintar yang dapat mengatur suhu dan pencahayaan secara otomatis. Berbagai teknik kendali, seperti PID, fuzzy, dan kendali model prediktif, telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan spesifik industri. Kajian literatur ini bertujuan untuk memberikan wawasan komprehensif mengenai konsep dasar, teknik, dan metode yang digunakan dalam sistem kendali otomatis, serta mengidentifikasi tantangan dan peluang yang ada. Melalui kajian sistematis terhadap 35 artikel yang relevan, penelitian ini mengungkapkan berbagai aplikasi praktis dan manfaat dari sistem kendali otomatis, serta menyarankan adopsi teknologi ini secara lebih luas dan efektif untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi di berbagai sektor.

Kata Kunci: Sistem Otomasi Manufaktur, Industri 4.0, PID, Fuzzy, Kendali Model Prediktif, Efisiensi Produksi

**Corresponding author*

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi dalam beberapa dekade terakhir telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai aspek kehidupan manusia, salah satunya adalah dalam bidang kendali otomatis. Sistem kendali otomatis memegang peranan yang sangat penting dalam perkembangan teknologi khususnya dalam dunia industri modern. Pada, penggunaan sistem kendali otomatis akan mempermudah pencapaian kualitas, mengurangi biaya produksi, meningkatkan laju produksi dan menggantikan tugas-tugas yang biasanya harus dilakukan oleh manusia, yang merupakan tugas-tugas rutin yang sudah ketinggalan zaman dan membosankan.

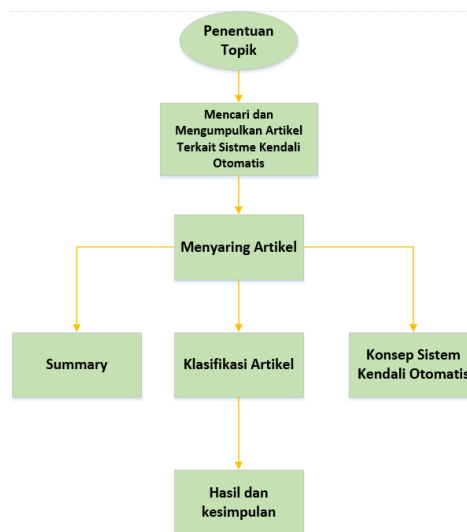
Sejak konsep dasar sistem kendali umpan balik diperkenalkan oleh James Watt pada abad ke-18, perkembangan teknologi ini telah mengalami percepatan yang luar biasa, terutama dalam beberapa dekade terakhir. Sistem kendali otomatis, yang didefinisikan sebagai sistem yang dapat mengatur variabel-variabel proses tanpa intervensi manusia secara langsung, kini memegang peranan krusial dalam meningkatkan efisiensi, keamanan, dan kenyamanan di berbagai sektor (Nise, 2020). Dasar-dasar sistem kendali otomatis melibatkan penggunaan sensor untuk mengumpulkan data, pengontrol yang memproses data tersebut dan membuat keputusan, dan aktuator yang melakukan tindakan yang diperlukan berdasarkan keputusan tersebut. Oleh karena itu, sistem kendali otomatis dapat mengoptimalkan proses operasi, meminimalkan kesalahan manusia dan meningkatkan produktivitas.

Dalam era Industri 4.0, implementasi sistem kendali otomatis telah melampaui batas-batas tradisional manufaktur dan merambah ke berbagai aspek kehidupan. Dari pabrik yang sepenuhnya terotomatisasi hingga rumah pintar yang dapat menyesuaikan suhu dan pencahayaan secara otomatis, sistem kendali otomatis telah menjadi komponen integral dalam arsitektur teknologi modern (Waidnet et al., 2015). Berbagai teknik dan metode telah dikembangkan untuk menerapkan sistem kendali otomatis, termasuk Kendali *Proportional-Integral-*

Derivative (PID), kendali *fuzzy*, kendali adaptif, dan Kendali Model Prediktif (MPC).

Makalah ini bertujuan untuk mengkaji literatur yang ada mengenai implementasi sistem kendali otomatis, dengan fokus pada konsep dasar, teknik dan metode yang digunakan, serta studi kasus yang relevan. Kajian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang komprehensif mengenai perkembangan terkini dalam bidang kendali otomatis dan mengidentifikasi tantangan serta peluang yang ada. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang prinsip dan praktik implementasi sistem kendali otomatis, diharapkan dapat mendorong adopsi teknologi ini secara lebih luas dan efektif, serta meningkatkan kualitas dan efisiensi di berbagai sektor.

2. Metodologi



Gambar 1. Tahapan Kajian Literatur

Kajian literatur bermanfaat untuk memperdalam pengetahuan mengenai kegunaan sistem kendali otomatis, mengetahui masalah terkait kinerja, mengetahui hasil penelitian dan perkembangan dari implementasi sistem kendali otomatis, serta mengetahui upaya perbaikan kinerja yang telah diterapkan berdasarkan analisis sistem kendali otomatis. Kajian literatur ini menggabungkan berbagai informasi mengenai sistem kendali otomatis, yang dapat

dipertimbangkan dalam memperbaiki kinerja berbagai perusahaan lain. Metode yang digunakan yaitu *Systematic Literature Review*, untuk mengidentifikasi dan menginterpretasikan hasil penelitian mengenai sistem kendali otomatis.

relevan berdasarkan identitas artikel dan hasil penelitian. (iv) Langkah keempat: Fokus beberapa aspek, yaitu mengelompokkan semua artikel kedalam beberapa aspek yaitu, fokus industri, fokus wilayah publikasi dan fokus tahun publikasi. (v) Langkah kelima: Analisis

Tabel 1. *State of The Art* (SoTA) Penelitian

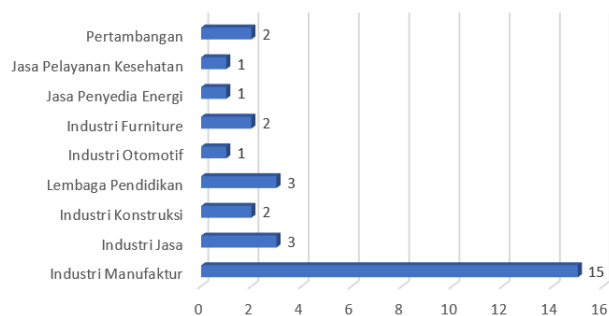
No	Penulis (Tahun)	Metode						Industri									
		PLC	Fuzzy	WSN	SCADA	Aumotic Control	Observasi dan Wawancara	Waterfall	Pertambangan	Furniture	Otomotif	Pendidikan	Konstruksi	Manufaktur	Jasa	Kesehatan	Energi
1	(Yanti & Armanto, 2023)						✓							✓			
2	(Hudori & Paisal, 2019)						✓			✓							
3	(Rahman et al., 2024)						✓							✓			
4	(Puspita et al., 2023)						✓									✓	
5	(Abdaoe et al., 2021)						✓				✓						
6	9Gunawan, 2015)						✓							✓			
7	(Tenggono et al., 2015)							✓									
8	(Ristian et al., 2022)							✓				✓					
9	(Fadly et al., 2020)							✓						✓			
10	(Haditana et al., 2020)					✓											
11	(Muntoha et al., 2022)					✓								✓			
12	(Ridwan et al., 2021)					✓								✓			
13	(Priyandha et al., 2023)		✓											✓			
14	(Akhwan et al., 2022)					✓			✓								
15	(Parkhoney et al., 2020)					✓							✓				
16	(Chelusz, Piotr 2021					✓			✓								
17	(Xie, 2018)					✓											✓
18	(Sadiku et al., 2019)			✓						✓					✓		
19	(Roal, 2015)				✓												
20	(Prasetyo et al., 2022)		✓											✓			
21	(Sheng et al., 2023)				✓												
22	(Maslennikov et al., 2018)				✓									✓		✓	
23	(Fazlollahabar, 2018)				✓												
24	(Huang, 2018)	✓													✓		
25	(Suparmin, 2022)						✓									✓	
26	(Rumalutur & Johannes, 2018)	✓															
27	(Tauladan & Fitri, 2017)						✓							✓			
28	(Anggoro et al., 2021)						✓										✓
29	(Jalaludin & Dewi, 2023)						✓			✓							
30	(Mahfud & Miftahul, 2023)						✓				✓						
31	(Hardana & Didik, 2022)						✓										
32	(Irfan & Rini, 2023)					✓					✓						
33	(Andri et al., 2022)						✓							✓			
34	(Lubis & Edi, 2020)					✓											
35	(Nasron et al., 2019)		✓							✓							

Gambar 1 menunjukkan tahapan kajian literatur yaitu: i) Langkah pertama Pengumpulan artikel dilakukan melalui database seperti Scopus, Google Scholar, dan IEEE Xplore dengan menggunakan kata kunci 'sistem kendali otomatis'. Kriteria pencarian mencakup artikel yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir serta relevan dengan implementasi sistem kendali otomatis di industri. (ii) Langkah kedua: Penyaringan, yaitu melakukan seleksi terhadap artikel yang relevan dengan topik berdasarkan beberapa kriteria, seperti kesesuaian dengan kata kunci utama, tahun publikasi dalam lima tahun terakhir, jurnal terindeks (Scopus atau Sinta), serta relevansi metodologi dengan penelitian yang dilakukan. (iii) Langkah ketiga: Rangkuman Artikel, yaitu merangkum semua artikel yang

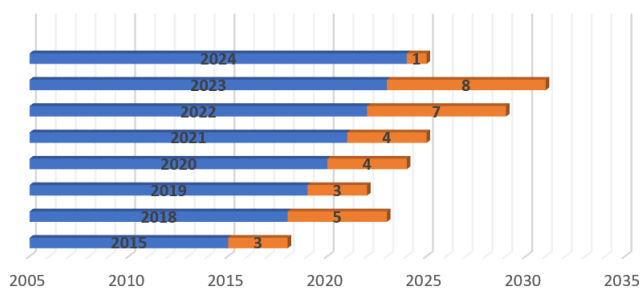
kegunaan, yaitu melakukan analisis terhadap manfaat dari setiap artikel.

3. Hasil dan Pembahasan

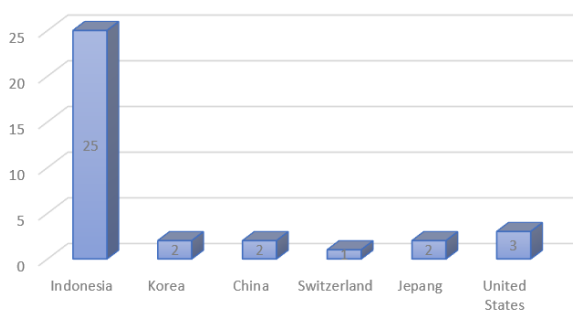
Kajian literatur ini mencakup berbagai penelitian yang menunjukkan hubungan signifikan dalam pengembangan sistem kendali otomatis berbasis teknologi terkini. Gambar 2 dan Gambar 3 masing-masing menunjukkan klusterisasi penelitian berdasarkan sektor industri dan klusterisasi berdasarkan tahun publikasi. Gambar 4 merupakan klusterisasi literatur berdasarkan asal negara. Berdasarkan klusterisasi di atas isi dari literatur yang dikaji dijabarkan sebagai berikut. Gambar 5 menunjukkan *bibliographic network visualization* terkait dengan hubungan antar masing-masing literatur.



Gambar 2. Klasterisasi berdasarkan sektor industri



Gambar 3. Klasterisasi berdasar tahun publikasi



Gambar 4. Klasterisasi berdasarkan negara

Penelitian yang dilakukan oleh Yanti (2023) merancang sistem kendali otomatis untuk rumah pintar berbasis IoT, yang berfokus pada penghematan energi. Penelitian ini membuka peluang untuk eksplorasi lebih lanjut dalam integrasi IoT ke dalam sistem lainnya. Hudori & Paisal (2019) juga meneliti pengendalian lampu otomatis menggunakan mikrokontroler dan aplikasi Android, yang menunjukkan efisiensi energi yang dapat dicapai, menciptakan dasar untuk penelitian lebih lanjut pada sistem kendali otomatis di perangkat rumah tangga lainnya.

Selanjutnya, Rahman et al. (2024), membangun sistem kendali otomatis lampu menggunakan sensor LDR dan Arduino,

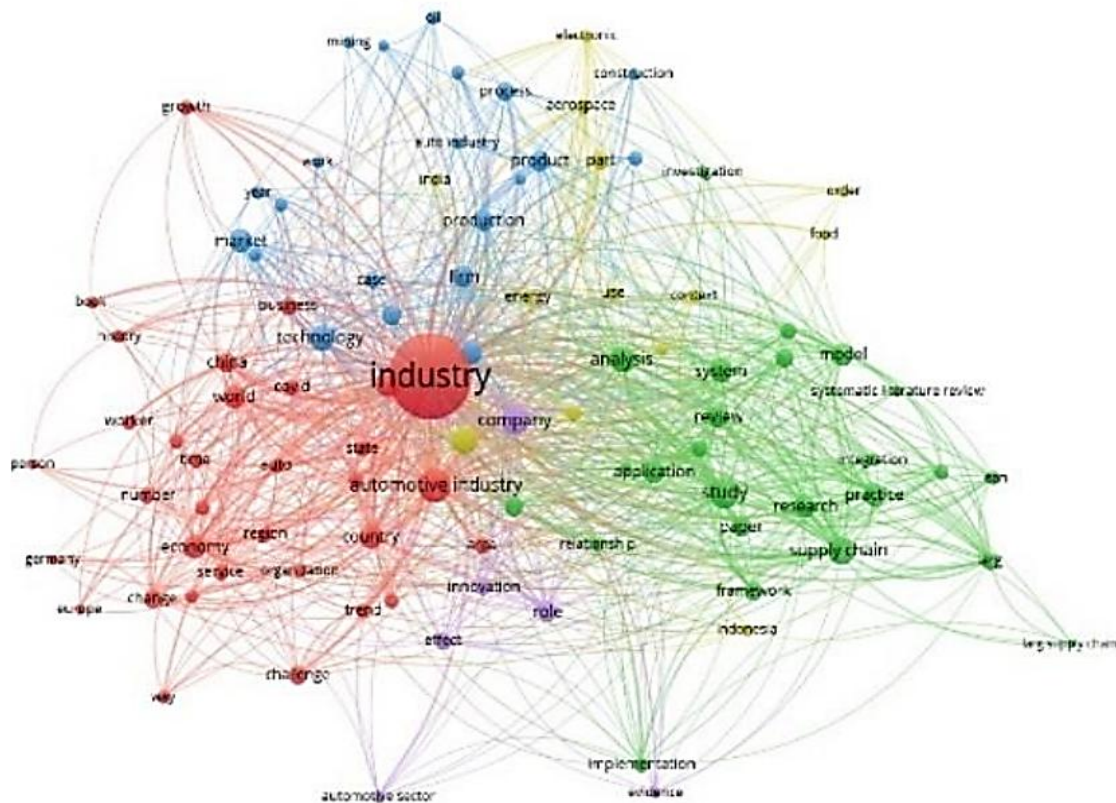
menyoroti pentingnya sensor dalam penghematan energi dan membuka jalur penelitian baru tentang sensor cerdas dalam aplikasi lain. Niken Puspita et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan LDR dan TDR dapat meningkatkan efisiensi pencahayaan, membuka peluang untuk pengembangan sistem serupa dalam konteks pertanian atau industri. Abdaoe et al. (2021) meneliti sistem kendali lampu otomatis berbasis IoT, yang menunjukkan potensi pengendalian perangkat elektronik di rumah dan mendorong penelitian lebih lanjut di skala industri.

Gunawan (2015), dan Tenggono et al. (2015) menyoroti pentingnya teknologi dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas di sektor industri dan pertanian, masing-masing, yang membuka jalan untuk penelitian lebih dalam tentang integrasi teknologi dalam aplikasi lain. Ristian et al. (2022), mengembangkan sistem Smart Greenhouse berbasis IoT yang dapat memonitor parameter tanaman, mendorong eksplorasi lebih lanjut tentang pengendalian lingkungan dalam pertanian.

Dalam konteks bisnis, Fadly et al. (2020), mengembangkan aplikasi monitoring penjualan yang menggunakan KPI, memberikan wawasan tentang pengelolaan bisnis yang efisien dan membuka peluang untuk penelitian lebih lanjut dalam pengukuran kinerja di sektor lain. Hadiatna et al. (2020), dan Muntoha et al. (2022), menunjukkan pentingnya sistem pengendali dalam menjaga kualitas dan efisiensi industri, yang dapat mendorong penelitian lebih lanjut dalam kontrol otomatis.

Sementara itu, penelitian oleh Ridwan & Sari (2021) pada sistem monitoring hidroponik berbasis IoT menunjukkan potensi teknologi untuk pengelolaan tanaman yang lebih baik, sedangkan Priyandha et al. (2023) menunjukkan penghematan energi dalam proses pengeringan pakaian. Penelitian oleh Akhawan & Andri (2022) tentang kontrol faktor daya menunjukkan potensi efisiensi energi di sektor industri.

Demikian pula, Parkhomey et al. (2020), dan Cheluszka (2021), menunjukkan bagaimana teknologi dapat meningkatkan efisiensi dalam proses industri, membuka peluang untuk



Gambar 5. *Bibliographic Network Visualization*

penelitian lebih lanjut dalam teknologi komunikasi dan pertambangan. Penelitian oleh Xie (2018), dan Sadiku et al. (2019) menekankan pentingnya pemilihan teknologi kontrol yang tepat untuk objek kompleks, serta penerapan teknologi WSN dalam pertanian presisi.

Roal (2015), dan Prasetyo et al. (2022), menunjukkan bagaimana teknologi dapat meningkatkan efisiensi energi dan kualitas udara, sementara Du et al. (2023), menyoroti relevansi teknologi AI dalam otomatisasi industri. Maslennikov et al. (2018), menyajikan penyetalan PID yang meningkatkan stabilitas sistem, sedangkan Fazlollahtabar (2018) menunjukkan efisiensi dalam perencanaan AGV.

Huanga et al. (2018), mengembangkan metode baru untuk desain pengamat interval, membuka peluang untuk penelitian lebih lanjut tentang kontrol sistem yang lebih kompleks. Suparmin et al. (2022), dan Rimalatur & Johannes

(2018), menunjukkan performa baik dalam sistem monitoring dan kendali otomatis, menciptakan peluang untuk penelitian lebih lanjut tentang efisiensi pencahayaan. Tauladan & Fitri (2017), serta Anggoro et al. (2021), menunjukkan inovasi dalam pengendalian lampu jalan dan sistem keamanan, masing-masing, yang dapat mendorong penelitian lebih lanjut mengenai otomatisasi. Akhirnya, Jalaludin & Dewi (2023), dan Mahfud & Miftahul (2023,) menunjukkan bagaimana teknologi dapat meningkatkan efisiensi dalam pertanian dan industri, membuka jalan untuk penerapan teknologi yang lebih canggih dalam berbagai bidang.

4. Kesimpulan

Hasil kajian literatur mengenai implementasi sistem kendali otomatis menunjukkan bahwa penerapan teknologi ini sangat berpengaruh

terhadap peningkatan efisiensi, keandalan, dan keselamatan dalam berbagai sektor industri. Sistem kendali otomatis memungkinkan pengurangan intervensi manusia, yang pada gilirannya mengurangi potensi kesalahan manusia dan meningkatkan konsistensi proses. Selain itu, teknologi ini dapat meningkatkan kemampuan untuk memonitor dan mengontrol proses secara real-time, yang berkontribusi pada optimalisasi operasional.

Di sektor manufaktur, implementasi sistem kendali otomatis berkontribusi terhadap peningkatan kualitas produk, pengurangan waktu siklus produksi, dan penurunan biaya operasional. Sistem ini memungkinkan monitoring dan kontrol proses secara real-time, sehingga memungkinkan deteksi dini terhadap anomali dan pengambilan tindakan korektif yang cepat. Selain itu, sistem kendali otomatis juga membantu dalam manajemen energi yang lebih efisien dan pengurangan limbah, yang berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan.

Selain itu, sistem kendali otomatis juga membantu dalam manajemen energi yang lebih efisien dan pengurangan limbah, yang berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan. Dalam sektor energi, sistem kendali otomatis memainkan peran penting dalam mengelola distribusi dan penggunaan energi secara efisien. Teknologi ini memungkinkan integrasi yang lebih baik antara sumber energi terbarukan dan konvensional, serta membantu dalam pengaturan beban yang optimal. Dalam transportasi, implementasi sistem kendali otomatis dapat meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional, seperti pada sistem transportasi pintar yang mengoptimalkan rute dan mengurangi kemacetan.

Sektor jasa, termasuk perbankan dan kesehatan, juga mendapatkan manfaat signifikan dari sistem kendali otomatis. Dalam perbankan, otomatisasi proses transaksi dan analisis data dapat meningkatkan akurasi dan kecepatan layanan, serta mengurangi risiko penipuan. Di bidang kesehatan, sistem kendali otomatis membantu dalam pengelolaan data pasien, otomatisasi proses diagnostik, dan pengaturan

peralatan medis, yang semuanya berkontribusi pada peningkatan kualitas pelayanan dan keselamatan pasien.

5. Saran

Untuk meningkatkan kinerja sistem kendali otomatis, diperlukan optimalisasi algoritma kontrol dengan menerapkan metode kecerdasan buatan atau pemodelan berbasis data guna meningkatkan akurasi dan responsivitas sistem. Selain itu, integrasi sensor cerdas dan analisis data real-time dapat menjadi solusi untuk meningkatkan efisiensi sistem serta mengurangi potensi kesalahan operasional. Penelitian lebih lanjut dapat difokuskan pada pengembangan metode prediksi kegagalan berbasis machine learning atau optimasi penggunaan energi dalam sistem kendali otomatis untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi jangka panjang. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai dampak jangka panjang dari implementasi sistem kendali otomatis, termasuk analisis ekonomi, sosial, dan lingkungan. Penelitian ini akan memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan kebijakan dan strategi yang lebih komprehensif.

