DEVELOPMENT DESIGN OF FIN HULL TRADITIONAL FISHING VESSEL FOR ACTIVITIES

Samuel Febriary Khristyson [1*], Mohd. Ridwan [1], Hanggara Satuhu Hutama[1] , Ridho Wahyu Pramono[1], Arjuna Diestiaputra Musyaffa [1]

[1] Department of Industrial Technology, Vocational Collage , Diponegoro University

Gubernur Mocthar, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275

samuelfebriarykhr@staff.undip.ac.id [1]

Abstrak

Pengembangan kapal diperlukan untuk meningkatkan aktivitas laut di sejumlah lokasi pesisir, seperti kinerja sistem propulsi kapal atau penciptaan desain gerak bergulir dan pitching. mirip dengan bagaimana konsep desain representasional bekerja pada kapal. Tujuan dari penelitian ini adalah pengembangan desain sirip kapal untuk aktivitas masyarakat tradisional, sehingga dapat mengembangkan model perahu nelayan tradisional dengan ukuran sirip yang dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Metode perbandingan akan digunakan untuk membandingkan hasil stabilitas kapal berdasarkan keadaan terbaik untuk wilayah pelayaran. Untuk menghitung pendekatan lengan pembalik kapal, perlu mempertimbangkan berat kapal di samping temuan perhitungan stabilitas. Nilai titik keseimbangan atas terhadap gaya gravitasi bervariasi tergantung pada kondisi kapal di mana sudut kritis oleng maksimum berada pada 60 derajat. Ketika kapal terisi penuh, jarak titik keseimbangan tertinggi bervariasi sebesar 11%. Jarak antara titik gravitasi kapal dan titik keseimbangan atas berkurang untuk kapal dengan dan tanpa sirip ketika sudut oleng mencapai maksimumnya. Desain tersebut menggambarkan bahwa saat merancang kapal dengan sirip untuk perairan dangkal, ada sejumlah elemen yang perlu diperhitungkan, termasuk kecepatan maksimum dan stabilitas kapal, yang berguna untuk operasi penangkapan ikan. Berdasarkan desain lambung tersebut biaya pra-perencanaan tidak terlalu mahal dan menunjukkan efisiensi waktu produksi.

Kata kunci : stabilitas, sirip, kapal ikan tradisional.

Abstract

Ship development is necessary to boost marine activities in a number of coastal locations, such as the performance of ship propulsion systems or the creation of rolling and pitching motion designs. similar to how a representational design concept performs on a ship. The goal of this development design of fin for traditional community activities is to develop traditional fishing boat models with different standard sizes fin in comparison to earlier research. The comparison's findings will be used to compare ship stability outcomes based on the best circumstances for the shipping region. In order to calculate the ship's turning arm approach, it is required to consider the ship's weight in addition to the stability calculation findings. The value of the top equilibrium point to the force of gravity varies depending on the ship situation where the critical angle of maximum roll is at 60 degrees. When the ship is completely laden, the highest equilibrium point's distance varies by 11%. The distance between the ship's gravity point and upper equilibrium point decreases for both ships with and without fins when the roll angle is at its maximum. Design illustrates that while designing a ship with fin for shallow waters, there are a number of elements to take into account, including the ship's maximum speed and stability, useful for fishing operations. According to the hull's design, pre-planning costs are not excessively expensive and demonstrate the efficiency of production time.

Key words : *stability, fins, traditional fishing vessel.*

INTRODUCTION

Ships are among the most suitable modes of transportation to assist coastal activities [1]. The Tambak Lorok Semarang area is one of the coastal areas where many people are engaged in marine activities. The government has provided assistance to a number of Semarang neighborhoods to promote communal activities along the coast, including fishing. Ship development is necessary to boost

marine activities in a number of coastal locations, such as the performance of ship propulsion systems or the creation of rolling and pitching motion designs, similar to how a representational design concept performs on a ship [2]. Permits more convenient load levels, operational access, and the prioritization of ease over speed. The form of the hydrostatic table or curve that characterizes the different kinds of fishing vessels in a shipping region can be used to visualize a design [3]. To create a basic design that incorporates the optimization of earlier fishing vessels, a number of characteristics have been described. Between the weight of the structure and the load brought on by the ship's rollout, a construction design may have an impact on the ship's stability [4]. The performance of the overall resistance that influences the ship's maneuverability at sea is determined by the shape of the superstructure construction [5][6].