Daftar Pustaka

- Abdaoe, F., Setiawan, H., Kom, M., & Perdana, K. S. T. (2021). Sistem Kendali Lampu Otomatis Berbasis Iot (Internet Of Things) Menggunakan Nodenum. *Bangkit Indonesia, IX*(01), 76-91.
- Akhwan, Pradipta, A., & Gunari, B. (2022). Rancang bangun simulator perbaikan faktor daya listrik 3 fasa dengan sistem kendali otomatis. *Jurnal Arus Elektro Indonesia (JAEI). Jurnal Arus Elektro Indonesia, [S.l.]*, v. 8, n. 3, p. 77-81, dec. 2022. ISSN 2443-2318.
<https://jurnal.unej.ac.id/index.php/EJAEI/article/view/34494>.
- Bakti Muntoha, G., Erna Wati, I., & Septian Wijaya, M. (2022). Perancangan Sistem Instrumentasi dan Kontrol Berbasis Super PLC F2424 serta Antarmuka LabVIEW. *JuLIET*, 3(2), 61-65.
- Cheluszka, P. (2021). Numerical studies of the

- dynamics of the roadheader equipped with an automatic control system during cutting of rocks with different mechanical properties. *Energies*, 14(21), 1-29. <https://doi.org/10.3390/en14217353>.
- Du, S., Wang, W., Fu, H., & Wan, X. (2023). Fault Detection and State Estimation in Automatic Control. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(23), 12936. <https://doi.org/10.3390/app132312936>.
- Fazlollahtabar, H. (2018). Risk-Based Minimum Cost Flow Model for AGVs Path Planning. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 10(1), 1-7. <https://doi.org/10.2174/187444430181001001>.
- Fadly, M., Muryana, D. R., & Priandika, A. T. (2020). Sistem monitoring penjualan bahan bangunan menggunakan pendekatan key performance indicator. *Journal of Social and Technology for Community Service (JSTCS)*, 1(1), 1-32. Universitas Teknokrat Indonesia. <https://ejurnal.teknokrat.ac.id/index.php/teknobdimass>.
- Gunawan, M. I. (2015). Sistem Kendali Otomatis pada Mesin-Mesin Industri untuk Peningkatan Efektivitas dan Efisiensi Kerja. *Jurnal TEDC, [S.l.]*, v. 9, n. 2, p. 110-116, sep. 2019. ISSN 2776-723X. Available at: <https://ejournal.poltektedc.ac.id/index.php/tedc/article/view/251>
- Hadiatna, F., Dzulfahmi, A., & Nataliana, D. (2020). Analisis Penerapan Kendali Otomatis berbasis PID terhadap pH Larutan. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 8(1), 163-177. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v8i1.163>.
- Hera Yanti, M. (2023). Sistem Kendali Otomatis Rumah Pintar Berbasis IoT Menggunakan Android. *Journal of Bina Insan University*, 2(1), 116-1121.
- Huanga, J., Maa, X., & Yina, G. (2018). Interval Observer Design for Discrete-Time Switched Systems by Linear Programming Method. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 10(1), 15-24. <https://doi.org/10.2174/1874444301810010015>.
- Hudori, M., & Paisal, Y. (2019). Perancangan Sistem Kendali Otomatis Lampu Penerangan pada Rumah Tinggal untuk Meningkatkan Efisiensi Pemakaian Listrik Abstrak. In *Industrial Engineering Journal* 8(1), 10-15.
- Maslennikov, V. V., Meshcheryakov, V. V., & Dovgopolaya, E. A. (2018). Conditions for Ensuring Aperiodic Transients in Automatic Control Systems with a PID Controller. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 10(1), 9-14..
- Niken Puspita, P., Syamsu, M., & Terisia, V. (2023). Perancangan Lampu Otomatis Menggunakan Sensor Cahaya dan Timer Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Teknologi Informasi (JUTECH)*, 4(1), 42-49. <https://doi.org/10.32546/jutech.v4i1.2348>.
- Parkhomey, I., Boiko, J., Tsopa, N., Zeniv, I., & Eromenko, O. (2020). Assessment of quality indicators of the automatic control system influence of accident interference. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 18(4), 2070-2079.
- Priyandha, H., Ana, D., & Wati, R. (n.d.). Perancangan Prototipe Sistem Kendali Otomatis Pada Pengereng Pakaian Berbasis Air Heater. *Journal Of Electrical and Electronics Engineering*. 1(23), 71-78.
- Rahman, R. A., Nurdiawan, O., Dikananda, A. R., No, J. P., Karyamulya, B., Kota, K., Jawa, C., & Indonesia, B. (2024). Penerapan Kendali Sistem Otomatis pada Lampu Halaman Asrama Menggunakan Arduino pada Pondok Pesantren Al-Ma'rifah. *Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika*. 8 (1), 645-652.
- Ridwan, M., & Sari, K. M. (2021). Penerapan IoT dalam Sistem Otomatisasi Kontrol Suhu, Kelembaban, dan Tingkat Keasaman

- Hidroponik. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 10(4), 481. <https://doi.org/10.23960/jtep-l.v10i4.481-487>.
- Ristian, U., Ruslianto, I., Sari, K., & Hadari Nawawi, J. (2022). Sistem Monitoring Smart Greenhouse pada Lahan Terbatas Berbasis Internet of Things (IoT). *JEPIN (Jurnal Edukasi dan Penelitian Informatika)*. 8(1), 87-94.
- Roal, M. (2015). Peningkatan Efisiensi Energi Menggunakan Baterai Dengan Kendali Otomatis Penerangan Ruang Kelas Berbasis PLTS. *Jurnal ELKHA*, 7(2), 12-18.
- Sadiku, M. N. O., Patel, K. K., Musa, S. M., & Perry, R. G. (2019). Wireless Sensor Network in Agriculture: A Primer. In *International Journal of Trend in Research and Development*. 6(5), 4-6. www.ijtrd.com.
- Saragih, Y., Welly Sirait, P., Waluyo, P., & Elektro Universitas Mitra Karya, T. (2022). Perancangan Sistem Kendali Otomatis Smart Home Berbasis Android Menggunakan Teknologi WiFi (ESP32) dan Arduino Uno. *Jurnal Teknovasi*, 09(02), 45-54.
- Sistem, J., & Tgd, K. (2022). *Sistem Kendali Otomatis Monitoring Dan Controlling Menggunakan Metode Fuzzy Berbasis NodeMCU*. 1(4), 126–136. <https://ojs.trigunadharma.ac.id/index.php/jskom>.
- Tenggono, A., Wijaya, Y., Kusuma, E., & Welly. (2015). Sistem monitoring dan peringatan ketinggian air berbasis web dan SMS gateway. *Jurnal Ilmiah SISFOTENIKA STMIK PalComTech, Palembang*. 5(2). 119-129.
- Xie, K. (2018). Research on the Application of Automatic Control System in Mechanical Engineering. *Journal Of Advances in Computer Science Research*, 78 (1), 79-82. [10.2991/iwmecs-18.2018.17](https://doi.org/10.2991/iwmecs-18.2018.17).

Designing Risk Control Strategies Using HIRARC-Based Risk Management to Comply Occupational Health and Safety Management System Standards in Manufacturing Activities

Auldy Setia Mahendra¹⁾, Irwan Iftadi²⁾

*Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Sebelas Maret University
Jl. Ir. Sutami No. 36 A, Surakarta, 57126, Indonesia^{1),2)}
E-Mail : auldysetiamahendra99@gmail.com^{1)*}, irwaniftadi@staff.uns.ac.id²⁾*

ABSTRACT

Occupational Health and Safety (OHS) is crucial for protecting workers from accidents and work-related illnesses. In the manufacturing area of PT. XYZ, several OHS issues have been identified, including operator non-compliance with OHS Management System regulations, the absence of hazard identification and risk assessment, and low operator awareness of workplace safety. This study aims to analyze potential hazards, assess associated risk levels, and design appropriate control strategies using the Hazard Identification, Risk Assessment, and Risk Control (HIRARC) method, which is widely applied in OHS implementation. Hazard identification was carried out using the STOP 6 approach and five factors: man, machine, material, method, and environment. Risk assessment was conducted by determining likelihood and severity values, resulting in risk levels ranging from extreme to low. Risk control strategies were formulated based on the Hierarchy of Control. The results show that 43.48% of identified risks are in the high-risk category, followed by medium (30.43%), low (19.57%), and extreme (6.52%). Recommended control strategies include eliminating or substituting hazards, such as relocating hazardous materials and using CNC machines. Additional measures include the development of SOPs, work instructions, safety signs, and ensuring the proper use of personal protective equipment (PPE) according to applicable standards.

Keywords: Occupational Health and Safety (OHS), Occupational Health and Safety Management System, Hazard Identification, Risk Assessment, Risk Control.

1. Introduction

Occupational Health and Safety (OHS) is crucial in creating a safe and healthy work environment (Hartati et al., 2024). Occupational health is defined as a condition free from physical or psychological disturbances caused by workplace environmental factors (Soesanto et al., 2023). Meanwhile, occupational safety involves measures to prevent accidents, injuries, and undesirable incidents in the workplace (Sarbiah, 2023).

Optimal implementation of OHS can minimize the likelihood of workplace accidents, ensuring that work processes run smoothly without disruptions (Fitri, 2020).

Every work and activity had potential hazards and risks, requiring preventive and control measures to avoid accidents (Elviana et al., 2021). Meanwhile, the goal of OHS is to achieve zero accidents (Cintya et al, 2021).

PT. XYZ is an integrated area that functions as a center for innovation and technology development. In the manufacturing area, the implementation of a good Occupational Health and Safety Management System is crucial to protect operators from various risks associated with activities, such as milling, turning, cutting, benchworking, welding, and CNC. Each activity presents different potential hazards (Putra, 2021).

**Corresponding author*

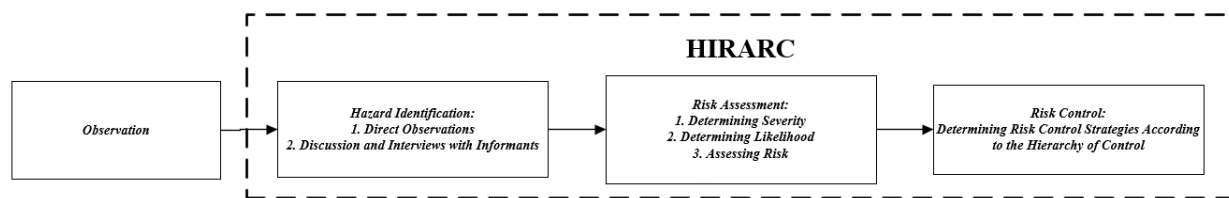


Figure 1. Research Framework

Based on interview results, workplace accidents involving operators frequently occur due to negligence and lack of focus during activities. Operators sustain injuries and cuts from workpieces. Understanding of OHS standards has not been properly implemented, as many operators still fail to wear personal protective equipment (PPE) according to procedures, and the placement of materials and waste is not well organized. A well-implemented OHSMS would not only benefit company but also provide a sense of comfort and safety for operators performing activities.

Based on the problem, various methods can be employed to identify and assess risks, such as Job Safety Analysis (JSA), Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), What-If Analysis, Hazard Identification, Risk Assessment, and Risk Control (HIRARC). However, HIRARC is the most commonly used method for implementing an OHS management system as it simplifies the process into three core stages: hazard identification, risk assessment based on likelihood and potential impact, and determination of control measures according to the hierarchy of controls (Lubis, Sihombing, & Yanto, 2024).

The study conducted by Saragih and Fitriani (2024) highlights the importance of HIRARC in addressing issues within the manufacturing production area. Meanwhile, research by Anwar et al. (2024) shows that the use of the HIRARC method can prevent workplace accidents in machining workshop areas, thus strengthening the implementation of OHS. Therefore, the HIRARC method can be chosen to comply with the OHS management system.

By applying the HIRARC method, PT. XYZ can identify risk sources, assess their impacts, evaluate risks, and design appropriate

OHS risk control strategies to reduce the occurrence of workplace accidents. Structured OHS risk control strategies through the HIRARC method can significantly impact ensuring operators' protection and comfort during their work activities.

2. Methodology

This study used two types of data: primary and secondary. The primary data used in this study were obtained through interviews, observations, and discussions with informants such as OHS stakeholders and operators. Meanwhile, the secondary data used is a literature review on regulations such as OHSAS, ISO, government regulations, and laws related to OHS.

The method used in this study is the HIRARC method as shown in Figure 1. HIRARC (Hazard Identification, Risk Assessment, and Risk Control) is a series of processes to identify potential hazards arising from routine and non-routine activities within a company, assess the resulting risk levels, and develop control measures to reduce those risks. The ultimate goal is to prevent workplace accidents. This research was conducted in the manufacturing area, analyzing all activities such as benchworking, cutting, welding, milling, turning, and CNC operations.

The first step is hazard identification. Hazard identification is essential for companies to implement because it helps understand the sources of hazards in each work activity. The hazard identification process aims to determine the potential risks associated with each activity using 5 factors (man, machine, material, method, environment) and the STOP 6 safety category. STOP (Safety Toyota Zero Accident Project) 6, as shown in Table 1, is an effort to prevent

workplace accidents. It helps simplify hazard identification by segmenting potential hazards into specific categories (Nursitasari, 2019). These two steps are essential for deepening hazard analysis and classifying incidents based on various factors and their impacts across multiple categories.

Next, the risks of the identified hazards are assessed. According to Burhanudin et al. (2024), risk assessment is a procedure used to identify potential hazards that may occur. Risk assessment is carried out based on ISO 31010:2019, an international standard that provides technical guidance on various risk assessment techniques. In the context of ISO 45001:2018 on OHS management systems, ISO 31010:2019 supports clause 6, which requires organizations to identify hazards and assess risks and opportunities.

The assessment refers to ISO 31010:2019, which includes criteria for

likelihood, severity, and risk levels presented in the form of a matrix as shown in Table 2 and Table 3.

Table 1. STOP 6

Category	Description
A (Apparatus)	Potential for being pinched, struck, cut, scratched, etc.
B (Big Heavy)	Potential for heavy objects falling
C (Car)	Potential for being hit by vehicles (forklift, hand pallet, truck, etc.)
D (Drop)	Potential for falling from heights
E (Electric)	Potential electrical hazards
F (Fire)	Potential for fire hazards
O (Other)	Potential for chemical, biological, environmental hazards, etc. (other A-F)

Source: Nursitasari (2019)

Table 2. Likelihood Criteria

Level	Overview	Explanation	Note
5	Almost Certain	Can occur at any time or very frequently	Occurs once a week
4	Likely	Occurs frequently	Occurs twice a month
3	Possible	May occur several times	Occurs once every 6 months
2	Unlikely	Rarely occurs	Occurs once a year
1	Rare	Rarely or never occurs	Occurs 0 times in a year

Source: Risk Assessment Techniques ISO 31010 (2019)

Table 3. Severity Criteria

Level	Overview	Note
5	Catastrophic	- Incidents resulting in fatalities - Material losses exceeding Rp20,000,000.
4	Major	- Incidents resulting in permanent disabilities. - Medical treatment costs greater than Rp10,000,000. - Work time lost for more than three days. - Material losses ranging from Rp5,000,000 to Rp20,000,000.
3	Moderate	- External medical treatment under Rp1,000,000 without permanent disability. - Work time lost between one and three days. - Material losses ranging from Rp100,000 to Rp5,000,000.
2	Minor	- Minor treatment onsite, delayed return to work. - Work time lost less than 24 hours. - Material losses below Rp100,000.
1	Insignification	- Minor treatment onsite, immediate return to work. - No work time lost and material damage.

Source: Risk Assessment Techniques ISO 31010 (2019)

Then, the risk matrix level is determined based on severity and likelihood as shown in

Table 4. Risk matrix level refers to the risk management standard ISO 31010:2019. The

determined risk values are then used to establish a priority scale for action, ensuring that hazard management can be addressed through effective measures.

Table 4. Risk Matrix Level

Like- lihood	Severity				
	1	2	3	4	5
5	H	H	E	E	E
4	M	H	H	E	E
3	L	M	H	E	E
2	L	L	M	H	E
1	L	L	M	H	H

Source: Risk Assessment Techniques ISO 31010 (2019)

The assessed risk values are subsequently utilized to establish a priority scale for actions, ensuring that hazard management is conducted through effective and targeted measures. Table 5 shows the action risk matrix.

Table 5. Action Risk Matrix

Category	Action
Extreme	Extreme risk requires immediate action or intervention.
High	High risk demands the attention of top management.
Medium	Moderate risk requires designated management responsibility to set target timelines for further actions.
Low	Low risk can be managed through routine procedures to ensure conditions remain safe.

Source: Risk Assessment Techniques ISO 31010 (2019)

After that, evaluation serves as a basis for determining the appropriate risk control strategies to reduce workplace accidents. The risk control strategies follow the Hierarchy of Control as shown in Figure 2 to ensure proper management of each activity requiring control.

The Hierarchy of Control (HoC) has received increasing attention recently and has

been recommended by national occupational health and safety agencies in Australia, Canada, Denmark, and the United States. This hierarchy typically leads to the implementation of much safer structures, where the risk of injury or illness is greatly minimized (Gonawan & Othman, 2022). The process prioritizes hazard elimination and, as a last resort, relies on the use of personal protective equipment (PPE).

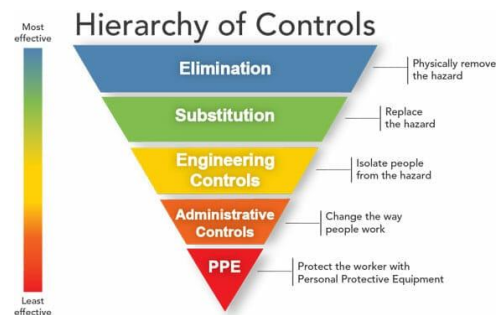


Figure 2. Hierarchy of Control

3. Results and Discussion

HIRARC is one of the mandatory requirements for the implementation of the Occupational Health and Safety Management System (OHSMS) based on the OHSAS 18001:2007 standard. The purpose of HIRARC is to identify potential hazards and assess operational capabilities in each process that may be disrupted due to deviations from the design objectives within the plant (Giananta et al., 2020).

The HIRARC method is divided into three stages: hazard identification, risk assessment, and risk control (Setiawan et al., 2024). The following presents the results of observations conducted in the manufacturing area.

3.1. Hazard Identification

Based on the observations conducted, the identified hazards in the manufacturing are shown in Table 6.

Table 6. Hazard Identification

Activity	Factor	Potential Hazard	STOP 6	Hazard Risk
Benchworking	Man	Operator negligence and lack of concentration	A	Injured, scratched, and pinched.

Designing Risk Control Strategies Using HIRARC-Based Risk Management to Comply Occupational Health and Safety Management System Standards in Manufacturing Activities

Activity	Factor	Potential Hazard	STOP 6	Hazard Risk
Cutting	Machine	Vise on benchwork	A	Pinched
	Material	Falling material	B	Foot injury
		Material dust	A	Eye irritation
		Sharp workpiece surface	A	Injured
	Methods	Sparks contacting the body	F	Injured or burned
		Uncomfortable working posture	O	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders
	Environ-ment	Noise from grinding machines	O	Hearing impairment
		Poor air circulation and high temperatures	O	Dehydration and heat related illness
	Man	Operator negligence and lack of concentration	A	Injured, scratched, or cut
	Machine	Sharp saw blade	A	Injured, scratched, or cut
Welding		Vise on the machine	A	Pinched
	Material	Heavy and long material	B	Foot injury
	Methods	Uncomfortable working posture	O	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders
	Environ-ment	Noise from the machine	O	Hearing impairment
	Man	Operator negligence and lack of concentration	A	Injured, blindness
	Machine	Overheating of the welding machine	F	Fire or explosion
		Damaged welding machine cables or connectors	E, F	Electric shock or short circuit
	Material	Incorrect use of electrodes or welding wire	E, F	Electric shock, burns
	Methods	Improper welding parameters	F	Sparks causing fire
		Uncomfortable working posture	O	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders
Milling	Environ-ment	High temperatures	O	Dehydration and heat related illness
		Welding fumes	F	Respiratory issues
	Man	Operator negligence and lack of concentration	A	Injured, scratched, or cut
	Machine	Sharp end mill	A	Injured or slashed
	Material	Falling material	B	Foot injury
		Material dust	A	Respiratory issues
		Spilled oil and coolant	O	Slipping and skin irritation
	Methods	Uncomfortable working posture	O	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders
	Environ-ment	Noise from the machine	O	Hearing impairment
	Man	Operator negligence and lack of concentration	A	Injured, scratched, or cut
Turning	Machine	Exposed cables	E, F	Electric shock, or fire
		Entanglement machine	A	Injured
	Material	Falling material	B	Foot injury
		Material dust	A	Respiratory issues
		Spilled oil and coolant	O	Slipping and skin irritation
	Methods	Uncomfortable working posture	O	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders

Activity	Factor	Potential Hazard	STOP 6	Hazard Risk
CNC	Environ-ment	Noise from the machine	O	Hearing impairment
	Man	Operator negligence and lack of concentration	A	Injured, scratched, or cut
	Machine	Pinched by chuck	A	Injured
		Sharp cutting tools	A	Cut
	Material	Falling material	B	Foot injury
		Spilled oil and coolant with placed near the machine	O	Slipping and skin irritation
	Methods	Long waiting times	O	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders
	Environ-ment	Noise from the machine	O	Hearing impairment
		Poor air circulation	O	Dehydration and heat related illness

3.2. Risk Assessment

After hazard identification, a risk assessment was conducted to determine the

appropriate control strategies to reduce the risk of workplace accidents. The results of the risk assessment are shown in Table 7.

Table 7. Risk Assessment

Activity	Potential Hazard	Hazard Risk	L	S	Score	Category
Benchworking	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, and pinched.	3	3	9	High
	Vise on benchwork	Pinched	3	2	6	Medium
	Falling material	Foot injury	3	2	6	Medium
	Material dust	Eye irritation	2	2	4	Low
	Sharp workpiece surface	Injured	2	2	4	Low
	Sparks contacting the body	Injured or burned	3	2	6	Medium
	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	4	2	8	High
	Noise from grinding machines	Hearing impairment	3	3	9	High
	Poor air circulation and high temperatures	Dehydration and heat related illness	3	2	6	Medium
Cutting	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, or cut	3	3	9	High
	Sharp saw blade	Injured, scratched, or cut	1	3	3	Low
	Vise on the machine	Pinched	2	3	6	Medium
	Heavy and long material	Foot injury	3	2	6	Medium
	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	4	2	8	High
	Noise from the machine	Hearing impairment	3	3	9	High
Welding	Operator negligence and lack of concentration	Injured, blindness	3	3	9	High
	Overheating of the welding machine	Fire or explosion	2	4	8	High
	Damaged welding machine cables or connectors	Electric shock or short circuit	2	4	8	High
	Incorrect use of electrodes or welding wire	Electric shock, burns	2	3	6	Medium
	Improper welding parameters	Sparks causing fire	2	3	6	Medium
	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	4	2	8	High
	High temperatures	Dehydration and heat related illness	2	3	6	Medium

Designing Risk Control Strategies Using HIRARC-Based Risk Management to Comply Occupational Health and Safety Management System Standards in Manufacturing Activities

Activity	Potential Hazard	Hazard Risk	L	S	Score	Category
Milling	Welding fumes	Respiratory issues	2	3	6	Medium
	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, or cut	3	3	9	High
	Sharp end mill	Injured or slashed	2	3	6	Medium
	Falling material	Foot injury	3	2	6	Medium
	Material dust	Respiratory issues	2	2	4	Low
	Spilled oil and coolant	Slipping and skin irritation	4	3	12	Extreme
Turning	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	4	2	8	High
	Noise from the machine	Hearing impairment	3	3	9	High
	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, or cut	3	3	9	High
	Exposed cables	Electric shock, or fire	2	4	8	High
	Entanglement machine	Injured	1	3	3	Low
	Falling material	Foot injury	3	2	6	Medium
	Material dust	Respiratory issues	2	2	4	Low
	Spilled oil and coolant	Slipping and skin irritation	4	3	12	Extreme
CNC	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	4	2	8	High
	Noise from the machine	Hearing impairment	3	3	9	High
	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, or cut	3	3	9	High
	Pinched by chuck	Injured	1	2	2	Low
	Sharp cutting tools	Cut	1	3	3	Low
	Falling material	Foot injury	2	2	4	Low
	Spilled oil and coolant with placed near the machine	Slipping and skin irritation	4	3	12	Extreme
	Long waiting times	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	4	2	6	High
	Noise from the machine	Hearing impairment	3	3	9	High
	Poor air circulation	Dehydration and heat related illness	3	2	6	Medium

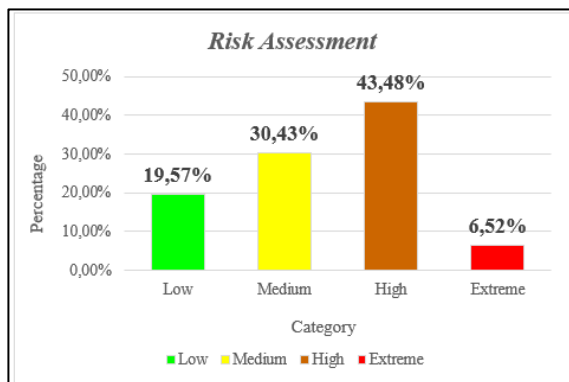


Figure 3. Risk Assessment Chart

Based on the risk assessment chart as shown in Figure 3, the distribution of risks tends to concentrate in the high-risk category. Approximately 43.48% of the total risks fall

into this category, indicating that nearly half of the identified hazards pose significant risks and require immediate control measures. This high proportion is largely due to unsafe operator behavior, damaged equipment, and poor environmental conditions. Medium-risk hazards (30.43%) are mostly linked to equipment design and material handling and need structured management. Low-risk hazards (19.57%) are relatively safer but still need regular monitoring, especially where PPE use is lacking.

Although extreme risks account for only 6.52%, they involve serious dangers such as chemical exposure and slippery surfaces near machines. These must be addressed quickly to avoid severe accidents. In general, the results

highlight the need to prioritize risk control through appropriate strategies to comply with OHS management system standards in manufacturing area.

3.3. Risk Control

Table 8 presents the risk control strategies for each identified potential hazard.

Table 8. Risk Control

Activity	Potential Hazard	Hazard Risk	Category	HoC
Benchworking	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, and pinched.	High	Administration Control & PPE
	Vise on benchwork	Pinched	Medium	Administration Control & PPE
	Falling material	Foot injury	Medium	Administration Control & PPE
	Material dust	Eye irritation	Low	Administration Control & PPE
	Sharp workpiece surface	Injured	Low	Administration Control & PPE
	Sparks contacting the body	Injured or burned	Medium	Administration Control & PPE
	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	High	Engineering Control. Administration Control & PPE
	Noise from grinding machines	Hearing impairment	High	Engineering Control & PPE
	Poor air circulation and high temperatures	Dehydration and heat related illness	Medium	Engineering Control & PPE
	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, or cut	High	Administration Control & PPE
Cutting	Sharp saw blade	Injured, scratched, or cut	Low	Administration Control & PPE
	Vise on the machine	Pinched	Medium	Administration Control & PPE
	Heavy and long material	Foot injury	Medium	Administration Control & PPE
	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	High	Engineering Control. Administration Control & PPE
	Noise from the machine	Hearing impairment	High	Engineering Control & PPE
	Operator negligence and lack of concentration	Injured, blindness	High	Administration Control & PPE
Welding	Overheating of the welding machine	Fire or explosion	High	Administration Control & PPE
	Damaged welding machine cables or connectors	Electric shock or short circuit	High	Substitution, Administration Control & PPE
	Incorrect use of electrodes or welding wire	Electric shock, burns	Medium	Administration Control & PPE
	Improper welding parameters	Sparks causing fire	Medium	Administration Control & PPE
	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	High	Engineering Control & PPE
	High temperatures	Dehydration and heat related illness	Medium	Engineering Control & PPE

Designing Risk Control Strategies Using HIRARC-Based Risk Management to Comply Occupational Health and Safety Management System Standards in Manufacturing Activities

Activity	Potential Hazard	Hazard Risk	Category	HoC
Milling	Welding fumes	Respiratory issues	Medium	Administration Control & PPE
	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, or cut	High	Administration Control & PPE
	Sharp end mill	Injured or slashed	Medium	Administration Control & PPE
	Falling material	Foot injury	Medium	Administration Control & PPE
	Material dust	Respiratory issues	Low	Administration Control & PPE
	Spilled oil and coolant	Slipping and skin irritation	Extreme	Elimination, Administration Control & PPE
	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	High	Engineering Control. Administration Control & PPE
	Noise from the machine	Hearing impairment	High	Engineering Control & PPE
Turning	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, or cut	High	Administration Control & PPE
	Exposed cables	Electric shock, or fire	High	Administration Control & PPE
	Entanglement machine	Injured	Low	Administration Control & PPE
	Falling material	Foot injury	Medium	Administration Control & PPE
	Material dust	Respiratory issues	Low	Administration Control & PPE
	Spilled oil and coolant	Slipping and skin irritation	Extreme	Elimination, Administration Control & PPE
	Uncomfortable working posture	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	High	Engineering Control. Administration Control & PPE
	Noise from the machine	Hearing impairment	High	Engineering Control & PPE
CNC	Operator negligence and lack of concentration	Injured, scratched, or cut	High	Administration Control & PPE
	Pinched by chuck	Injured	Low	Administration Control & PPE
	Sharp cutting tools	Cut	Low	Administration Control & PPE
	Falling material	Foot injury	Low	Administration Control & PPE
	Spilled oil and coolant with placed near the machine	Slipping and skin irritation	Extreme	Elimination, Administration Control & PPE
	Long waiting times	Muscle fatigue and musculoskeletal disorders	High	Engineering Control. Administration Control & PPE
	Noise from the machine	Hearing impairment	High	Engineering Control & PPE

Activity	Potential Hazard	Hazard Risk	Category	HoC
	Poor air circulation	Dehydration and heat related illness	Medium	Engineering Control & PPE

a. Elimination

- Safe Arrangement for Hazardous and Toxic Materials (B3)

Oil, coolant, grease, and diesel used in operations pose fire, health, and environmental risks. Storing oil and coolant near machines must be eliminated to prevent accidents.

Material Safety Data Sheets (MSDS) should be provided to inform operators about chemical hazards and precautions. According to Government Regulation Indonesia No. 74/2001, B3 materials must be stored separately from work areas, away from fire sources, with proper ventilation and precise labeling to ensure safe handling and reduce contamination risks.

b. Substitution

- Replacement of Broken Parts and Preventive Maintenance

Replacing broken parts with standard-compliant components is essential to prevent serious hazards like electric shock or fire. Preventive maintenance document helps detect machine issues early, allowing immediate repairs or shutdowns to reduce accident risks.

- Replacing Manual Milling and Turning Machines with CNC Machines

Switching to CNC machines improves safety and accuracy by reducing direct operator-machine interaction and minimizing human errors. CNC operations are more precise and consistent and carry lower injury risks than manual machining. This is a positive step toward preventing hazardous risks that may lead to workplace accidents.

c. Engineering Control

- Provision of Ergonomic Chair

The provision of ergonomic chairs aims to improve operator comfort, especially for those working long hours. Designed based on ergonomic principles, these chairs support balanced posture, distribute body weight evenly, and reduce excessive strain on the spine and joints. It helps minimize the risk of

musculoskeletal disorders commonly experienced by operators.

- Regular Noise Level Monitoring

Periodic noise measurements are essential to control hearing risks, especially when levels exceed 85 dBA. Based on Government Regulation Indonesia No. 50/2012, protective measures like earplugs, earmuffs, or work time adjustments must be implemented to ensure worker safety and regulatory compliance.

d. Administrative Control

- Development of SOPs, Work Instructions, and Safety Signs

Standard Operating Procedure (SOP) is critical to maintaining quality, safety, and efficiency by providing structured guidelines for operators to perform tasks consistently and in compliance with regulations. Clear Work Instruction further detail specific steps to complete tasks safely and correctly, minimizing human errors and operational risks.



Figure 4. Safety Signs

Safety signs, as shown in Figure 4, designed based on ANSI Z535 standards are vital to warn and inform operators and visitors about workplace hazards. These include signs for pinch hazards, fire risks, hazardous materials, and high noise areas.

- Optimization of 5R Culture and OHS Training:

Optimization of the 5R culture and implementation of regular OHS training programs are essential to create a clean, organized, and safe workplace while ensuring workers are prepared for hazard prevention and emergency response.

e. PPE

Proper use of PPE, such as wearpacks, safety glasses, masks, gloves, safety shoes,

and hearing protection minimizes workplace injury risks and safeguards operator health.

4. Conclusion

Based on the results, the implementation of the HIRARC method in the manufacturing area of PT. XYZ has proven effective in identifying potential hazards using the STOP 6 approach and five factors, assessing risk levels, and designing structured risk control strategies. The risk assessment showed that 43.48% of hazards fall into the high-risk category, followed by medium (30.43%), low (19.57%), and extreme (6.52%). These risks are primarily caused by unsafe behavior, poor working conditions, and inadequate equipment. The control strategies were developed based on the hierarchy of control, including hazard elimination, substitution of manual machines with CNC machines, technical improvements such as noise reduction and ergonomic enhancements, as well as administrative measures and proper use of personal protective equipment (PPE).

This approach aligns with the requirements of the OHS Management System standard ISO 45001:2018, particularly in risk control and continuous improvement. Accordingly, it is recommended that operators improve their discipline in following safety procedures, using PPE correctly, and reporting potential hazards. The company is also advised to develop and implement a sustainable safety program to foster a strong safety culture and ensure full compliance with ISO 45001:2018 standards.

Bibliography

Burhanudin, B., Budiman, R., Rafiz, M., & Robandi, F. R. (2024). Risk Hazard Identification Using the HIRARC Method in The Construction of The KAI Boutique Hotel Cihampelas Building Bandung. *Journal of World Science*. 3(12), 1634-1647.

Cintya, D., Keke, Y., & Sodikin, A. (2021). Pelaksanaan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Terhadap Upaya Zero Accident. *Jurnal Manajemen Bisnis*

Transportasi dan Logistik (JMBTL), 7 (1), 45-51.

Eleviana., Latif, A., & Yudistira. (2021). Identifikasi Bahaya dan Penilaian Resiko di Laboratorium Pasca Cetak Politeknik Negeri Media Kreatif. *Kreator: Jurnal Politeknik Negeri Media Kreatif*, 8(2), 113-120.

Fitri, F, A., & Rahayu G. (2020). Penentuan Alternatif Pilihan Strategi Mitigasi Riisiko Kecelakaan Kerja Dengan Metode ANP di PT XYZ. *Jurnal Rekayasa dan Optimasi Sistem Industri*. (2)2, 44-50.

Giananta, P., Hutabarat, J., & Soemanto. (2020). Analisa Potensi Bahaya Dan Perbaikan Sistem Keselamatan dan Kesehatan Kerja Menggunakan Metode HIRARC di PT. Boma Bisma Indra. *Jurnal Valtech*, 3(2), 106-110.

Gonawan, S, A., & Othman, S, A. (2022). Workplace Safety Based on the Hierarchy of Control. *Enhanced Knowledge in Sciences and Technology*, 2(1), 79-83.

Government of Indonesia. (2012). Government Regulation No. 50: Implementation of the Occupational Health and Safety Management System (SMK3). State Secretariat. Jakarta.

Government of Indonesia. (2001). Government Regulation No. 74: Management of Hazardous and Toxic Materials. State Secretariat. Jakarta.

Hartati, S., Nurdin, I., & Galeria, B. (2024). Implementation Of Occupational Safety and Health (OSH) in Preventing Employee Work Accidents at The Regional Disaster Management Agency (BPBD) Purworejo Regency. *Cosmogov: Journal of Government Science*.10(1), 99-114.

International Organization for Standardization. (2018). *ISO 45001:2018 Occupational Health and Safety Management Systems – Requirements with Guidance for Use*. Geneva: ISO.

International Organization for Standardization. (2019). *ISO 31010:2019*

Risk Management – Risk Assessment Techniques. Geneva: ISO.

- Lubis, M. J., Sihombing, G., & Yanto, A. B. H. (2024). Analisis Resiko Kecelakaan Kerja Menggunakan Metode HIRARC pada PT. Telkom Indonesia Jakarta Utara. *Journal of Industrial Management and Technology*, 5(1), 15-23.
- Nursitasari, H. A. (2019). Klasifikasi Potensi Bahaya dan Safety Map di Dapur PT. Denso Indonesia Sunter Plant. *Journal of Industrial Hygiene and Occupational Health*, 3(2), 132-144.
- Putra, Y. A. (2021). Identifikasi Bahaya Terhadap Aktivitas Forklift Menggunakan Metode HIRARC. *Journal of Industrial and System Optimization (JISO)*, 4(1), 38-42.
- Sarbiah. (2023). Penerapan Pelaksanaan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada Karyawan. *Health Information: Jurnal Penelitian*, 15(2), 1-11.
- Setiawan, L., Muhammad, I., Rahmatullah., Rini, A., Hanan., & Pratama. (2024). Penerapan K3 Menggunakan HIRARC pada Perusahaan Konstruksi di Cilegon. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 8(2), 268-278.
- Soesanto, E., Rahma, N. H., Cahyani, A. D., & Ramdan, M. (2023). Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada Keamanan Kinerja Karyawan PT. Indofood. *Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 1(5), 408-414.

Penggunaan Artificial Intelligence dalam perhitungan dinamis sudut kontak hysteresis pada droplet

Kumara Ari Yuana¹⁾, Arifiyanto Hadinegoro²⁾, Teguh Wibowo³⁾, Drajat Indah Mawarni⁴⁾, Agung Pambudi⁵⁾

Prodi Informatika, Fakultas Ilmu Komputer Komputer, Universitas Amikom Yogyakarta,
Jalan Ring Road Utara, Condong Catur, Sleman, Yogyakarta, 55283, Indonesia^{1),2),5)}

Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Kedirgantaraan, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto Yogyakarta
Jalan Raya Janti Blok R, KarangJanbe, Banguntapan, Bantul, Yogyakarta, 55194, Indonesia³⁾

Prodi Teknik mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Ranggalawe Cepu
Jalan Kampus Ronggolawe Blok B No 1, Mentul, Cepu, Blora, Jawa Tengah, 58351, Indonesia⁴⁾

E-Mail : kumara.a@amikom.ac.id¹⁾*, arifiyanto@amikom.ac.id²⁾, teguhwibowo@itda.ac.id³⁾,
drajatindah74@gmail.com⁴⁾, pambudia@amikom.ac.id⁵⁾

ABSTRAK

Sudut kontak hysteresis (SKH) adalah selisih antara sudut kontak maju (*advancing*) dan mundur (*receding*). Besaran ini merupakan indikator penting dalam karakterisasi kebasahan permukaan, yang berdampak pada berbagai aplikasi teknik dan industri seperti pendinginan semprot dan material *anti-icing*. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengukur sudut kontak histeresis (SKH) pada permukaan logam panas menggunakan metode tumbukan *droplet* campuran air dan campuran etilen glikol (20%) yang direkam dengan kamera kecepatan tinggi (2000 fps). Penggunaan kamera berkecepatan tinggi menjanjikan kemampuan menangkap fenomena pergerakan tinggi tetapi memiliki keterbatasan-keterbatasan yang harus diselesaikan seperti *noise* dan *thermal artifact*. Untuk mengatasi *noise* citra akibat gerakan cepat dan *thermal artifact*, penelitian ini menerapkan pemrosesan citra berbasis kecerdasan buatan/*artificial intelligence* (AI) menggunakan arsitektur CNN (ResNet-18) dan GAN (ESRGAN). Hasil menunjukkan bahwa metode ini mampu meningkatkan kualitas citra dan akurasi pengukuran sudut kontak, dengan nilai rata-rata sudut kontak *advancing* sebesar 80,5°, *receding* sebesar 32,74° dan SKH 47,76°. Pendekatan ini menawarkan solusi efektif dan presisi tinggi dalam pengukuran SKH serta memberikan kontribusi terhadap pemodelan kebasahan permukaan pada sistem dinamis.

Kata kunci: *droplet, advancing, receding, hysteresis, artificial intelligence*.

ABSTRACT

The contact angle hysteresis (CAH) is the difference between the advancing and receding contact angles. This parameter is an important indicator in surface wettability characterization, impacting various engineering and industrial applications such as spray cooling and anti-icing materials. This study aims to develop a dynamic calculation method for contact angle hysteresis (CAH) on hot metal surfaces using the impact method of mixed water *droplets* with 20% ethylene glycol, recorded with a high-speed camera at 2000 fps. High-speed cameras promise to capture phenomena in ultra-motion, but they have some limitations, such as thermal artifacts and image *noise*. This new methodology enhanced contact angle measurements. Image quality and measurement accuracy increased using AI-based image processing with image residual networks (ResNet-18) and enhanced super-resolution GANs (ESRGAN). The results indicated that the advanced contact angle average value was 80.5°, the receding contact angle was 32.74°, and the CAH was 47.76°. This new approach for CAH measurement is precise and effective, which aids in modeling dynamic wettability in systems, expanding capabilities in CAH measurement systems.

Keywords: *droplet, advancing, receding, hysteresis, Artificial Intelligence*.

*Corresponding author

1. Pendahuluan

Sudut kontak *hysteresis* (SKH) adalah ukuran selisih antara sudut kontak cairan *droplet* maju (*advancing*), θ_a , dengan sudut kontak cairan *droplet* mundur (*receding*), θ_r , (Lei, Li, Lin, & Wen, 2019). Parameter SKH ini sangat penting yang menjadi ukuran karakteristik dinamika kebasahan antar-muka (*interface*). SKH juga menunjukkan disipasi energi yang disebabkan oleh variasi karakter permukaan dimana *droplet* menempel selama dinamika proses menyebar (*spreading*) dan kembali mengumpul (*retraction*) (Zhu & Dai, 2019). Kondisi *hysteresis* disebabkan oleh variasi karakter kekasaran atau karakter kimiawi permukaan dimana drolet menempel (W. Wang, Xu, Wang, & Chen, 2024). Model persamaan Young-Laplace dengan penggunaan asumsi permukaan halus sempurna dan homogen hanya mampu menggambarkan kondisi ideal (Liu & Cao, 2016). Eksperimen yang menggambarkan kompleksitas dunia nyata perlu kuantifikasi empiris untuk mengukur θ_a dan θ_r sehingga dapat diperoleh SKH ($\theta_a - \theta_r$) (Zhu & Dai, 2019)(Butt, Liu, Koynov, Straub, Hinduja, Roismann, Berger, Li, Vollmer, Steffen, & Kappl, 2022).