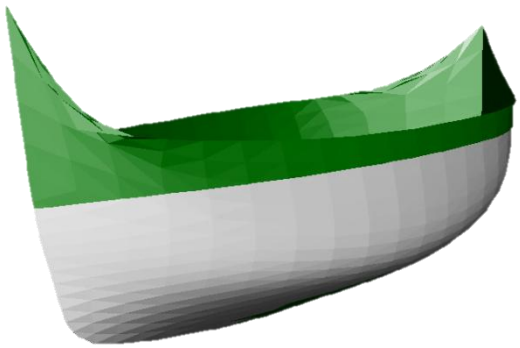


Figure 1. Design Hull Traditional Fishing Vessel

The behavior of shallow water fishing vessels and the impact of hull width on obstacles encountered on fishing vessels are demonstrated by a prior study on fishing boat objects [7]. Additionally, the study comparison of computer results with hydrostatic experiments on towing tanks and prototype ships. The influence of construction design differs by 18% between the simulation findings, which reach 25 knots, and the prototype's 21 knots [8]. However, as the analysis was conducted on the catamaran hull class and was restricted to vessels under 12 meters in length and under 9 tons in weight, more research on monohull vessels under 5 GT is required. According to the study, which compares monohull and twin-hull ship designs, this is consistent with the optimization of high-speed ro-ro passenger ship design. The main size of the ship is depicted in the distribution of spots/dots suggesting design alternatives, and the four best design rankings are determined using the GA algorithm optimization method [9], [10]. Nevertheless, further comparisons are required to depict the ship speed ratio because only three speed variables are used, with a 5-knot interval. When the object's computation excludes the ship's equipment, it may have an impact on the ship's shape requirements. A curve that depicts the estimated metacenter height of the vessel as well as the displacement of the vessel on different types of fishing vessels was described in a prior study for small fishing vessels based on loading conditions. Similar to gill nets, long liners, and jigging in South Korean waters under different circumstances, they are compared and combined into a single curve.

This study clearly demonstrates the correlation and relationship with earlier studies, specifically the impact of hull shape alterations on fishing vessels' stability and resistance performance. This establishes a provisional hypothesis that the features of shallow seas around Java's north coast, particularly Semarang in Tambak Lorok, are described by design optimization. The same is true of earlier research on the form and design of ship optimization in particular fields. Overall, the problem in this paper is limited to stability calculations from conditions 0^0 to 90^0, ship resistance based on the resistance encountered, displacement calculations on fully loaded ship conditions, and the use of data from three comparison ships. The goal of this development design of fin for traditional community activities is to develop traditional fishing boat models with different standard sizes fin in comparison to earlier research in an attempt to meet the various criteria required with comparative data, design and calculate criteria with computing software, and produce optimal design outputs. With its ability to float on water and its ability to load people or cargo, the ship is a construction model whose speed is dependent on the kind of water it passes [11], [12]. One of the primary design requirements for all floating devices is stability, but since fishing boats must always operate with a reasonably high stability load, stability is more crucial for them than for other types [13][14], [15], [16]. The capacity of a ship to regain its initial position (upright) following tilting caused by internal and external forces or following a temporal moment is known as ship stability [17]. Ship stability values calculated from several ship model development variants are compared.

METHOD

Metode The main dimensions of the ship are as follows, see table 1.

Table 1. Principal Dimention.

Dimension	Value
Lwl	12,28 m

Dimension	Value
B	3,0 m
T	1,7 m
Wetted Area	183,358 m^2
Displacement	34,05 ton
Volume (Displacement)	33,20 m^3
CB	0,54
L/B	4,09
B/T	1,76

Given the rather small hull design of this fishing boat, stability is an issue that must be taken into account. The comparison's findings will be used to compare ship stability outcomes based on the best circumstances for the shipping region [18], [19]. In order to calculate the ship's turning arm approach, as shown in equation 1, it is required to consider the ship's weight in addition to the stability calculation findings.

$$\mathrm{GM} = (\mathrm{BB}' + \mathrm{MB}) - (\mathrm{GG}') \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