Implikasi praktis fenomena SKH dapat ditemui pada fenomena alam dan sangat penting bagi dunia Teknik dan industry. Fenomena alam yang menunjukkan SKH rendah ($\theta_a \approx \theta_r$) adalah tergelincirnya *droplet* pada daun talas. Sebaliknya, SKH tinggi ($\theta_a \gg \theta_r$) ditunjukkan oleh tetes air di tembikar. Berbagai fenomena histeresis di dunia industri dapat ditemui pada proses pendinginan semprot (*spray cooling*), pengecatan semprot, *smart material* yang dapat membersihkan sendiri (*self-cleaning*) atau rancangan material pesawat terbang yang *anti-icing* (F. Wang, Xiang, & Yang, 2024)(Mohammad Karim, Rothstein, & Kavehpour, 2018). Penjelasan fisis dalam industri pendinginan logam, terlalu besar SKH berarti terlalu kuat cairan menempel pada suatu lokasi yang dapat menyebabkan ketidakseragaman pendinginan dan ketidakefisienan secara keseluruhan. Demikian juga fenomena permukaan yang

anti-icing atau saluran mikro (*micro-channel*) memerlukan ketepatan perhitungan *hyeteresis* untuk mendapatkan keseimbangan antara kemampuan menempel (*adhesiveness*) dan pergerakan *droplet*.

Penggunaan kamera berkecepatan tinggi (*high-speed camera*) memberikan perkembangan kemajuan perhitungan sudut kontak walaupun memiliki berbagai tantangan teknis baik dari sisi objek yang diukur maupun karakter *inherent* alat itu sendiri. Tantangan dalam dunia nyata yang dihadapi dalam menghitung SKH sangat bervariasi (W. Wang, Xu, Wang, & Chen, 2024). Heterogenitas kekasaran permukaan, variasi gradien termal dan kondisi transien akan menimbulkan ketidakjelasan (*ambiguity*) penentuan garis sudut kontakannya. Keterbatasan *inherent* yang dihadapi oleh kamera berkecepatan tinggi dalam menangkap *image* bergerak cepat adalah rendahnya kualitas ketajaman gambar (*blurred and low contrast*), atau timbulnya gangguan gambar akibat situasi termal (*thermal artefact*) (Feng, Wang, Su, Ma, Du, Wu, Liu, & Wang, 2025). Menangkap fenomena dengan kecepatan gambar 2000 fps (*frame per second*) menghasilkan gambar dengan kualitas terbatas. Keterbatasan-keterbatasan tersebut menimbulkan tantangan pemrosesan gambar untuk mencapai akurasi pengukuran yang diharapkan. Deteksi gambar untuk menentukan batas *interface* antar fluida sebelumnya dikerjakan secara manual atau dengan bantuan MATLAB untuk deteksi dengan operasi morfologis. Metode-metode konvensional ini cukup efektif dalam situasi laboratorium yang terkendali secara sangat hati-hati, tetapi cukup sulit diterapkan dalam dunia industri dan sulit direproduksi apalagi dihadapkan pada situasi kebutuhan *real-time*. Disinilah muncul kebutuhan pengetahuan lanjutan (*knowledge gap*) yang dihadapi dunia industri.

Perkembangan menuju penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligent*, AI) berbasis *artifical neural network* (ANN) akhir-akhir ini cukup menyita perhatian para peneliti. Lebih lanjut pengembangan ke arah

deep learning berbasis *neural network* seperti *Convolutional neural networks* (CNNs) dan *generative adversarial networks* (GANs) disebabkan kebutuhan untuk mengolah berbagai karakter fungsi tertentu (*feature*), penanganan *noise*, penangan resolusi tinggi dan tugas-tugas otomatisasi yang sebelumnya dilakukan dan tergantung pada keahlian manusia (Al, Alqahtani, Khan, Badi, & Alqahtani, 2025)(Rohhila & Singh, 2024). Beberapa tantangan yang menjadi tugas AI karena kelebihan kemampuannya dibandingkan metode konvensional adalah sbb:

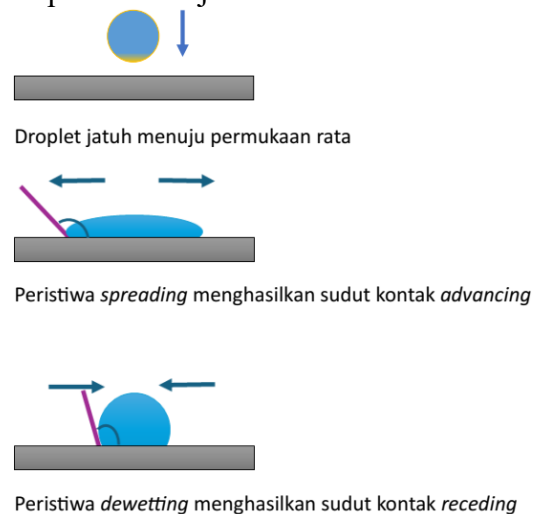
1. Kebutuhan menangani *thermal artifact* yang jika dilihat dari *thermal gradient* bersifat fluktuatif yang sulit ditangani dengan *thresholding* bersifat statis.
2. Kelemahan algoritma yang tidak adaptif menuntut pengembangan yang mampu menangani berbagai kondisi eksperimen dan industrial.
3. Kebutuhan ke arah *real-time* tidak dapat ditangani dengan memadai oleh metode pemrosesan citra manual yang memerlukan metode yang cepat (*high-throughput*).
4. Kondisi dinamis objek bergerak dengan kecepatan tinggi menghasilkan citra yang *noisy* yang memperbesar galat (*error*) akibat kesalahan menentukan *interface* antar fluida dan *interface* fluida dengan media tempat menempel.

Knowledge gaps yang akan diisi pada penelitian ini adalah poin 1 dan 4 sesuai metode penelitian yang digunakan menggunakan kondisi temperatur di atas titik didih air ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada tekanan kamar) dan *droplet* dijatuhkan dengan akselerasi gravitasi menumbuk permukaan *stainless steel*. Pergarakan yang cepat ini ditangkap dengan kamera berkecepatan tinggi (2000 fps).

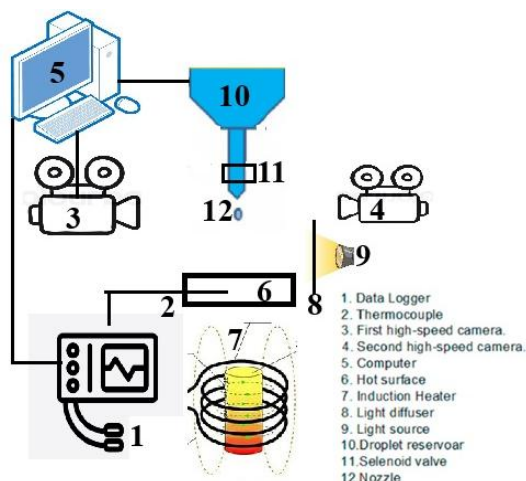
2. Metodologi

Penelitian ini pada dasarnya akan mengukur sudut kontak *droplet* pada permukaan rata secara dinamis (berbeda dengan yang bersifat statis atau *sessile droplet*). Agar permukaan rata dapat memberi

2 efek yang sifatnya berlawanan arah (*spreading* dan *dewetting*) pada *droplet* berbasis air, maka permukaan dipanaskan diatas titik didih air akan membentuk *vapor cushion* yang membuat air akan menyebar saat menumbuk dan kembali mengumpul membentuk butiran (*dewetting*)(Glocker, 1981). Perjalanan mekanisme ini tergambar pada Gambar 1. Karena kecepatan yang tinggi pada peristiwa tetesan air dan perjalanan menyebar saat menumbuk dan kembali mengumpul setelah mencapai lebar maksimum, maka diperlukan kamera yang berkecepatan tinggi (sekitar 2000 frame per detik). Setiap tangkapan gambar akan diproses dengan *image processing* berupa pembersihan *noise* yang biasanya timbul dan diukur masing-masing peristiwa mekanisme perjalanan. Hasil yang diharapkan adalah ukuran sudut yang akan dihitung secara statistika berupa parameter *central tendency* (mean, mode, median) dan *dispersion* (*standard deviation*). Sudut kontak *hysteresis* (*contact angle hysteresis*) dihitung berdasar selisih antara sudut kontak *advancing* dan *receding* (Lei, Li, Lin, & Wen, 2019). Secara skematis, skema alat eksperimen dan prosedur dapat dilihat pada Gambar 2. Masing-masing komponen ditunjukkan oleh nomor.



Gambar 1. Mekanisme sudut kontak *advancing* dan *receding*



Gambar 2. Skema alat eksperimen

Droplet Generator terdiri dari *nozzle injector droplet* (no. 12), tangki fluida (no. 10) dan *selenoid valve* (no. 11) yang berguna untuk menghasilkan *droplet* secara seragam dan berurutan. *Droplet* dilepaskan dari ketinggian 50 mm di atas permukaan panas. Injektor *droplet* menjaga diameter *droplet* tetap terkendali pada 3,12 mm dengan frekuensi 8,5 *droplet* per detik.

Permukaan tumbukan (no. 6) adalah pelat baja tahan karat silindris yang dipoles (SUS 304). Kekasaran permukaan adalah 0,06 μm . Suhu permukaan dikendalikan oleh pemanas induksi (No. 7) dan divariasikan antara 110°C hingga 240°C (menggunakan termokopel no. 2) untuk menganalisis berbagai rezim pendidihan.

Koil tembaga besar digunakan untuk menghasilkan panas. Pemanas ini didukung oleh catu daya dan pengontrol, serta kipas pendingin mencegah pemanasan berlebih. Tiga termokopel tipe-K dipasang pada permukaan untuk mengukur suhu secara akurat.

Dinamika tumbukan *droplet* direkam menggunakan kamera Phantom MIRO M310 (no. 3 dan no. 4) dengan kecepatan *frame* 2000 fps (*frame* per detik) dan resolusi 1024×768 piksel.

Lampu LED dipasang (no. 9) di belakang permukaan panas untuk memberikan pencahayaan yang cukup. Lapisan difusif (no. 8) ditempatkan di antara sumber cahaya dan

permukaan panas untuk menciptakan kondisi pencahayaan yang seragam.

Data-data parameter yang diukur dikelola menggunakan data logger (no. 1) dan dihubungkan dengan komputer (no. 5).

Gambar yang direkam diproses menggunakan teknik pemrosesan citra berbasis *U-Net*, *ResNet* dan *ESRGAN* (Sachdeva, Sharma, Rajput, & Singhal, 2025)(Slama, Sahli, Amri, & Trabelsi, 2023)(Jin-li, Bin, A-kun, Zhao-xiang, Xia, Aiguo, & Yan-de, 2025). Arsitektur *U-Net* yang terdiri dari *encoder* dan *decoder* dengan koneksi skip untuk mempertahankan informasi spasial. Arsitektur *ResNet* yang menggunakan *residual learning* untuk meningkatkan kualitas gambar. Arsitektur *ESRGAN* yang menggunakan GAN untuk meningkatkan kualitas gambar dengan mempelajari distribusi gambar yang realistis. *Generative Adversarial Networks* (GAN) digunakan untuk *Photo Enhancement* dengan mempelajari distribusi gambar yang realistis. Generator dalam GAN dapat menghasilkan gambar output yang realistis, sedangkan *discriminator* dapat mengevaluasi kualitas gambar output. Generator (G) adalah model neural yang mengambil gambar input yang beresolusi rendah atau berkualitas rendah dan menghasilkan gambar output yang beresolusi tinggi atau berkualitas tinggi. Generator dapat menggunakan arsitektur seperti *U-Net* atau *ResNet*. *Discriminator* (D) adalah model neural yang mengevaluasi kualitas gambar output yang dihasilkan oleh generator. *Discriminator* dapat menggunakan arsitektur seperti CNN.

Generator dilatih untuk menghasilkan gambar output yang realistis dan berkualitas tinggi. Generator dapat dilatih menggunakan *loss function* dan diukur *Mean Squared Error* (MSE) atau *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) antara gambar output dan gambar target. *Discriminator* dilatih untuk membedakan antara gambar output yang dihasilkan oleh generator dan gambar target yang asli. *Discriminator* dapat dilatih menggunakan *loss function* dan diukur *Binary Cross-Entropy*. Generator dan discriminator

dilatih secara adversarial, di mana generator mencoba untuk menghasilkan gambar output yang dapat mengelabui discriminator, sedangkan discriminator mencoba untuk membedakan antara gambar output dan gambar target.

Penggunaan U-Net karena U-Net dirancang khusus untuk tugas segmentasi citra dan sangat efektif dalam mendeteksi struktur-spasial halus seperti tepi antar-muka *droplet*. Arsitektur ini terdiri dari *encoder* dan *decoder* yang dihubungkan dengan *skip connections* untuk mempertahankan informasi resolusi tinggi yang hilang saat proses *downsampling*. Dalam konteks penelitian ini, U-Net sangat bermanfaat untuk mempertahankan detail kontur *droplet* yang digunakan untuk menghitung sudut kontak. Sedangkan ResNet-18 digunakan karena kemampuannya dalam *residual learning*, yang memungkinkan jaringan tetap stabil dan dalam tanpa mengalami degradasi performa. Ini penting dalam menangani *noise thermal* dan *blur* akibat pergerakan cepat dari *droplet*, serta menjaga detail tepi antarmuka cairan. Keperluan menghasilkan citra resolusi tinggi digunakan GAN. GAN digunakan untuk *enhancement* citra dengan menghasilkan gambar resolusi tinggi dari input berkualitas rendah. ESRGAN (Enhanced Super-Resolution GAN) sangat cocok untuk menghasilkan gambar tajam yang realistis dari video beresolusi rendah, seperti pada data kamera kecepatan tinggi 2000 fps. *Discriminator* dan generator dilatih secara adversarial, memberikan hasil visual yang *lebih alami dan bebas noise* dibanding metode interpolasi konvensional.

Beberapa alternatif arsitektur terkenal lain sebagai pembanding tetapi tidak dipilih karena ada kekurangan-kekurangan disamping tentu saja memiliki kelebihan-kelebihannya. Contohnya, VGGNet memiliki kekurangan kurang efisien dalam menangani *deep feature* dan kurang unggul dalam restorasi detail tepi. Kelebihan VGGNet adalah sederhana dan stabil. Arsitektur lain seperti DenseNet memiliki kekurangan memiliki kompleksitas tinggi dan jarang dipakai untuk *super-*

resolution atau *denoising*. Kelebihan DenseNet adalah dapat mengurangi vanishing gradient serta efisien.

Mekanisme Kerja pemrosesan citra adalah sebagai berikut:

1. Generator mengambil gambar input dan menghasilkan gambar output yang beresolusi tinggi atau berkualitas tinggi.
2. Discriminator mengevaluasi kualitas gambar output yang dihasilkan oleh generator dan memberikan skor yang menunjukkan seberapa realistis gambar output tersebut.
3. Berdasarkan skor yang diberikan oleh discriminator, generator memperbaiki diri untuk menghasilkan gambar output yang lebih realistis dan berkualitas tinggi.
4. Proses pelatihan generator dan discriminator berulang hingga generator dapat menghasilkan gambar output yang berkualitas tinggi dan realistis.

Eksperimen ini menggunakan air murni dan campuran etilen glikol (20% *Ethylene Glycol*). Generator *droplet* disusun sebagai alat penetes *droplet* secara seragam. Kemudian disiapkan permukaan stainless steel sebagai permukaan yang akan ditabrak oleh *droplet*. Kalibrasi termokopel harus dilakukan agar temperatur yang diinginkan valid dan *reliable*. Bagian penting berikutnya adalah menyusun *high speed camera* dan lampu. Setelah semua tersusun seperti pada Gambar 2, maka suhu akan ditentukan dimulai pada suhu 110 °C. Suhu ini akan dicoba pada berbagai suhu hingga sekitar 240 °C (Burton, Sharpe, Van Der Veen, Franco, & Nagel, 2012)(Wibowo, Widyatama, Kamal, Indarto, & Deendarlianto, 2021). Percobaan tetesan akan dilakukan dengan campuran air dan 20% *Ethylene Glycol*. Seluruh perjalanan *droplet* akan direkam menggunakan high speed camera untuk menangkap fenomena yang digambarkan pada Gambar 1. Seluruh data angka dan gambar ditransfer dan tersimpan di komputer. Video akan diproses menjadi foto-foto diam dan perlu pembersihan dari *noise* dan agar akurat dalam pengukuran sudut kontak *advancing* dan *receding*. Langkah berikutnya adalah analisis hasil dalam tabel dan grafik yang merupakan

sumber kontribusi terhadap ilmu pengetahuan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Citra asli hasil kamera berkecepatan tinggi (2000 fps)

Beberapa gambar perjalanan *droplet* yang dihasilkan yang akan dihitung terlihat pada Gambar 3. Terlihat pada Gambar 3 tersebut bahwa gambar banyak memiliki *noise* (derau). Penyebab *noise* tersebut adalah pergerakan drolet yang tinggi yang ditangkap oleh kamera berkecepatan tinggi, dan adanya efek thermal karena permukaan *stainless steel* memiliki suhu tinggi (*thermal artefact*).



(a) Citra asli saat *droplet* menumbuk permukaan dan menyebar



(b) Citra asli saat *droplet* mencapai maksimum menyebar



(c) Citra asli saat *droplet* kembali mengumpul

Gambar 3. Proses perjalanan *droplet* menumbuk permukaan *stainless* panas yang ditangkap dengan kamera berkecepatan tinggi (2000 fps), (a)Citra asli saat *droplet* menumbuk permukaan dan menyebar, (b)Citra asli saat *droplet* mencapai maksimum menyebar, dan (c)Citra asli saat *droplet* kembali mengumpul

Jika salah satu Gambar 3(a) diperbesar akan lebih memperlihatkan *noise* tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat *noise* yang mempersulit mengukur sudut kontak yang hendak dihitung antara *droplet* dengan media dimana *droplet* tersebut menyentuh (kontak). Tiga sumber *noise* adalah (1) sensor kamera akibat beroperasi pada *gain*

yang tinggi, (2) keburaman akibat pergerakan *droplet* (motion blur), dan (3) rendahnya SNR (*signal-to-noise ratio*) akibat kecilnya ukuran *droplet* dibandingkan dengan keseluruhan frame gambar. Rendahnya SNR ini memperkecil kontras antara *droplet* dengan *background*. *Noise* yang terjadi berakibat pada ketidakjelasan batas gambar antar fluida (*droplet* dengan udara) yang berakibat langsung kesalahan hitung perhitungan sudut kontak. *Thermal artefact* terjadi karena efek penguapan (*vaporization*) akibat suhu tinggi permukaan *stainless steel* akan mendidihkan *droplet*. Suhu *stainless steel* yang tinggi juga memancarkan radiasi *infra-red* yang dapat membuat saturasi sensor kamera. Permukaan panas juga menghasilkan turbulensi udara sekitar permukaan yang dapat berakibat *noise* cahaya.



Gambar 4. Tangkapan gambar *droplet* kamera 2000 fps dengan *noise* yang ditimbulkan

3.2 Peran yang dilakukan AI untuk memperbaiki *noise*

Pada riset ini digunakan kerangka kerja hybrid CNN (*Convolutional Neural Network*)-GAN(*Generative Adversarial Network*). ResNet-18 adalah model CNN yang menggunakan konsep *residual learning* untuk memfasilitasi pelatihan jaringan yang lebih dalam. Model ini memiliki 18 lapisan dan telah terbukti efektif dalam berbagai tugas pengenalan gambar. Disini peran utama ResNet 18 adalah memperkecil *noise* dengan tetap menjaga detail interface batas antar substance (*edges*). Peran GAN adalah merekonstruksi kontur *droplet* berdasar data sintesis yang dilatihkan. GAN adalah model *deep learning* yang dapat memperbaiki kualitas gambar dengan menggunakan dua komponen utama: (1) *Generator*: Model ini bertugas menghasilkan gambar sintesis yang mirip dengan gambar asli. (2) *Discriminator*: Model ini bertugas membedakan antara

gambar asli dan gambar sintetis yang dihasilkan oleh generator. Mekanisme GAN dalam memperbaiki kualitas gambar adalah sebagai berikut: (1) Pelatihan *adversarial*: Generator dan discriminator dilatih secara bersamaan dalam proses adversarial. *Generator* berusaha menghasilkan gambar yang mirip dengan gambar asli, sementara discriminator berusaha membedakan antara gambar asli dan gambar sintetis. (2) Pengembangan *Generator*: selama pelatihan, *generator* menjadi lebih baik dalam menghasilkan gambar yang mirip dengan gambar asli, sehingga *discriminator* semakin sulit membedakan antara gambar asli dan gambar sintetis. (3) Perbaikan kualitas gambar: Hasilnya, *generator* dapat menghasilkan gambar yang memiliki kualitas tinggi dan mirip dengan gambar asli.

Hasil pemrosesan perbaikan gambar dan *noise* dengan kerangka kerja hybrid CNN-GAN dapat dilihat pada Gambar 5. Seperti terlihat pada Gambar 5 bahwa hasilnya nampak lebih bersih dan jelas dengan tidak mengubah esensi dan dimensi gambar asli sebelum diproses seperti Gambar 3.

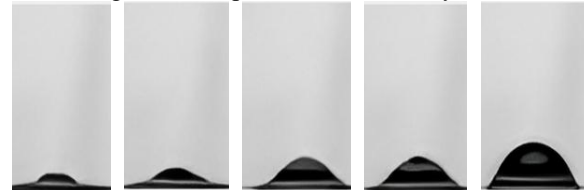
Hasil pemrosesan gambar yang bersih ini akan mempermudah perhitungan sudut kontak yang dihasilkan antara fluida dengan permukaan tempat *droplet* menyentuh. Sebagai perbandingan bagaimana proses pembersihan *noise* sangat membantu proses perhitungan sudut kontak berikutnya adalah hasil pembersihan yang dibesarkan pada gambar asli Gambar 4, menjadi Gambar 6. Terlihat sangat kontras perbedaan kualitas antara Gambar 6 yang jernih dan jelas batas fluida cair dengan fluida gas yang melingkupinya. Gambar yang lebih bersih dan dengan batas antar-muka fluida yang jelas ini, akan memudahkan pekerjaan menghitung sudut kontak. Berikut ini adalah perhitungan sudut kontak *droplet* setelah melalui proses pembersihan *noise*.



(a)Citra hasil proses pembersihan dari *noise* saat *droplet* menumbuk permukaan dan menyebar



(b)Citra hasil proses pembersihan dari *noise* saat *droplet* mencapai maksimum menyebar



(c)Citra hasil proses pembersihan dari *noise* saat *droplet* kembali mengumpul

Gambar 5. Gambar hasil proses pembersihan dari *noise*

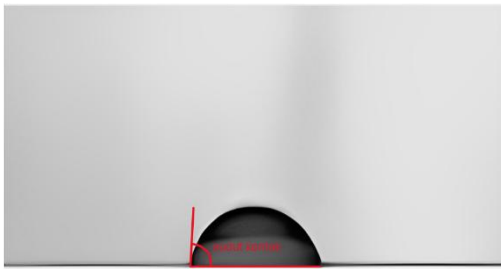


Gambar 6. Citra hasil proses pembersihan dari *noise* dari gambar asli yang terlihat pada Gambar 3 (Gambar hasil pembersihan *noise* ini nampak bersih dengan antar-muka fluida yang jelas batas-batasnya)

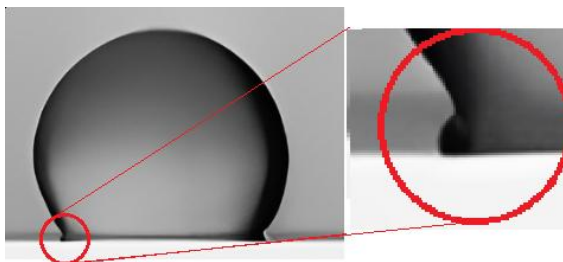
3.3 Pengukuran sudut kontak

Gambar 7 menunjukkan bagaimana sudut kontak diukur pada citra yang sudah bersih. Terlihat pada Gambar 7 bahwa batas antar muka fluida dan solid terlihat jelas sehingga memudahkan penentuan dan pengukuran sudut kontak. Pengukuran ini diterapkan pada kondisi perjalanan *droplet* menyebar atau sudut kontak *advancing*. Kondisi awal proses *droplet* menyebar ditunjukkan pada Gambar 8 dengan gambar yang diperbesar untuk menunjukkan fenomena di tepi permukaan fase awal *droplet* menyebar. Detil penggambaran ini menunjukkan bahwa jika hanya melihat postur besarnya, maka rawan terjadi kesalahan ukur sudut kontak. Kontur besar sudut kontak *droplet* ini seolah-olah lebih besar dari 90° , padahal jika dilihat detil

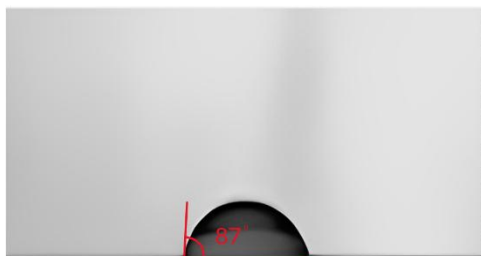
diatas permukaan solid sudut kontaknya lebih kecil dari 90° .



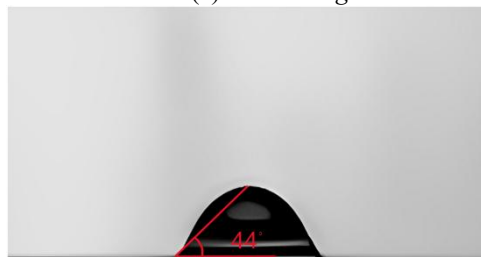
Gambar 7. Perhitungan sudut kontak pada citra yang sudah bersih



Gambar 8. Fase awal proses *droplet* menumbuk permukaan dan mulai menyebar



(a) *advancing*



(b) *receding*

Gambar 9. Pengukuran beberapa sudut kontak (a) *advancing* dan (b) *receding*

Pengukuran sudut kontak dilakukan pada 40 gambar proses menyebar untuk menghitung sudut kontak *advancing* dan 40 gambar proses mengumpul kembali untuk menghitung sudut kontak *receding*. Sebagian gambar pengukuran sudut kontak tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.

Hasil perhitungan dan analisis statistik terhadap 40 sudut kontak *advancing* dan 40 sudut kontak *receding* dituangkan dalam bentuk distribusi sudut kontak *advancing* terlihat pada Gambar 10 dan Gambar 11. Sumbu frekuensi pada grafik Gambar 10 dan 11 merupakan nilai frekuensi yang telah dinormalisasi, dihitung dari proporsi terhadap total data sebanyak 40 citra.

Perhitungan statistik terhadap kedua sudut kontak tersebut ditunjukkan dalam Tabel 1.

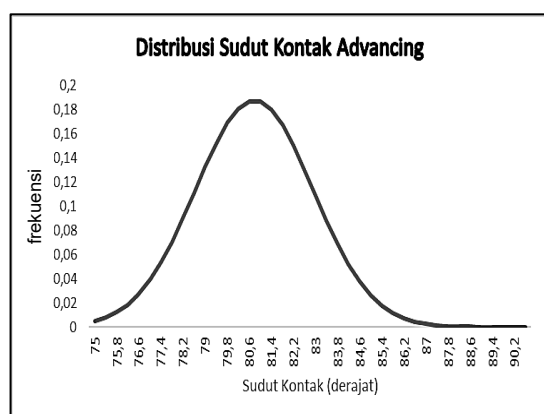
Tabel 1. Perhitungan statistik terhadap sudut kontak *receding* dan *advancing*

Sudut kontak	Jumlah data	Mean	Median	Std dev.	Skewness
<i>Advancing</i>	40	80.5	79.9	2.74	0.45
<i>Receding</i>	40	32.74	30.75	7.73	-0.03

Tabel 1 menunjukkan bahwa sudut kontak *advancing droplet* memiliki nilai *mean* (rata-rata) sebesar 80.5° , median 79.9° , standar deviasi 2.74° dan *skewness* 0.45. Nilai *skewness* sebesar 0.45 menunjukkan sedikit memiliki ekor garis distribusi ke kanan, akan tetapi karena nilainya kecil dan diperkuat nilai median dan mean tidak terlalu besar perbedaannya, maka distribusi ini mendekati simetris. Standard deviasi sebesar 2.74° menunjukkan variasi yang cukup dekat di sekitar rata-rata. Analisis pengukuran sudut kontak menunjukkan distribusi yang konsisten dan mendekati normal, dengan sedikit *skewness* ke arah kanan. Konsistensi ini didukung oleh keselarasan antara median dan mean, yang mengindikasikan tidak adanya *outlier* signifikan dalam data. Oleh karena itu, nilai-nilai sudut kontak yang diperoleh dapat digunakan dengan kepercayaan yang tinggi untuk analisis lanjutan dan pemodelan kebasahan permukaan.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa nilai *mean* (rata-rata) sudut kontak *receding* adalah $32,74^\circ$ dengan simpangan baku sebesar $7,73^\circ$. Nilai *skewness* sebesar -0,03 menunjukkan bahwa distribusi data mendekati simetris, dengan kecenderungan sedikit ke arah kiri (*left-skewed*) yang kecil.

Hal ini menunjukkan bahwa penyebaran data tidak menunjukkan ketimpangan signifikan, dan distribusinya dapat dianggap mendekati distribusi normal. Menariknya, nilai median sebesar $30,75^\circ$ sedikit lebih rendah daripada rata-rata, yang mengindikasikan bahwa ada kemungkinan keberadaan beberapa nilai yang lebih tinggi dari rata-rata yang sedikit menarik distribusi ke kanan. Namun, karena perbedaan antara mean dan median sangat kecil dan nilai skewness hampir nol, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat outlier signifikan dalam data ini.



Gambar 10. Distribusi sudut kontak *advancing*

Sementara itu, nilai simpangan baku yang cukup besar ($7,73^\circ$) dibandingkan dengan nilai rata-rata (sekitar 24% dari mean) mengindikasikan adanya variasi yang cukup besar dalam pengukuran. Variasi ini bisa disebabkan oleh ketidakhomogenan permukaan, variasi kondisi lingkungan, atau galat selama proses pengukuran. Secara keseluruhan, data sudut kontak *receding* ini menunjukkan karakteristik distribusi yang stabil dan terpercaya, meskipun terdapat tingkat variasi yang sedang di sekitar nilai tengah. Distribusi yang hampir simetris dan selisih kecil antara nilai rata-rata dan median memperkuat kesimpulan bahwa data bersifat normal dan bebas dari pengaruh outlier ekstrem.

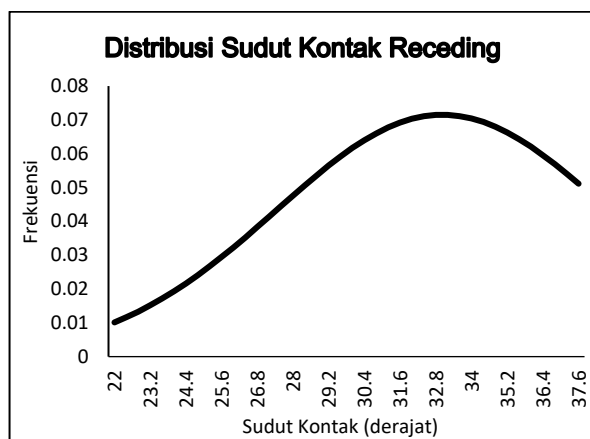
Pengujian pada subset citra sebelum pembersihan memperoleh hasil eksperimental sebagai berikut: sudut kontak *advancing* memiliki mean sekitar 82.3° , simpangan baku

(*standard deviation*) sebesar $\pm 7.9^\circ$, dan skewness sebesar +1.2; sedangkan sudut kontak *receding* memiliki mean sekitar 31.5° , simpangan baku $\pm 12.4^\circ$, dan skewness -0.3 . Jika dibandingkan dengan hasil pasca-pembersihan yang tercantum dalam Tabel 1, terlihat bahwa simpangan baku sudut kontak *advancing* menurun signifikan dari 7.9° menjadi 2.74° , dan sudut kontak *receding* dari 12.4° menjadi 7.73° . Skewness sudut *advancing* juga membaik dari +1.2 menjadi +0.45, dan *receding* dari -0.3 menjadi -0.03 , menunjukkan bahwa distribusi pasca-pembersihan menjadi lebih simetris dan stabil secara statistik.

Nilai simpangan baku sudut kontak *advancing* dan *receding* yang diperoleh dalam penelitian kami, masing-masing sebesar 2.74° dan 7.73° , menunjukkan tingkat variasi yang masih dalam batas wajar dan dapat diterima secara eksperimental. Terlebih lagi, nilai simpangan baku sudut kontak *receding* kami sebanding dengan hasil penelitian oleh (Park, Shin, Ho, & Ha, 2011) (Wu, Kang, Lu, Shui, Ouyang, Peng, He, & Liu, 2023) yang melaporkan pengukuran sudut kontak *droplet* germanium pada permukaan HOPG (Highly oriented pyrolytic graphite) dengan rerata $126.7^\circ \pm 6.9^\circ$ dari sepuluh sampel berbeda (Wu, Kang, Lu, Shui, Ouyang, Peng, He, & Liu, 2023). Hal ini memperkuat bahwa distribusi hasil pengukuran kami, khususnya pada sudut kontak *receding* tetap berada dalam rentang eksperimental yang komparabel dan valid dengan standar ilmiah terkini.

SKH dapat dihitung dengan selisih antara *mean* sudut kontak *advancing* dengan *mean* sudut kontak *receding* yaitu sebesar 47.76° . Nilai histeresis sudut kontak yang diperoleh dari hasil eksperimen sebesar $47,76^\circ$ menunjukkan karakteristik permukaan yang memiliki tingkat adhesi tinggi, di mana tetesan air cenderung menempel dan tidak mudah mengalir di atas permukaan tersebut. Dalam dunia nyata, nilai histeresis yang lebih

kecil, seperti pada daun teratai atau permukaan superhidrofobik komersial, biasanya berada di bawah 20° . Pada kondisi tersebut, tetesan air dapat menggulir dengan sangat mudah, menunjukkan bahwa permukaannya sangat halus, bersih, dan memiliki gaya adhesi yang sangat rendah. Dengan demikian, nilai $47,76^\circ$ berada jauh di atas rentang tersebut, menandakan bahwa permukaan uji tidak bersifat *self-cleaning* dan memiliki gaya tahan terhadap gerakan air yang cukup besar.



Gambar 11. Distribusi sudut kontak *receding*

Sebaliknya, jika dibandingkan dengan permukaan yang memiliki nilai hysteresis yang lebih tinggi, seperti logam berkarat, plastik yang telah mengalami degradasi, atau permukaan terkontaminasi minyak, hysteresis bisa mencapai lebih dari 60° hingga mendekati 90° . Nilai $47,76^\circ$ belum mencapai kategori ekstrem tersebut, namun tetap tergolong tinggi, sehingga dapat disimpulkan bahwa permukaan tersebut kemungkinan memiliki struktur mikro yang kasar, ketidakhomogenan kimia, atau keberadaan kontaminan yang menyebabkan tingginya hambatan gerak tetesan.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. **Metode eksperimental dinamis** dengan menggunakan tumbukan *droplet* dan kamera kecepatan tinggi (2000 fps) berhasil menangkap fenomena penyebaran dan pengumpulan kembali *droplet* secara detail pada permukaan logam panas.

2. **Sudut kontak hysteresis (SKH)** berhasil dihitung secara akurat dari perbedaan antara sudut kontak maju (*advancing*) dan mundur (*receding*), masing-masing memiliki rata-rata $80,5^\circ$ dan $32,74^\circ$, menunjukkan nilai SKH yang cukup besar yaitu 47.76° .
3. **Pengolahan citra berbasis AI**, khususnya dengan arsitektur **ResNet-18** dan **GAN (ESRGAN)**, secara signifikan meningkatkan kualitas citra dengan mengurangi *noise* dan memperjelas batas antarmuka fluida, sehingga memungkinkan pengukuran sudut kontak yang lebih presisi.
4. Teknologi AI terbukti **mengatasi keterbatasan metode konvensional** dalam pengolahan citra dengan kecepatan tinggi dan kondisi eksperimental yang tidak ideal, seperti *thermal artefact* dan *motion blur*.
5. Hasil distribusi statistik sudut kontak menunjukkan **konsistensi dan kestabilan data**, mendekati distribusi normal, yang memperkuat validitas hasil eksperimen.
6. Pendekatan *hybrid* AI yang digunakan memiliki **potensi besar untuk diterapkan dalam aplikasi industri**, khususnya pada sistem yang memerlukan pemantauan real-time terhadap dinamika *droplet*, seperti sistem pendinginan, antinoda es, dan rekayasa permukaan.
7. Penelitian ini memberikan **kontribusi metodologis dan praktis** dalam pengukuran SKH pada sistem dinamis serta membuka peluang riset lanjutan dalam pengembangan sistem akuisisi dan analisis data berbasis AI.

Daftar Pustaka

- Al, A., Alqahtani, M., Khan, A. I., Badi, A. Al, & Alqahtani, M. (2025). *Explainable Artificial Intelligence for Computer Vision and Quantum Explainable Artificial Intelligence Computer Vision and Quantum Machine for Learning*. 00.
- Burton, J. C., Sharpe, A. L., Van Der Veen, R. C. A., Franco, A., & Nagel, S. R. (2012). Geometry of the vapor layer under a

- Leidenfrost drop. *Physical Review Letters*, 109(7). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.074301>
- Butt, H. J., Liu, J., Koynov, K., Straub, B., Hinduja, C., Roismann, I., Berger, R., Li, X., Vollmer, D., Steffen, W., & Kappl, M. (2022). Contact angle hysteresis. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 59, 1–36. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2022.101574>
- Feng, Y., Wang, Q., Su, Y., Ma, W., Du, G., Wu, J., Liu, J., & Wang, Y. (2025). Application of artificial intelligence-based computer vision methods in liver diseases: a bibliometric analysis. *Intelligent Medicine*, January 2024. <https://doi.org/10.1016/j.imed.2024.09.008>
- Glocker, D. A. (1981). *An investigation of the vapor cushion thickness, temperature, and vaporization time of leidenfrost drops frank*.
- Jin-li, Y., Bin, L., A-kun, Y., Zhao-xiang, S., Xia, W., Aiguo, O., & Yan-de, L. (2025). A generalized model for seed internal quality detection based on terahertz imaging technology combined with image compressed sensing and improved-real ESRGAN. *Microchemical Journal*, 208(December 2024). <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.112410>
- Lei, D., Li, Y., Lin, M., & Wen, M. (2019). Model of Advancing and Receding Contact Angles on Rough Surfaces. *Journal of Physical Chemistry C*, 2025.
- Liu, H., & Cao, G. (2016). Effectiveness of the Young-Laplace equation at nanoscale. *Scientific Reports*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep23936>
- Mohammad Karim, A., Rothstein, J. P., & Kavehpour, H. P. (2018). Experimental study of dynamic contact angles on rough hydrophobic surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 513, 658–665. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.11.075>
- Park, M., Shin, H., Ho, Y., & Ha, S. (2011). *Open-Source-based Visualization of Flight Waypoint Tracking Using Flight Manipulation System*. 2(2), 1–10.
- Rohhila, S., & Singh, A. K. (2024). Deep learning-based encryption for secure transmission digital images: A survey. *Computers and Electrical Engineering*, 116(February). <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109236>
- Sachdeva, S., Sharma, U., Rajput, P., & Singhal, R. (2025). *Three-phased multi-scale residual-dense modified-U-Net architecture for deep image steganography*. 123(April), 1–21.
- Slama, A. Ben, Sahli, H., Amri, Y., & Trabelsi, H. (2023). Res-Net-VGG19: Improved tumor segmentation using MR images based on Res-Net architecture and efficient VGG gliomas grading. *Applications in Engineering Science*, 16(October). <https://doi.org/10.1016/j.apples.2023.100153>
- Wang, F., Xiang, M., & Yang, W. (2024). Effects of contact angle hysteresis on frosting and defrosting characteristics on vertical superhydrophobic surfaces. *Applied Thermal Engineering*, 236(June 2023). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121881>
- Wang, W., Xu, S., Wang, Y., & Chen, X. (2024). Contact angle hysteresis due to electric inhomogeneity of topographical patterning of dielectric layer in electrowetting. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 699(November 2023). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134728>
- Wibowo, T., Widyatama, A., Kamal, S., Indarto, & Deendarlianto. (2021). The effect of ethylene glycol concentration on the interfacial dynamics of the successive droplets impacting onto a horizontal hot solid surface. *International Journal of Thermal*

Sciences, 159(August 2020).
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106594>

Wu, B., Kang, Y., Lu, C., Shui, L., Ouyang, W., Peng, Q., He, Q., & Liu, Z. (2023). A Simple Method to Measure the Contact Angle of Metal *Droplets* on Graphite. *Nanomanufacturing and Metrology*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s41871-023-00207-4>

Zhu, J., & Dai, X. (2019). A new model for contact angle hysteresis of superhydrophobic surface. *AIP Advances*, 9(6). <https://doi.org/10.1063/1.5100548>

Work System Improvement Based NASA-TLX and SSRT to Reduce Mental Workload and Work Fatigue

Caesar Rifqi Ardana¹⁾, Irwan Iftadi²⁾

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Sebelas Maret University

Jl. Ir. Sutami No. 36 A, Surakarta, 57126, Indonesia^{1),2)}

E-Mail : caesar.rifqi@gmail.com^{1)}, iftadi@gmail.com²⁾*

ABSTRACT

Work fatigue is a critical issue in modern industries, especially where high production targets must be achieved within limited timeframes. At GM Screen Printing, growing production demands have increased mental workload, which negatively affects employee performance and health. This study, involving 11 respondents, aimed to reduce mental workload and work fatigue through improvements in the work system. Two assessment tools were employed: the NASA Task Load Index (NASA-TLX), which measures six dimensions of workload (mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration), and the Subjective Self Rating Test (SSRT), which evaluates work fatigue through indicators such as reduced activity, decreased motivation, and physical fatigue. Statistical analysis revealed a significant positive correlation between mental workload and work fatigue ($r = 0.604$; $p = 0.049$; $n = 11$). The main contributors to mental workload were temporal demand, performance expectations, and work effort, while fatigue was primarily associated with reduced activity and physical fatigue. Based on these findings, targeted improvements are recommended, including adjusting staffing levels to alleviate time pressure, enhancing ergonomic conditions to reduce physical strain, optimizing the work environment to support sustained performance, and providing stress management training to mitigate frustration and maintain motivation.

Keywords: mental workload, work fatigue, NASA-TLX, SSRT.

1. Introduction

Work fatigue has become an increasingly pressing concern in the modern era, particularly in industries that demand high target achievement within limited timeframes. Work fatigue is a feeling of tiredness commonly reported, characterized by a decrease in activity and motivation, which can affect the body to the point where it is unable to continue working (Santriyana et al., 2023). To meet increasingly strict targets, workers are often required to work harder, intensify their workload, and extend their working hours. According to the International Labour Organization (ILO), 32% of workers report experiencing job-related fatigue, with 18.3% at a moderate level and 27% at a high level—most prominently in the industrial sector, which accounts for about 45% of these cases (ILO, 2016).