Where GM is the distance between the ship's point of gravity and Metasentra, w is its displacement weight, MB is the distance between Metasentra and Bouyancy (upward buoyancy), GG' is the distance between the ship's keel point (Keel) and its point of gravity, BB' is the distance between the ship's keel point (Keel) and the Bouyancy point, and x is the angle created from the ship's roll angle. Further calculations can be made regarding the value of the connection arm or arm that allows the ship to return to its initial location. The Coupling Moment (Inertia Stability Moment), which is modified to account for the degree of rollout of each condition aboard the ship, is calculated. Therefore, if expressed as in equation 2:

$$S(n^0) = w \,.\, GM \sin(n^0) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

Where w is the weight of the ship's displacement, GM is the distance between the Gravity point and the Metasentra point, n^0 is the angle generated from the angle of the ship's roll, and $S(n^0)$ is the righting arm/returning moment for a specific angle. The flow of this research is based on the previous design then development is carried out by calculating its CSA. Furthermore, ship displacement data for ship stability is used for development, see Figure 2.

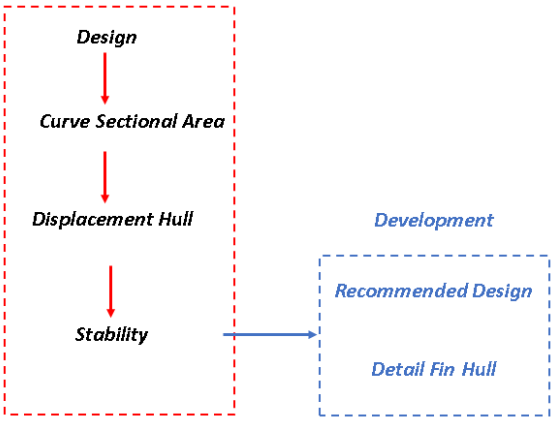


Figure 2. Flow Diagram Method

The development was carried out based on the results of the calculation recommendations of several models [20], [21], then the construction of the ship's hull fin was added to later become a reference for the ship's fin design.

RESULT AND DISCUSSION

Based on the results of the calculation analysis to obtain the area value of each section of the ship. The widest value was obtained in the section of the ship in the midship section of 3.93 m^2. This shows that the design of traditional fishing boats has the characteristics of the stern and bow sections having identical shapes, see Figure 3.

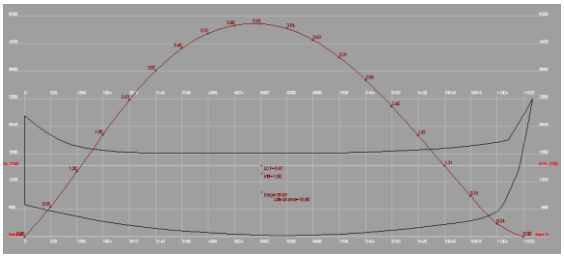


Figure 3. CSA traditional fishing vessels

Furthermore, hydrostatic data can be used to calculate the stability characteristics of a ship, the data used is the ship's displacement in tons. It can be seen that the ship's design with the addition of fins provides a shape on the right and left side of the hull bilge, see figure 4.

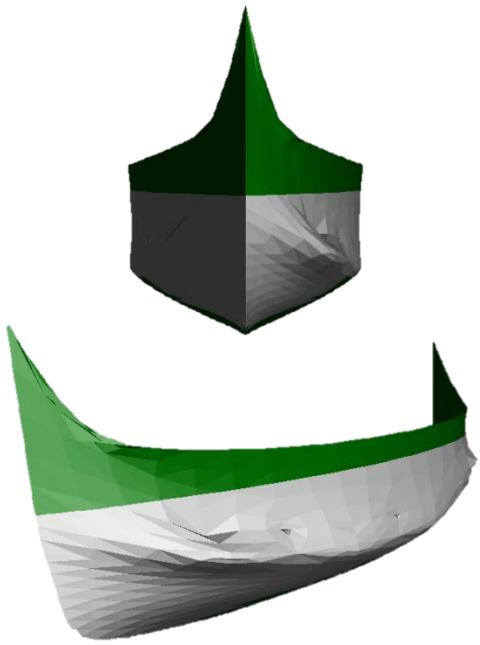


Figure 4. Addition Fin to ship design

Traditional fishing vessels with the addition of fins do not experience changes in the main dimensions of the ship. Modifications to the addition of fins still consider the overall width of the ship. With the presence of fins on the hull of this ship, it adds to the ship's ability to return to its original position to be more comfortable or not too stiff. The moment of stability of the ship can be calculated using equation 2, so that the results of the cross curve are obtained using the numerical method, as in Figure 5.