Work fatigue is a condition where individuals feel physically and mentally exhausted, influenced by factors such as age, workload, and work duration (Riyadi, 2021). One critical component contributing to this fatigue is mental workload. Mental workload is the amount of effort exerted by the mind when performing tasks that require cognitive input, including concentration, memory, decision-making, and attention (Fitriani, 2019).

GM Screen Printing, established in 2017 in Banar, Deyangan, Magelang, Central Java, operates as a clothing printing industry. The company produces approximately 30–40 t-shirts daily, with a monthly capacity of up to 1,000 shirts. All production stages, from fabric cutting and sewing to printing, are conducted in-house. To maintain customer trust, GM Screen Printing emphasizes high

*Corresponding author

product quality, which requires consistent worker performance.

High production demands often require extended working hours, which can increase mental workload and potentially lead to fatigue. Prolonged fatigue may reduce workers' concentration and increase the likelihood of production errors. This pressure can negatively affect workers' mental well-being and reduce overall efficiency if not appropriately managed. Repetitive tasks and high cognitive demands during long shifts further decrease motivation and productivity.

A lack of attention to mental well-being allows mental workload to persist unchecked. Workers continuously face psychological pressure without effective solutions, resulting in heightened levels of work fatigue and a decline in emotional stability and job performance. To measure and analyze these issues, tools like the Subjective Self Rating Test (SSRT) is conducted by summing the scores obtained to classify the level of fatigue experienced by workers (Kurniawan & Sirait, 2021).

Mental workload is assessed using the NASA Task Load Index (NASA-TLX), which considers six dimensions: mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration (Rizqiansyah, 2017). Understanding these factors helps determine how mental workload influences fatigue and productivity. Additionally, the fishbone diagram is useful for analyzing and identifying factors that influence or have a significant impact on determining the quality characteristics of the output (Sembiring et al., 2022).

Research by Setiawati et al. (2024) found a strong correlation ($r=0.566$) between mental workload and work fatigue, with 90% of employees in software companies experiencing high mental workload, negatively impacting work efficiency. Marfu'ah et al. (2024) reported a moderate correlation ($r=0.503$) between mental workload and fatigue, and a strong correlation ($r=0.622$) with work stress, mainly due to high task demands and monotonous administrative

work. Both studies suggest that employees should manage time well, take adequate rest, exercise, and handle stress to mitigate these effects. Companies should organize workloads carefully, create a comfortable work environment, regulate leave, and monitor posture to prevent fatigue.

2. Metodology

This study collected data through interviews and direct observations in the industry. Additionally, the research was supported by a literature review on the measurement of mental workload and work fatigue. The interviews and observations provided a real-world understanding of workplace conditions. The literature review strengthened the analysis and interpretation of the collected data.

During the observation and interview stages, key dimensions to be measured for mental workload and work fatigue were identified. The dimensions of mental workload include task complexity, concentration and attention, mental effort, time pressure, perceived task success, and emotional discomfort such as stress or frustration. Work fatigue was analyzed through three main dimensions: activity weakening (decline in performance), motivational weakening (reduced drive to work), and physical fatigue (bodily symptoms such as muscle pain and a strong desire to rest).

Based on these identified dimensions, appropriate measurement methods were selected using the NASA-TLX to assess mental workload and the SSRT to evaluate work fatigue. The NASA-TLX captures key aspects such as mental demand, effort, performance, and frustration, aligning with the dimensions of mental workload. Meanwhile, the SSRT is designed to reflect various symptoms of fatigue, including physical, motivational, and activity-related fatigue, in line with the defined fatigue dimensions.

The measurement using NASA-TLX is divided into two stages: weighting and rating

(Ramadhan, 2020). Table 1 shows the pairwise comparison. In the weighting stage, respondents are asked to compare the six dimensions of mental workload mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration to determine which dimension has the most impact on their workload (Hidayati & Basyari, 2024) .

Table 1. Pairwise Comparison

INDICATOR	Vs	INDICATOR
PD	Vs	MD
TD	Vs	MD
OP	Vs	MD
EF	Vs	MD
FR	Vs	MD
TD	Vs	PD
OP	Vs	PD
EF	Vs	PD
OP	Vs	PD
FR	Vs	TD
EF	Vs	TD
FR	Vs	TD
EF	Vs	OP
FR	Vs	OP
EF	Vs	FR

- PD : Physical Demand
- MD : Mental Demand
- TD : Time Demand
- OP : Performance
- EF : Physical and Mental Effort
- FR : Frustration Level

Then, in the rating stage, respondents assess each dimension based on their experience during the task, using a scale from 0 to 100 to measure the level of workload they felt. The combination of these two stages provides a more in-depth understanding of the mental workload experienced by individuals.

• Mental Demand (MD)

How much mental and cognitive effort is required to complete this task?



• Physical Demand (PD)

How much physical effort is required to complete this task?



• Temporal Demand (TD)

How much time pressure is felt in order to complete this task?



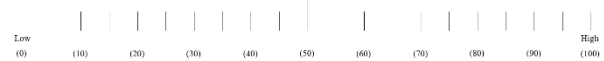
• Own Performance (OP)

How successful do you think you were in accomplishing the task?



• Effort (EF)

How much effort (mental and physical) did you have to put into accomplishing the task?



• Frustration (FR)

How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you while doing the task?



Next, the Workload Work Level (WWL) was calculated based on the results of the NASA-TLX measurement. This calculation provides a quantitative value that represents the overall level of mental workload experienced by an individual. The WWL score is used to identify risk levels and determine priority areas for workload management interventions. The formula for calculating the Weighted Workload (WWL) is as follows:

$$WWL = \frac{\sum(\text{weight} \times \text{rating})}{15} \quad (1)$$

The measurement using the Subjective Self Rating Test (SSRT) consists of 30 statements, proportionally divided into three main dimensions: 10 items assess activity weakening, 10 items measure motivational weakening, and the remaining 10 evaluate physical fatigue as shown in Table 2, Table 3, and Table 4, respectively. Respondents are asked to rate each item using a four-point Likert scale. This structure allows for a comprehensive assessment of work fatigue, capturing both mental and physical aspect (Tarwaka, 2015).

Table 2. Question Indicators of Activity Weakening

Activity Weakening
Feeling heavy in the head
Feeling tired all over the body
Heaviness in the legs
Frequent yawning while working
Feeling mentally disorganized while working
Becoming sleepy
Feeling pressure in the eyes
Stiff and awkward movements
Unbalanced when standing
Wanting to lie down

Table 3. Question Indicators of Motivation Weakening

Motivation Weakening
Difficulty thinking
Reluctance to talk
Feeling nervous
Inability to concentrate
Inability to focus attention
Tendency to easily forget things
Lack of self-confidence
Anxiety about something
Inability to control behavior
Lack of diligence at work

Table 4. Question Indicators of Physical Fatigue

Physical Fatigue
Headache
Shoulder pain
Back pain
Feeling of tight breathing
Thirst
Hoarse voice
Feeling dizzy
Feeling something stuck in the eyelid
Trembling in body parts
Feeling unwell

In completing the IFRC questionnaire, respondents' answers are categorized into four levels of fatigue frequency, each with the following scores (Tarwaka, 2015):

- Score 4 = Very Often (VO)
- Score 3 = Often (O)
- Score 2 = Sometimes (S)
- Score 1 = Never (N)

To determine the relationship between the two variables, a Pearson correlation test was

conducted. This statistical method assesses the strength and direction of the linear relationship between mental workload (as measured by NASA-TLX) and work fatigue (as measured by SSRT). The results of this test provide valuable insights into how increases in mental workload may be associated with changes in fatigue levels.

Based on the measurements, a solution was developed by mapping the issues using a fishbone diagram. By categorizing potential causes into factors such as environment, processes, people, and equipment, the fishbone diagram helped systematically analyze the contributing factors to the issues. The insights gained from this mapping are then used to propose targeted solutions for managing mental workload and reducing work fatigue.

3. Results and Discussion

This study began by collecting data from 11 respondents, which included information on age, gender, and type of occupation. This initial data collection aimed to gain a general overview of the respondents' characteristics, which would support a more comprehensive data analysis. Table 5 presents the demographic profile of the respondents.

Table 5. Respondent Data Summary

No	Respondent	Age	Gender	Occupation
1	R1	36	Female	Tailor
2	R2	23	Female	Tailor
3	R3	21	Female	Tailor
4	R4	23	Female	Tailor
5	R5	24	Female	Tailor
6	R6	42	Female	Tailor
7	R7	24	Male	Screen Printing
8	R8	30	Male	Screen Printing
9	R9	23	Male	Screen Printing
10	R10	24	Male	Cutting
11	R11	23	Male	Cutting

3.1. Measuring Instrument Design

Measurements of mental workload and work fatigue were conducted using two standardized questionnaires: the NASA Task

Load Index (NASA-TLX) and the Subjective Self-Rating Test (SSRT). The NASA-TLX was used to assess mental workload by evaluating six dimensions: mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration. Each dimension was rated using a Visual Analog Scale (0–100), and weighted scores were calculated through pairwise comparisons among the dimensions. Meanwhile, the SSRT was used to evaluate work-related fatigue. This instrument consists of 30 items grouped into three aspects: reduced activity, decreased motivation, and physical fatigue. Each item is rated on an ordinal scale ranging from 1 (never) to 4 (very often).

3.2. Measurement of Mental Workload and Work Fatigue

The Weighted Workload (WWL) value is calculated to obtain the mental workload score based on the NASA-TLX results, as shown in Table 6. WWL is computed by multiplying each dimension's score by its assigned weight, summing the results, and dividing by the total weight (typically 15). The final score represents the overall level of perceived mental workload.

Table 6. Weighted Workload (WWL)

	Indicators						WWL	Avg. WWL
	MD	PD	TD	OP	EF	FR		
	70	140	280	280	280	0	1050	70.00
	70	140	350	320	210	0	1090	72.67
	140	120	350	160	160	100	1030	68.67
	140	120	350	160	160	100	1030	68.67
	160	240	350	160	140	70	1120	74.67
	160	70	240	350	280	0	1100	73.33
	270	0	320	320	60	240	1210	80.67
	85	255	300	500	180	0	1320	88.00
	140	425	210	80	340	0	1195	79.67
	0	160	280	240	280	40	1000	66.67
	240	40	120	350	280	0	1030	68.67
Tot.	1475	1710	3150	2920	2370	550	12175	73.79
Avg	134.09	155.45	286.36	265.45	215.45	50.00		

Based on the data, the average overall WWL (Workload Weight Load) of respondents is 73.79, with the highest workload reported by respondent R8 (WWL of 1320, average 88.00) and the lowest by R10

(average 66.67). This variation indicates differences in perceived workload, which may be influenced by working conditions, individual capabilities, or task difficulty. Among the NASA-TLX mental workload indicators, the highest average score was recorded for Temporal Demand (286.36), followed by Own Performance (265.45) and Effort (215.45), while Physical Demand and Mental Demand scored 155.45 and 134.09 respectively. The lowest average score was observed in Frustration, at 50.00.

Table 7. Perceived Workload

No	Respondent	Avg.	Category
1	R1	70.00	High
2	R2	72.67	High
3	R3	68.67	High
4	R4	68.67	High
5	R5	74.67	High
6	R6	73.33	High
7	R7	80.67	Very High
8	R8	88.00	Very High
9	R9	79.67	Very High
10	R10	66.67	High
11	R11	68.67	High

Table 7 presents the perceived workload. Eight respondents engaged in sewing and cutting tasks were categorized as having a high level of perceived workload, while three respondents involved in screen printing were classified under the very high category. Screen printing places greater mental and physical demands due to the need for sustained concentration, precision, and strict time accuracy throughout the process. In contrast, sewing and cutting, although requiring skill and persistence, generally follow a more stable work rhythm, leading to a relatively lower perceived workload.

The elevated mental workload among respondents was influenced by three main factors: temporal demand, perceived own performance, and the level of effort exerted. The pressure to complete tasks within tight deadlines, the drive to maintain or improve work quality, and the consistent need to exert extra effort all contributed to increased perceptions of mental workload. These three

factors are interrelated and serve as dominant sources of mental strain among the workers.

Following the assessment of mental workload, the next stage involved measuring the level of work-related fatigue. This measurement was conducted using the Subjective Self-Rating Test (SSRT), with the data categorized into three aspects: reduced activity, decreased motivation, and physical fatigue. The following section presents the distribution of work fatigue levels across these three aspects.

Table 8. Distribution of Work Fatigue

Category	Total Score	Percentage
Reduced Activity	258	39.21%
Decreased Motivation	191	29.03%
Physical Fatigue	209	31.76%
Total	658	100.00%

Table 8 presents the distribution of work fatigue. Based on the distribution of work fatigue levels, the results from the SSRT assessment indicate that reduced activity accounted for the highest proportion at 39.21%, followed by physical fatigue at 31.76%, and decreased motivation at 29.03%. High scores in reduced activity reflect a decline in energy, with symptoms such as drowsiness and heavy legs. Physical fatigue was characterized by back pain and thirst, suggesting poor ergonomic posture and insufficient fluid intake. Meanwhile, decreased motivation was reflected in reduced concentration and memory, which may be linked to prolonged stress and mental fatigue.

To calculate the work fatigue score, all respondent answers were summed, with each response option assigned a weight as follows: Never (N) = 1, Sometimes (S) = 2, Often (O) = 3, and Very Often (VO) = 4. Based on the 30 questions answered by the respondents, each response was scored according to the selected option. With a scoring scale ranging from 1 to 4, the minimum total score is 30 and the maximum total score is 120. The resulting total score was then classified into predefined fatigue categories (Putrisani, et al., 2023).

Table 9. Calculation of Total Work Fatigue Score

N	Frequency			Total Score	Fatigue Categories
	S	O	VO		
23	8	9	0	40	Low
16	22	9	0	47	Low
1	40	21	8	70	Moderate
1	40	21	8	70	Moderate
3	42	18	0	63	Moderate
16	20	12	0	48	Low
4	22	30	20	76	High
2	26	30	20	78	High
2	28	27	20	77	Tinggi
8	34	15	0	57	Moderate
18	24	0	0	42	Low

Table 9 presents the calculation of total work fatigue score. Based on the fatigue classification, respondents in sewing and cutting tasks fall into low to moderate categories, indicating that immediate improvements are not critical but regular monitoring is necessary due to the cumulative nature of fatigue. Conversely, respondents in screen printing tasks are classified as having high fatigue levels, suggesting the need for prompt corrective actions. Key contributing factors include non-ergonomic work posture, prolonged repetitive movements, exposure to heat or chemicals, and production target pressures.

To examine the relationship between mental workload and fatigue, several statistical tests need to be conducted, including validity testing, normality testing, reliability testing, and correlation analysis. According to Sanaky et al. (2021), the purpose of a validity test is to confirm that the measurement tool effectively evaluates what it is designed to measure. Based on the results of the validity test, all responses from both questionnaires were declared valid.

According to Suryani et al. (2019), the normality test aims to assess whether the data follow a normal distribution. The Shapiro-Wilk test was employed due to the sample size being fewer than 50 respondents.

Table 10. Tests of Normality

Shapiro-Wilk		
Statistic	df	Sig.

Mental Workload	.885	11	.120
Work Fatigue	.893	11	.153

Table 10 exhibits the tests of normality. The Shapiro-Wilk normality test results indicated that the mental workload and work fatigue data were normally distributed, as both significance values were greater than 0.05.

According to Sanaky et al. (2021), reliability testing evaluates how consistently a test produces similar results when repeated on the same subjects under comparable conditions. This was measured using the Cronbach's Alpha value.

Table 11. Reliability Test of NASA_TLX

Reliability Statistics		
Cronbach's Alpha	N of Items	
.616		6

Table 12. Reliability Test of SSRT

Reliability Statistics		
Cronbach's Alpha	N of Items	
.958		30

Table 11 and Table 12 show the reliability test of NASA_TLX and SSRT, respectively. Based on the reliability test results, the NASA-TLX instrument (6 items) had a Cronbach's Alpha of 0.616, indicating moderate reliability, while the SSRT instrument (30 items) showed a very high reliability with a Cronbach's Alpha of 0.958.

The final analysis conducted was the Pearson correlation test, chosen because the data followed a normal distribution. According to Hidayanti and Mandalika (2023), Pearson correlation describes the direction and strength of the relationship between two or more independent variables and a single dependent variable simultaneously.

Table 13 exhibits the correlation test. Based on the Pearson correlation test, the correlation coefficient (r) between mental workload and work fatigue is 0.604 with a significance value of 0.049. This indicates a moderate positive and statistically significant relationship between the two variables.

Table 13. Correlation Test

		Mental Workload	Work Fatigue
Mental Workload	Pearson Correlation	1	.604*
	Sig. (2-tailed)		.049
	N	11	11
Work Fatigue	Pearson Correlation	.604*	1
	Sig. (2-tailed)	.049	
	N	11	11

3.3. Solution Development

Before developing improvements, the root causes of high mental workload and work fatigue in the screen printing section at GM Screen Printing were identified using a fishbone diagram. Based on the measurement results, the dominant factors include temporal demand, own performance, effort, and physical fatigue, so the proposed improvements are focused on these elements.

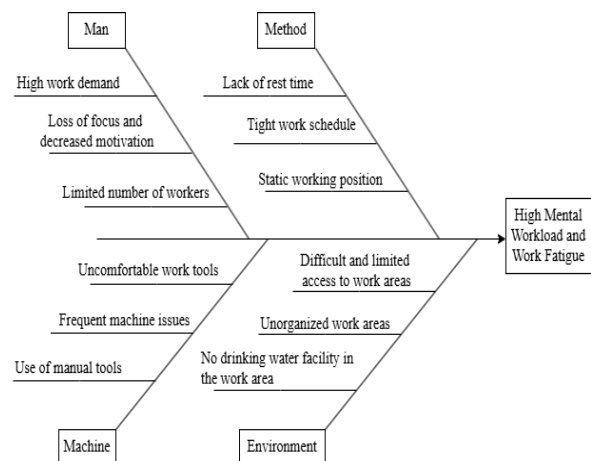


Figure 1. Fishbone Diagram

The increase in mental workload and work fatigue in the screen printing section at GM Screen Printing is influenced by several key factors. In terms of man, high work demands, limited workforce, and decreased focus and motivation lead to increased temporal demand and effort, resulting in physical fatigue and reduced performance. For the machine factor, the use of uncomfortable, frequently malfunctioning, and manual tools increases physical strain and extends work time. From the method perspective, rigid work methods, limited rest, and static working positions worsen workers'

physical and mental conditions. Meanwhile, the environment factor involves an unorganized workspace and lack of basic facilities, adding physical and mental pressure, reducing productivity, and increasing the risk of fatigue.

Based on the identification results, several system improvement proposals are suggested to reduce mental workload and work fatigue, including improving work methods by adding staff in high-intensity areas, implementing active micro breaks every 60–90 minutes, and adjusting production targets to realistic capacities; enhancing ergonomics with adjustable chairs, tables, and anti-fatigue mats; optimizing the work environment through better layout, equipment placement, and providing drinking water and rest areas; and psychosocial and managerial interventions such as stress management training and regular monitoring of workload and fatigue. Implementation priorities are set as short-term (1–3 months) for micro breaks, staffing, and water provision; medium-term (3–6 months) for ergonomic equipment and stress training; and long-term (over 6 months) for workspace layout redesign and workload management evaluation.

4. Conclusion

Based on the research findings, most production workers at GM Screen Printing experience a high mental workload, with screen printing staff facing very high levels due to time pressure, performance demands, and effort required. Work fatigue varies among workers, with some showing low to moderate levels while those in screen printing exhibit high fatigue, primarily indicated by decreased energy and physical tiredness. A significant positive correlation ($r = 0.604$, $p = 0.049$) exists between mental workload and work fatigue, meaning increased mental workload leads to higher fatigue. Proposed solutions include adding staff, implementing active breaks, adjusting production targets, providing ergonomic furniture, ensuring access to drinking water and rest areas, as well as stress

management training and regular monitoring to reduce both mental workload and fatigue.

Bibliography

- Fitriani, R. C. A. (2019). Analisis Beban Kerja Mental Unit Human Capital Pt Xyz Menggunakan Metode Nasa-Tlx. *Industrial Engineering Online Journal*, 8(1), 1-8.
- Hidayanti, A. A., & Mandalika, E. N. D. (2023). Analisis korelasi Pearson biaya produksi terhadap luas lahan petani garam di Kecamatan Bolo Kabupaten Bima. *Jurnal Inovasi Pendidikan dan Sains*, 4(1), 5–10.
- Hidayati, R. A., & Basyari, A. S. (2024). Pengukuran beban kerja mental mahasiswa pekerja Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Muhammadiyah Gresik menggunakan metode NASA-TLX. *Jurnal Manajerial*, 11(03), 356–373.
- ILO. (2016) Workplace stress: A collective challenge. Geneva: ILO.
- Kurniawan, I., & Sirait, G. (2021). Analisis Kelelahan Kerja di Maruwa Indonesia. *Computer and Science Industrial Engineering (COMASIE)*, 4(5), 53–61
- Marfu'ah, N., Sumardiyono, & Fauzi, R. P. (2024). Hubungan Beban Kerja Mental Dengan Kelelahan Kerja Dan Stres Kerja Pada Pegawai Pt X. *Jurnal Kesehatan Masyarakat (e-Journal)*, 12(2), 140–147.
- Putrisani, F. S., Nugraha, A. E., & Herwanto, D. (2023). Analisis kelelahan kerja subjektif dengan menggunakan kuesioner Subjective Self Rating Test. *STRING (Satuan Tulisan Riset dan Inovasi Teknologi)*, 7(3), 258–266.
- Ramadhan, D. (2020). Analisis Beban Kerja Psikologis pada Pegawai Restoran Wwingstop dengan Metode NASA-TLX. *Jurnal PASTI*, 9(2), 195–208.
- Rizqiansyah, M. Z. A., Hanurawan, F., dan Setiyowati, N. (2017). Hubungan antara Beban Kerja Fisik dan Beban Kerja Mental berbasis Ergonomi terhadap Tingkat Kejenuhan Kerja pada Karyawan PT Jasa Marga (Persero) Tbk Cabang

- Surabaya Gempol. *Jurnal Sains Psikologi*, 6(1), 37-42.
- Sanaky, M. M., Saleh, L. M., & Titaley, H. D. (2021). Analisis faktor-faktor penyebab keterlambatan pada proyek pembangunan gedung asrama MAN 1 Tulehu Maluku Tengah. *Jurnal Simetrik*, 11(1), 432–439.
- Santriyana, N., Dwimawati, E., & Listyandini, R. (2023). Faktor-faktor yang berhubungan dengan kelelahan kerja pada pekerja pembuat Bolu Talas Kujang di Home Industry Kelurahan Bubulak tahun 2022. *PROMOTOR: Jurnal Mahasiswa Kesehatan Masyarakat*, 6(4), 402–409.
- Setiawati, N. L. P. L. S., Meliala, V. V. I., Putra, K. A. P., & Antara, I. M. Y. M. (2024). Analisis Hubungan Antara Beban Kerja Mental Dan Kelelahan Kerja Pada Karyawan Di Perusahaan Pengembangan Perangkat Lunak. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 9(2), 162–169.
- Sembiring, M. T., Meliala, A. R. S., & Harahap, M. Z. (2022). Analisis permasalahan menggunakan Cause and Effect Diagram, Fault Tree Analysis dan Affinity Diagram proses produksi stasiun persiapan tulangan pada PT. X. *TALENTA Conference Series: Energy & Engineering*, 5(2), 1–6.
- Suryani, A. I., Syahribulan, K., & Mursalam, M. (2019). Pengaruh penggunaan metode mind mapping terhadap hasil belajar Ilmu Pengetahuan Sosial murid kelas V SDN No. 166 Inpres Bontorita Kabupaten Takalar. *Jurnal Kajian Pendidikan Dasar*, 4(2), 741–753.
- Tarwaka. (2015). *Ergonomi Industri Dasar-Dasar Pengetahuan Ergonomi Dan Aplikasi di Tempat Kerja*. Surakarta: Harapan Press.

Pendekatan Six Sigma Dengan Tahapan DMAI Terhadap Kualitas Pada Kemasan Gula

Ananda Hapsari Putri ¹⁾, Rizqi Wahyudi ²⁾, Andhyka Tyaz Nugraha ³⁾

*Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu, Desa Way Huwi, Kecamatan Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung,
Indonesia, 35365, Indonesia^{1),2),3)}*

E-Mail : ananda.118190017@student.itera.ac.id ¹⁾, rizky.wahyudi@ti.itera.ac.id ²⁾,
andhyka.nugraha@ti.itera.ac.id ³⁾*

ABSTRAK

PT. AHP masih menghasilkan produk cacat secara berulang pada setiap periode produksi. Kecacatan terjadi pada gula yang telah dikemas menggunakan karung plastik. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung nilai DPMO dan Level Sigma perusahaan, mengidentifikasi faktor penyebab timbulnya cacat, serta memberikan usulan perbaikan. penelitian ini menggunakan pendekatan *Six Sigma* dengan tahapan *Define, Measure, Analyze, dan Improve* (DMAI). Penelitian ini menemukan bahwa jenis cacat yang sering terjadi pada kemasan gula rafinasi adalah cacat kemasan sobek dan jahitan lepas. Berdasarkan hasil pengolahan data, didapatkan rata-rata nilai DPMO perusahaan sebesar 97 dan nilai sigma sebesar 5.26. Penyebab terjadinya cacat berasal dari faktor manusia, metode, dan mesin. Usulan perbaikan dirancang berdasarkan penyebab mode kegagalan yang memiliki nilai RPN tertinggi. Hasil analisis FMEA menunjukkan bahwa penyebab kemasan sobek berasal dari metode penyusunan gula rafinasi yang tidak sesuai, penyebab ini memiliki nilai RPN sebesar 384. Perbaikan yang diusulkan pada PT. AHP adalah melakukan penggantian ukuran palet atau mengubah susunan gula rafinasi di atas palet. Penyebab jahitan lepas berasal dari metode penjahitan yang tidak dilakukan secara konsisten, penyebab ini memiliki nilai RPN sebesar 336. Perbaikan yang diusulkan pada PT. AHP adalah melakukan *preventive maintenance* secara berkala dan menyediakan lingkungan kerja yang nyaman bagi operator di area *packing*.

Kata kunci: DMAI, FMEA, Six Sigma, Kualitas.

ABSTRACT

The objective of this study is to compute the Defects Per Million Opportunities (DPMO) metric and the Sigma Level of the organisation. Additionally, the study attempts to identify the underlying variables contributing to defects and propose recommendations for enhancing the process. This study employs a Six Sigma methodology, incorporating the Define, Measure, Analyze, and Improve (DMAI) stages. According to the findings derived from the data analysis, the mean value of the company's Defects Per Million Opportunities (DPMO) is 97, while the standard deviation (sigma) is calculated to be 5.26. Defects can arise due to human factors, processes, and machines. Enhancements are devised following the underlying cause of the failure mode exhibiting the highest Risk Priority Number (RPN) value. The Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) findings indicate that the ripped packaging issue can be attributed to an inadequate approach employed in the preparation of refined sugar. This particular cause was assigned a Risk Priority Number (RPN) value of 384. The suggested enhancement at PT. AHP involves modifying either the dimensions of the pallet or the configuration of refined sugar on the pallet. The occurrence of loose sutures can be attributed to inconsistent sewing techniques, which has been assigned a Risk Priority Number (RPN) value of 336. The suggested course of action for PT. AHP involves implementing routine preventative maintenance measures and ensuring optimal working conditions for personnel in the packing area.

Keywords: DMAI, FMEA, Six Sigma, Quality.

**Corresponding author*

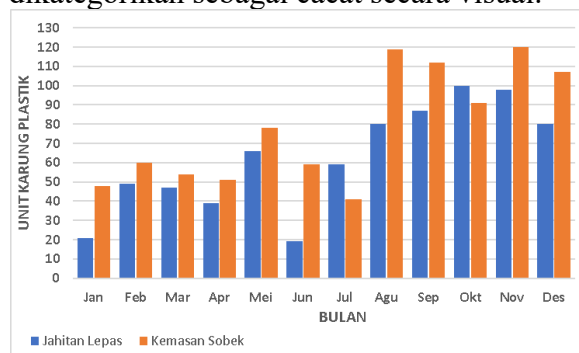
1. Pendahuluan

Gula rafinasi merupakan salah satu jenis gula yang beredar di Indonesia (Sulaiman et al., 2019). Gula rafinasi berasal dari gula mentah (*raw sugar*) yang telah melalui proses pemurnian dengan bahan baku sepenuhnya diimpor dari negara lain (Kurniawan et al., 2018). Peredaran gula rafinasi di Indonesia sangat dibatasi dan hanya diperuntukkan untuk kebutuhan industri saja. Berbeda dengan gula konsumsi yang biasa beredar luas di masyarakat, gula rafinasi memiliki tampilan fisik yang lebih putih dan lebih halus. Gula rafinasi diproduksi oleh pabrik gula (PG) milik swasta (Haryana & Wicaksono, 2016).

PT. AHP merupakan perusahaan industri gula yang secara khusus memproduksi gula rafinasi. Gula rafinasi diproduksi hanya untuk kebutuhan industri. Hal tersebut diatur dalam Peraturan Menteri Perdagangan Republik Indonesia Nomor 01 Tahun 2019, bahwa gula rafinasi tidak diperjual belikan secara bebas ke masyarakat (BSN, 2011). Pelanggan PT. AHP adalah perusahaan yang bergerak di industri makanan, minuman, hingga industri farmasi. Produk gula rafinasi tersebut digunakan sebagai bahan baku bagi produk olahan makanan dan minuman.

Kualitas suatu produk yang dihasilkan berkaitan erat dengan citra perusahaan di mata pelanggan (Goetsh & Davis, 2014). Kualitas barang/jasa yang ditawarkan juga harus mampu memberikan jaminan mutu, sehingga mau tidak mau agar mampu memenuhi tuntutan konsumen (Azizah et al., 2024). Kualitas menjadi parameter utama yang menjadi bahan pertimbangan pelanggan ketika akan memilih maupun menggunakan suatu produk (Dhingra et al., 2019). Hal tersebut menjadikan PT. AHP harus terus menghasilkan produk gula rafinasi yang berkualitas tinggi. Langkah ini perlu dilakukan PT. AHP sebagai upaya menarik pelanggan agar terus menggunakan produknya. Produk dikategorikan berkualitas apabila produk tersebut mampu memenuhi kebutuhan dan keinginan pelanggan (Grigoryan & Golubkova, 2020).

Kualitas gula rafinasi baik secara kimia maupun visual penting untuk diperhatikan perusahaan. Pengujian kualitas gula rafinasi secara kimia dilakukan melalui pengujian di laboratorium, dimana parameter yang digunakan adalah susut pengeringan, warna larutan, sedimen, dan lain-lain. Berbeda dengan kualitas gula rafinasi secara visual, dimana pemeriksaan dilakukan secara langsung terhadap kemasan produk gula rafinasi. Parameter yang digunakan dalam pemeriksaan secara visual pada kemasan karung adalah kode produksi, jahitan, kebersihan, dan kontaminasi secara visual. Selama proses produksi, PT. AHP masih menghasilkan produk cacat yang dikategorikan sebagai cacat secara visual.



Gambar 1. Data Produk Cacat

Gambar 1 menunjukkan bahwa jumlah produk cacat mengalami fluktuasi setiap bulannya dan tentunya memberikan kerugian secara finansial maupun secara teknis bagi perusahaan. Tingginya risiko produk cacat yang dihasilkan akan berdampak pada kenaikan biaya produksi perusahaan (Gaikwad & Sunnapwar, 2020). Kecacatan terjadi pada gula rafinasi yang telah dikemas menggunakan karung plastik. Jenis cacat yang terjadi pada kemasan gula rafinasi dikategorikan sebagai cacat secara visual yang terdiri dari jahitan lepas dan kemasan sobek. Berdasarkan hal tersebut, aktivitas pengendalian kualitas perlu dilakukan oleh perusahaan untuk menekan jumlah produk cacat yang dihasilkan pada setiap periode produksi.

Pengendalian kualitas merupakan suatu aktivitas yang penting untuk dilakukan perusahaan sebagai upaya menghasilkan,

mempertahankan, dan meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan (Khan et al., 2019). Perusahaan dapat melakukan pengendalian kualitas pada keseluruhan proses produksi, mulai dari persiapan bahan baku hingga proses produksi berakhir dan menghasilkan produk yang siap untuk dipasarkan (Darmawan et al., 2022). Melalui pengendalian kualitas yang dilakukan secara berkelanjutan, diharapkan dapat menekan tingkat produk cacat dan menghasilkan produk yang mampu memenuhi standar spesifikasi (Fantasia & Wahyudi, 2024).

Kemampuan perusahaan dalam menghasilkan produk yang sesuai spesifikasi perlu diukur terlebih dahulu, hal ini dilakukan sebelum melakukan upaya perbaikan (Wahyudi et al., 2023). Pengukuran dilakukan terhadap produk cacat menggunakan pendekatan *Six Sigma*. *Six Sigma* merupakan pendekatan yang banyak digunakan dalam proses pengendalian, perbaikan dan peningkatan kualitas (Kowalik, 2018). *Six Sigma* umumnya terdiri beberapa tahapan yaitu *Define*, *Measure*, *Analyze*, *Improve*, dan *Control*. Namun tahap *Control* membutuhkan implementasi dalam periode waktu tertentu sehingga pada penelitian ini berfokus pada hingga tahapan *improve*.

Target dari upaya pengendalian kualitas *Six Sigma* adalah menghasilkan sebanyak 99.9997% produk yang sesuai spesifikasi (Widjajanto & Purba, 2021). Produk cacat diukur menggunakan satuan ukuran *Defect per Million Opportunity* (DPMO) yang biasa digunakan pada pendekatan *Six Sigma*. Satuan ukuran ini memperlihatkan kemungkinan kegagalan yang terjadi dalam satu juta kesempatan (Untoro & Iftadi, 2020). Perusahaan dapat menghasilkan 99.9997% produk yang sesuai spesifikasi apabila nilai DPMO yang dihasilkan tidak lebih dari 3.4 atau jika dikonversikan perusahaan berada pada level 6 sigma (Delgadillo et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai DPMO dan level sigma perusahaan, mengidentifikasi faktor-faktor yang menyebabkan timbulnya cacat pada kemasan, serta mengidentifikasi usulan

perbaikan untuk menekan jumlah cacat pada kemasan gula rafinasi.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan jenis data kuantitatif, yaitu jenis data yang merujuk pada semua informasi yang dikumpulkan dalam bentuk angka (Sugiyono, 2020). Berdasarkan sumber data, peneliti mengumpulkan dan menggunakan data primer yang diperoleh langsung oleh peneliti dari PT. AHP. Berdasarkan bentuk data, penelitian ini menggunakan data historis, yaitu data bulanan jumlah produksi dan jumlah produk cacat.

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Six Sigma* dengan tahapan DMAI. Adapun metode analisis yang digunakan sebagai berikut (Pakdil, 2020):

1. Tahap *Define*

Tahap *define* dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan kualitas yang dihadapi PT. AHP. Permasalahan yang berkaitan dengan kualitas gula rafinasi diidentifikasi melalui pelaksanaan observasi langsung ke perusahaan. Tujuan penggunaan pendekatan *Six Sigma* juga diuraikan pada tahap ini.

2. Tahap *Measure*

Semua data mengenai karakteristik *Critical to Quality* (CTQ) dikumpulkan dan diidentifikasi dengan jelas sesuai dengan permasalahan yang dianalisis pada tahap *Define*. Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah untuk dilakukan perhitungan nilai DPMO. Nilai hasil perhitungan tersebut dikoversikan ke dalam nilai level sigma. Tahap ini juga dilakukan pembuatan peta kendali p.

3. Tahap *Analyze*

Data yang telah diolah pada tahap *measure* kemudian dianalisis untuk mengetahui jenis cacat yang paling banyak terjadi dan mengetahui faktor-faktor yang menjadi penyebab timbulnya masalah. Analisis tersebut dilakukan dengan pembuatan diagram pareto dan diagram *fishbone*.

4. Tahap *Improve*

Dilakukan analisis menggunakan tabel *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

sebagai upaya untuk memberikan rekomendasi perbaikan berdasarkan kemungkinan kegagalan dan masalah yang timbul.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Tahap *Define*

Permasalahan kualitas yang dijadikan bahan analisis pada penelitian ini adalah pada bagian kemasan produk gula rafinasi. Kemasan gula rafinasi dikatakan berkualitas apabila mampu memenuhi standar kualitas yang telah ditetapkan oleh perusahaan. Standar kualitas ini ditetapkan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan kebutuhan pelanggan seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar Kualitas Kemasan

Parameter	Standar
Kode Produksi	Ada
Jahitan	Baik
Kebersihan	Bersih
Kontaminasi Visual	Tidak Ada

3.2. Tahap *Measure*

Data mengenai karakteristik CTQ dikumpulkan untuk kemudian diidentifikasi sesuai dengan permasalahan yang dianalisis pada tahap *Define*. Permasalahan jenis cacat yang sering terjadi pada kemasan produk gula rafinasi adalah kemasan sobek dan jahitan lepas. Jenis cacat tersebut dikategorikan sebagai CTQ seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik CTQ

(CTQ)	Keterangan
Kemasan Sobek	Terdapat sobekan pada bagian permukaan kemasan.
Jahitan Lepas	Jahitan terlepas sehingga bagian atas kemasan karung tidak tertutup sempurna.

Data produksi dan produk cacat yang diperoleh kemudian diolah untuk dihitung nilai DPMO dan level sigma. DPMO merupakan satuan ukuran kegagalan per satu juta kesempatan (Pakdil, 2020). Tabel 3 menunjukkan DPMO dan Level Sigma.

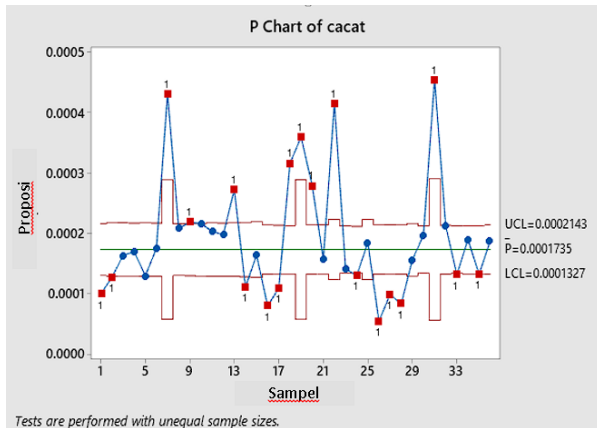
Berdasarkan hasil pengolahan dan perhitungan data pada Tabel 3, didapat jumlah nilai DPMO sebesar 3485, dengan rata-rata 97. Nilai tersebut menunjukkan bahwa dalam satu

unit produk yang dihasilkan memiliki rata-rata kemungkinan untuk gagal sebesar 97 kegagalan per satu juta kesempatan.

Tabel 3. DPMO dan Level Sigma

Jumlah yang Diperiksa	Jumlah Cacat	CTQ	DPMO	Level Sigma
850.464	85	2	50	5,39
813.178	104	2	64	5,33
788.660	129	2	82	5,27
821.380	140	2	85	5,26
808.320	105	2	65	5,33
814.042	143	2	88	5,25
118.349	51	2	215	5,02
845.318	176	2	104	5,21
835.930	183.6	2	110	5,20
822.336	178	2	108	5,20
810.182	165	2	102	5,21
813.504	161	2	99	5,22
803.520	219	2	136	5,14
771.379	86	2	56	5,36
741.888	122	2	82	5,27
948.576	76	2	40	5,44
969.984	107	2	55	5,37
978.202	309	2	158	5,10
116.813	42	2	180	5,07
956.486	267	2	140	5,13
917.203	145	2	79	5,28
626.304	260	2	208	5,03
1.012.915	144	2	71	5,30
1.058.534	138	2	65	5,33
638.189	118	2	92	5,24
945.005	52	2	28	5,53
923.962	92	2	50	5,39
956.352	80	2	42	5,43
831.590	130	2	78	5,28
1.013.291	200	2	99	5,22
114.391	52	2	227	5,01
963.440	205	2	106	5,20
1.015.488	134	2	66	5,32
982.426	187	2	95	5,23
979.354	130	2	66	5,32
937.632	176	2	94	5,24
Total	5.902	-	3.485	-
Rata-rata			97	5,25

Nilai level sigma yang dicapai perusahaan sebesar 5,26. Nilai tersebut berarti kinerja yang dihasilkan perusahaan setara dengan rata-rata industri USA. Pencapaian tersebut menunjukkan hasil yang cukup baik, namun perlu ditingkatkan sehingga dapat mencapai rata-rata industri kelas dunia yang berada pada level 6 sigma.



Gambar 3. Peta Kendali p

Gambar 3 menunjukkan peta kendali p. Peta kendali tersebut memiliki data yang proporsi kerusakannya berada di luar batas kendali atas dan batas kendali bawah. Terdapat sebanyak 19 data yang berada di luar batas kendali. Data tersebut berada di luar batas kendali karena terdapat variasi yang menyebabkan nilai rata-rata proporsi cacat pada data tersebut berada di luar batas kendali statistik. Variasi terjadi karena adanya masalah yang timbul akibat penyebab umum dan penyebab khusus. Penyebab umum ditandai dengan munculnya penyimpangan yang berada dalam batas kendali. Penyebab khusus ditandai dengan ditemukannya data yang berada di luar batas kendali.

Data yang berada di luar batas kendali tersebut menunjukkan bahwa terjadi masalah yang berasal dari penyebab khusus. Penyebab khusus pada umumnya berasal dari faktor manusia, mesin, metode kerja, material, dan lingkungan. Faktor yang menimbulkan jenis cacat kemasan sobek berasal dari faktor manusia (operator) yang tidak melakukan proses penyusunan sesuai dengan standar. Faktor lain yang terlibat yaitu berasal dari metode kerja yang dilakukan. Metode penyusunan kemasan gula rafinasi dalam *warehouse* yang tidak sesuai standar akan menyebabkan kemasan sobek karena tergores garpu pada *forklift* ketika proses penyusunan dan proses *handling* untuk diangkut ke dalam truk.

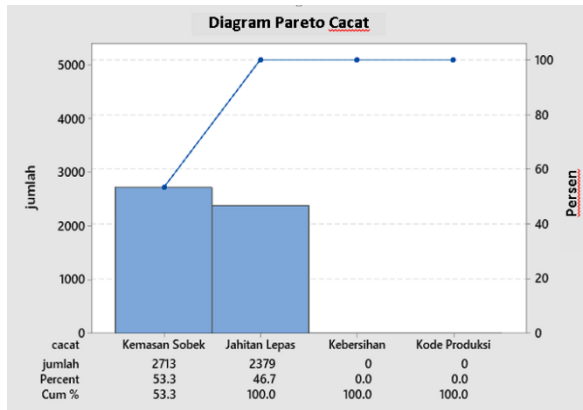
Kemudian faktor yang menimbulkan jenis cacat kemasan sobek berasal dari faktor manusia, metode, dan mesin. Penyebab yang

berasal dari faktor manusia adalah proses penjahitan pada bagian atas kemasan karung yang tidak dilakukan sesuai dengan standar. Penyebab yang berasal dari faktor mesin adalah penggantian terhadap jarum jahit yang tidak dilakukan sesuai dengan standar. Proses *maintenance* mesin jahit yang dilakukan lebih lambat dari jadwal yang seharusnya juga menjadi penyebab yang berasal dari faktor mesin. Penyebab selanjutnya adalah berasal dari faktor metode kerja yang dilakukan pada proses penjahitan. Sebelum kemasan dijahit, bagian atas karung perlu dilipat terlebih dahulu. Metode pelipatan yang tidak sesuai standar dan metode penjahitan yang tidak sesuai standar menyebabkan jahitan pada karung mudah terlepas.

3.3. Tahap *Analyze*

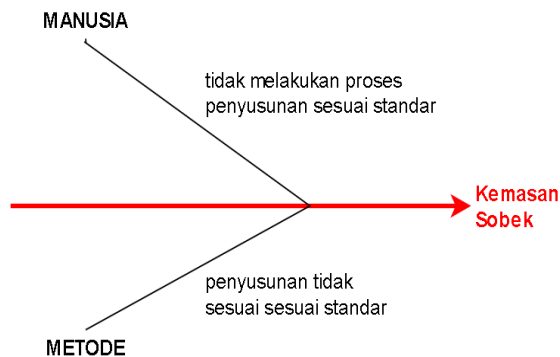
Permasalahan kualitas yang ditemui pada PT. AHP adalah tidak terpenuhinya standar kualitas pada gula rafinasi yang sudah dikemas. Terdapat standar kualitas yang tidak terpenuhi pada kemasan yang mengakibatkan produk tersebut masuk dalam kategori produk cacat. Produk cacat tersebut akan diolah kembali melalui proses yang disebut *remelt*. Proses *remelt* merupakan upaya terakhir yang dilakukan perusahaan untuk mengatasi produk cacat. Proses *remelt* ini tentu akan menyebabkan kerugian bagi perusahaan jika tidak segera ditangani.

Perusahaan dalam proses produksinya telah melakukan *maintenance* tahunan yang dilakukan setiap bulan Juli, namun *maintenance* yang dilakukan tidak mengurangi jumlah produk cacat pada bulan berikutnya. Hal ini terjadi karena *maintenance* dilakukan terfokus untuk mengatasi kecacatan selama proses pemurnian, sedangkan kecacatan pada kemasan timbul mulai dari area *packing*. Gula rafinasi yang berada pada area tersebut telah melewati proses pemurnian sehingga *maintenance* yang dilakukan tidak terlalu memberikan dampak yang signifikan terhadap jenis cacat tersebut.



Gambar 4. Diagram Pareto Cacat

Gambar 4 menunjukkan jenis cacat yang terjadi pada kemasan gula rafinasi. Jenis cacat tersebut terdiri dari cacat kemasan sobek, jahitan lepas, kebersihan, dan kode produksi. Jumlah produk yang dikategorikan cacat kemasan sobek sebanyak 2.713 produk, dengan persentase nilai sebesar 53,3%.



Gambar 5. Fishbone Kemasan Sobek

Jumlah produk yang dikategorikan cacat jahitan lepas sebanyak 2.379 produk, dengan persentase nilai sebesar 46,7%. Jumlah produk yang dikategorikan cacat kebersihan dan kode produksi sebanyak 0 produk, dengan persentase nilai sebesar 0%. Berdasarkan hal tersebut, jenis cacat yang paling berpengaruh secara visual adalah kemasan sobek dan jahitan lepas, sehingga kedua jenis cacat ini menjadi prioritas untuk dilakukan perbaikan. Gambar 5 dan Gambar 6 masing-masing menunjukkan *fishbone* kemasan sobek dan *fishbone* diagram jahitan lepas.

Jenis cacat kemasan sobek dipengaruhi faktor-faktor sebagai berikut:

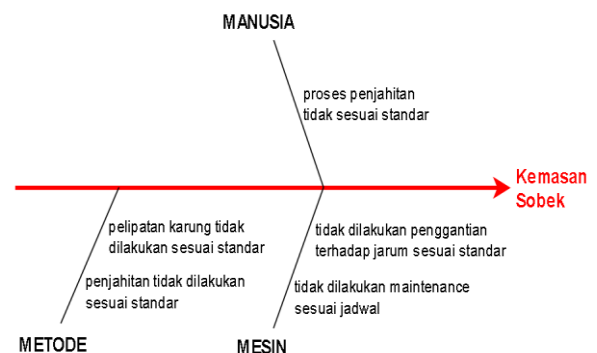
1. Metode

Penyusunan gula rafinasi yang dilakukan tidak sesuai standar karena susunan karung

melebihi luas palet. Ketidaksesuaian ini akan membuat operator *forklift* sulit mengangkut gula rafinasi sehingga timbul kemungkinan kemasan karung tertusuk garpu pada *forklift*. Kemasan karung yang terletak menggantung di luar palet juga menimbulkan beban pada kemasan tidak merata. Ukuran palet yang digunakan PT. AHP yaitu 130 cm x 110 cm, sedangkan gula rafinasi yang disusun memiliki ukuran sebesar 136 x 110 cm.

2. Manusia

Operator tidak melakukan penyusunan sesuai standar karena luas keseluruhan kemasan gula rafinasi yang disusun di *warehouse* mempunyai ukuran yang lebih luas dibandingkan palet yang digunakan. Kondisi tersebut memungkinkan kemasan gula tergores garpu pada *forklift* ketika proses penyusunan dan proses handling.



Gambar 6. Fishbone Diagram Jahitan Lepas

Jenis cacat jahitan lepas dipengaruhi faktor-faktor sebagai berikut:

1. Metode

Proses penjahitan gula rafinasi dilakukan menggunakan mesin semi-otomatis, mesin jenis ini masih melibatkan tenaga manusia. Proses pelipatan dan penjahitan karung dilakukan oleh operator penjahitan. Bagian atas kemasan karung perlu dilipat terlebih dahulu sebelum dilakukan proses penjahitan. Kemasan dilipat dengan ukuran sekitar 2–3 cm. Lipatan antar sisi yang tidak tidak sama atau miring mengakibatkan karung tidak terjahit secara merata dan jahitan akan mudah terlepas. Metode penjahitan yang tidak dilakukan sesuai standar juga akan

Tabel 4. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

<i>Mode of Failure</i>	<i>Effect of Failure</i>	<i>Cause of Failure</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>D</i>	<i>RPN</i>	<i>Rank</i>
Kemasan Sobek	<i>Reject/remelt</i>	Operator tidak melakukan proses penyusunan sesuai standar.	7	6	5	210	2
		Metode penyusunan tidak sesuai standar.	8	8	6	384	1
		Operator tidak melakukan penjahitan sesuai standar.	6	5	6	180	3
		Tidak dilakukan penggantian terhadap jarum sesuai standar.	8	3	5	120	5
Jahitan Lepas	<i>Reject/remelt</i>	Tidak dilakukan <i>maintenance</i> sesuai jadwal.	8	4	5	160	4
		Metode pelipatan karung tidak dilakukan sesuai standar.	6	5	7	210	2
		Metode penjahitan tidak dilakukan sesuai standar.	8	6	7	336	1

Keterangan : S = *Severity* (keparahan); O = *Occurance* (kejadian), dan D = *Detection* (Deteksi)

menyebabkan jahitan karung mudah terlepas. Jarak antar benang yang dijahit pada kemasan harus konsisten satu sama lainnya yaitu memiliki panjang jahitan sepanjang 0,5 cm dengan jarak antar jahitan sepanjang 0,2 cm.

2. Manusia

Manusia menjadi faktor yang berpengaruh terhadap timbulnya produk cacat. operator yang melakukan proses penjahitan tidak sesuai dengan standar akan menyebabkan kemasan yang tidak terjahit secara merata. Standar yang digunakan pada proses penjahitan yaitu panjang jahitan pada kemasan tersebut adalah 0,5 cm dengan jarak antar jahitan sepanjang 0,2 cm.

3. Mesin

Penggantian jarum yang tidak sesuai standar akan menyebabkan jahitan pada karung menjadi tidak rapi, karena jarak antar jahitan tidak sama antar satu sama lainnya. Jahitan yang tidak rapi ini akan menyebabkan jahitan pada bagian atas kemasan karung tersebut mudah untuk terlepas sehingga gula rafinasi di dalam kemasan memiliki kemungkinan terkontaminasi lingkungan sekitar. Jarum jahit perlu dilakukan penggantian apabila kondisinya mulai berkarat, bengkok, dan patah. Kondisi tersebut merupakan standar yang digunakan untuk melakukan penggantian jarum. Selain masalah penggantian jarum yang tidak sesuai

standar, cacat jahitan lepas juga timbul karena mesin jahit yang tidak dilakukan *maintenance* sesuai dengan jadwal. Jadwal *maintenance* mesin jahit adalah setiap seminggu, namun terkadang karena padatnya produksi, *maintenance* mesin jahit dilakukan lebih lambat dari jadwal seharusnya. Keterlambatan ini akan menyebabkan timbulnya masalah pada mesin jahit ketika proses penjahitan dilakukan.

3.4. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Pengendalian kualitas dilakukan dengan menetapkan rencana perbaikan terhadap proses-proses yang berpotensi menimbulkan cacat pada kemasan gula rafinasi. FMEA digunakan untuk menganalisis secara sistematis mode kegagalan potensial suatu proses, efek yang ditimbulkan, dan penyebab terjadinya mode kegagalan tersebut. Rencana perbaikan diprioritaskan untuk penyebab yang mempunyai nilai RPN tertinggi. FMEA digambarkan sebagai metode proaktif dan sistematis untuk mengevaluasi suatu proses guna mengidentifikasi titik-titik kegagalan yang mungkin terjadi guna mencegah kegagalan yang akan datang. FMEA mengikuti proses bertahap yang dimulai dengan penyebab potensial kegagalan, kegagalan yang ada dalam mekanisme kerja saat ini, dan menghitung angka prioritas risiko (RPN), baik untuk sistem yang ada maupun

yang dimodifikasi. Untuk menghitung Angka Prioritas Risiko atau dalam istilah asing disebut *the risk priority number* (RPN), ditentukan nilai *Severity* (Keparahan), *Occurrence* (Kejadian), dan *Detection* (Deteksi). Hasil perkalian antara nilai *Severity* (Keparahan), *Occurrence* (Kejadian), dan *Detection* (Deteksi) menghasilkan RPN. RPN menghasilkan komponen dengan faktor risiko tertinggi dalam proses sistem seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

3.4. Tahap Improve

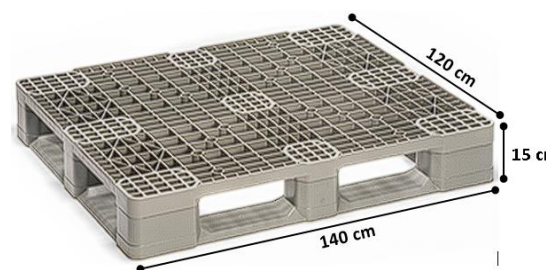
Perbaikan yang dilakukan secara terfokus akan membantu perusahaan dalam menghemat sumber daya dan biaya produksi. Usulan perbaikan diberikan terhadap penyebab yang memiliki nilai RPN tertinggi. Berdasarkan analisis tersebut, cacat kemasan sobek disebabkan oleh faktor metode. Metode penyusunan gula rafinasi yang dilakukan tidak sesuai standar sehingga memiliki potensi untuk menimbulkan cacat. Cacat jahitan lepas juga disebabkan oleh faktor metode penjahitan yang tidak sesuai dengan spesifikasi, sehingga memiliki potensi untuk menimbulkan cacat jahitan lepas.

1. Kemasan sobek

Kemasan sobek diakibatkan karena sistem palet yang kurang tepat. Kemasan karung yang telah diisi gula rafinasi masing-masing memiliki ukuran 68 x 42 cm. Karung tersebut disusun secara horizontal dan vertikal. Sebanyak tiga karung disusun secara horizontal dan sebanyak dua karung disusun secara vertikal sehingga jumlahnya adalah lima karung dalam satu palet. Kemudian karung ditumpuk setinggi sepuluh tumpukan. Ukuran kelima karung tersebut adalah 136 x 110 cm, sedangkan ukuran palet yang saat ini digunakan adalah 130 x 110 cm. Berdasarkan hal tersebut, penulis mengusulkan untuk mengganti ukuran palet yang digunakan. PT. AHP perlu menggunakan palet berukuran 140 x 120 cm seperti ditunjukkan pada Gambar 7 (Girmanová et al., 2017). Ukuran palet perlu lebih besar dari susunan karung gula rafinasi supaya

mempermudah dalam proses penyusunan dan proses *handling* menggunakan *forklift*, dengan demikian risiko kemasan karung tergores garpu pada *forklift* dapat dihindari.

Usulan perbaikan yang disarankan penulis berdasarkan akar masalah timbulnya jenis cacat kemasan sobek dan jahitan lepas adalah sebagai berikut.



Gambar 7. Usulan Ukuran Palet

Usulan lainnya selain mengubah ukuran palet yang digunakan adalah dengan mengurangi dan mengubah susunan gula rafinasi di atas palet. Perbaikan ini diusulkan karena masalah yang sama terjadi pada penelitian yang dilakukan (Suhardi et al., 2019), di mana dengan mengubah ukuran palet tersebut akan mengurangi risiko kecacatan produk. Perbaikan tersebut akan mempermudah operator ketika melakukan proses *handling* menggunakan *forklift*.

2. Jahitan lepas

Jahitan lepas diakibatkan karena proses penjahitan tidak dilakukan sesuai standar, dimana jarak antar jahitan berbeda satu sama lain. Masalah tersebut disebabkan oleh mesin jahit yang terkadang bermasalah sehingga perusahaan perlu melakukan *preventive maintenance* secara berkala. Melalui tindakan ini masalah pada mesin dapat dihindari.

Selama proses penjahitan berlangsung, dibutuhkan konsentrasi dan ketelitian operator penjahitan agar masalah ketidakkonsistenan ini dapat segera dideteksi. Perusahaan dapat meningkatkan konsentrasi dan ketelitian operator melalui penyediaan lingkungan kerja yang nyaman (Fajrin & Sulistiyowati, 2018).

Lingkungan kerja yang nyaman adalah lingkungan yang memenuhi aspek ergonomi seperti kenyamanan postur tubuh dalam melakukan proses penjahitan, kondisi lingkungan yang tidak bising, pencahayaan yang cukup, dan lainnya.

4. Kesimpulan

PT. AHP menghasilkan rata-rata nilai DPMO sebesar 97 dan berada pada level 5,26 *sigma*, di mana kinerja yang dihasilkan setara dengan rata-rata industri dunia. Faktor yang menyebabkan timbulnya jenis cacat kemasan sobek berasal dari faktor manusia dan metode. Faktor yang menyebabkan timbulnya jenis cacat jahitan lepas berasal dari faktor manusia, metode, dan mesin. Usulan perbaikan diprioritaskan untuk dilakukan pada penyebab mode kegagalan yang memiliki nilai RPN tertinggi. Penyebab mode kegagalan kemasan sobek yang memiliki nilai RPN tertinggi adalah penyusunan gula rafinasi yang telah dikemas tidak sesuai standar dengan RPN sebesar 384. Perbaikan yang diusulkan adalah melakukan penggantian ukuran palet atau mengubah susunan gula rafinasi di atas palet. Penyebab mode kegagalan yang memiliki nilai RPN tertinggi adalah proses penjahitan tidak dilakukan sesuai standar dengan RPN sebesar 336. Perbaikan yang diusulkan adalah melakukan *preventive maintenance* secara berkala dan menyediakan lingkungan kerja yang nyaman bagi operator di area *packing*.

Daftar Pustaka

- Azizah, T. N., Hunusalela, Z. F., & Sinambela, S. (2024). Usulan Perbaikan Kualitas Pada Proses Produksi Tahu dengan Metode Six Sigma dan Poka Yoke. *Teknoin*, 29(1), 15–24. <https://doi.org/10.20885/teknoin.vol29.is1.art2>
- BSN. (2011). Gula kristal – Bagian 2: Rafinasi (Refined sugar). SNI 3140.2:2011. *Badan Standarisasi Nasional*.
- Darmawan, D. S., Nugraha, A. T., & Wahyudi, R. (2022). Peramalan Deret Berkala dalam Mengurangi Bullwhip Effect pada Sistem Rantai Pasok Komoditas Sawit pada PTPN VII, Lampung, Indonesia. *Agro Bali : Agricultural Journal*, 5(2), 331–341. <https://doi.org/10.37637/ab.v5i2.956>
- Delgadillo, R. R., Medini, K., & Wuest, T. (2022). A DMAIC Framework To Improve Quality And Sustainability In Additive Manufacturing—A Case Study. *Sustainability*, 14(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su14010581>
- Dhingra, A. K., Kumar, S., & Singh, B. (2019). Cost reduction and quality improvement through Lean-Kaizen concept using value stream map in Indian manufacturing firms. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 10(4), 792–800. <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00810-z>
- Fajrin, M. T., & Sulistiyowati, W. (2018). Pengurangan Defect Pada Produk Sepatu Dengan Mengintegrasikan Statistical Process Control (SPC) Dan Root Cause Analysis (RCA) Studi Kasus PT. XYZ. *Spektrum Industri*, 16(1), 29–40. <https://doi.org/10.12928/si.v16i1.9778>
- Fantasia, I. F., & Wahyudi, R. (2024). Identifikasi Pengendalian Kualitas Produk Menggunakan Metode Statistical Process Control Pada PT X. *INVASI : Jurnal Industri & Inovasi*, 1(2), 1–11.
- Gaikwad, L., & Sunnapwar, V. (2020). An integrated Lean, Green and Six Sigma strategies: A systematic literature review and directions for future research. *TQM Journal*, 32(2), 201–225. <https://doi.org/10.1108/TQM-08-2018-0114>
- Girmanová, L., Šolc, M., Kliment, J., Divoková, A., & Mikloš, V. (2017). Application of Six Sigma Using DMAIC Methodology In The Process Of Product Quality Control In Metallurgical Operation. *Acta Technologica Agriculturae*, 20(4), 104–109. <https://doi.org/10.1515/ata-2017-0020>
- Goetsh, D. L., & Davis, S. (2014). Quality Management For Organizational Excellence : Introduction To Total

- Quality. In *Case Studies in Work, Employment and Human Resource Management* (Seventh Ed). Pearson Education Limited.
<https://doi.org/10.4337/9781788975599.00039>
- Grigoryan, E., & Golubkova, I. (2020). Seven Tools for Quality Management and Control: Theory and Practice. *International Conference on Economic, Management and Technologies 2020 (ICEMT 2020)*, 139, 528–535.
<https://doi.org/10.2991/aebmr.k.200509.094>
- Haryana, A., & Wicaksono, B. (2016). Gula Rafinasi vs Gula Rakyat Di Pasar Konsumen. *Media PUSDIKLAT*, 33–38.
- Khan, S. A., Kaviani, M. A., J. Galli, B., & Ishtiaq, P. (2019). Application of continuous improvement techniques to improve organization performance. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(2), 542–565.
<https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2017-0048>
- Kowalik, K. (2018). Six Sigma As A Method Of Improving The Quality Of Service Process. *Production Engineering Archives*, 19(19), 10–15.
<https://doi.org/10.30657/pea.2018.19.03>
- Kurniawan, T., Jayanudin, Kustiningsih, I., & Adha Firdaus, M. (2018). Palm Sap Sources, Characteristics, and Utilization in Indonesia. *Journal of Food and Nutrition Research*, 6(9), 590–596.
<https://doi.org/10.12691/jfnr-6-9-8>
- Pakdil, F. (2020). *Six Sigma for Students A Problem-Solving Methodology* (1st ed.). Palgrave Macmillan, Cham.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-40709-4> ©
- Sugiyono. (2020). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan Kombinasi (Mixed Methods). Edisi Keenam. In *Alfabeta*. Alfabeta.
- Suhardi, A. R., Ichsani, S., & Lasniroha S, T. (2019). Pengendalian Kualitas Dalam Proses Produksi Percetakan Sablon Pada Kaos Oblong Di Fload Sp. *Junal Ilmiah Bisnis, Modan, Dan UMKM*, 2(1), 1–8.
- Sulaiman, A. A., Sulaeman, Y., Mustikasari, N., Nursyamsi, D., & Syakir, A. M. (2019). Increasing Sugar Production In Indonesia Through Land Suitability Analysis And Sugar Mill Restructuring. *Land*, 8(4), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/land8040061>
- Untoro, O. B., & Iftadi, I. (2020). Six Sigma As A Method For Controlling And Improving The Quality Of Bed Series Products. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 19(2), 131–141.
<https://doi.org/10.23917/jiti.v19i2.11623>
- Wahyudi, R., Abdillah, Z., & Armadani, E. (2023). Usulan Perbaikan Lingkungan Kerja Di Area Produksi. *Jurnal INVASI*, 1(1), 12–22.
<http://jurnal.utu.ac.id/invasi/issue/view/533>
- Widjajanto, S., & Purba, H. H. (2021). Six Sigma Implementation In Indonesia Industries And Businesses: A Systematic Literature Review. *Journal of Engineering and Management in Industrial System*, 9(1), 23–34.
<https://doi.org/10.21776/ub.jemis.2021.009.01.3>