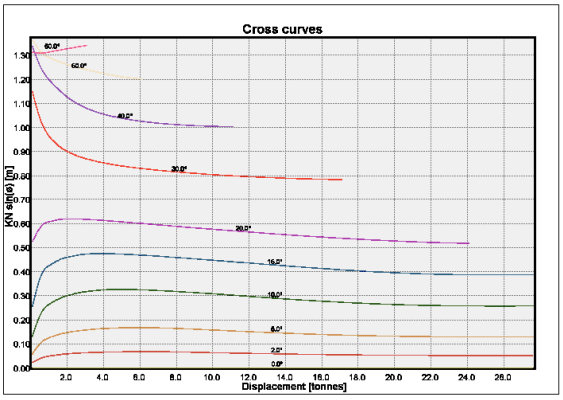


Figure 5. Cross Curve in Fishing Boat Fin Design

From the results of the cross curve calculation, it can be seen that the ship experiences the largest righting arm distance when the ship experiences a roll starting at an angle of 50 degrees. This makes ships using this fin quite comfortable for the waters of the northern coast of Java because they only have an average wave height in cloudy conditions of around 1-3 meters.

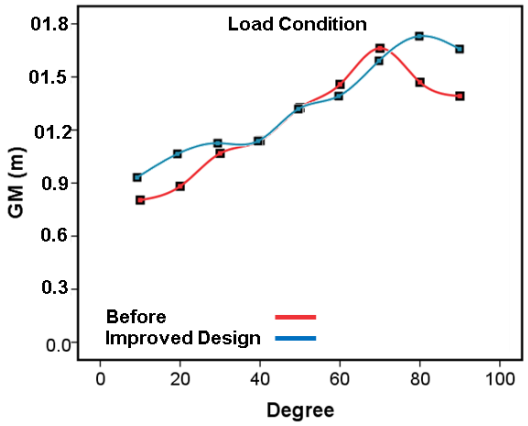


Figure 6. Comparison of ship on Load Conditions

And then, for each condition of the calculation analysis results, we group them and then form a trend as seen in table 6. Where the difference occurs in each ship condition where the critical angle of maximum roll is at 60 degrees and the value of the upper equilibrium point to the force of gravity in each ship condition has a difference. There is an 11% difference in the distance of the upper equilibrium point when the ship is fully loaded. In the condition of the maximum roll angle, both ships without fins and ships with fins each experience a decrease in the distance of the upper equilibrium point to the ship's gravity point.

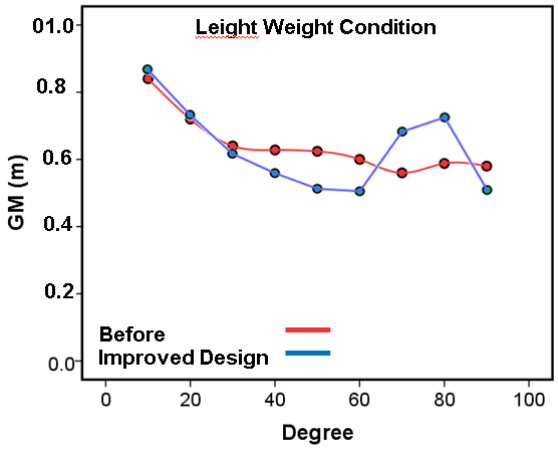


Figure 7. Comparison when Leight Weight Condition

However, in the condition of the ship without a load, it means that only the load of fishing gear and the ship's motor has a downward trend for each condition of the ship's roll. This means that the distance of the center of gravity to the upper

equilibrium point of the ship has a decreasing value, which causes the movement of the ship when it receives external force to have rigid stability. In the design of a ship that has fins that tend to have a roll angle above 60 degrees, the distance from the center of gravity to the upper equilibrium is quite large. This shows that the stability value is good and the level of comfort of using the ship is more stable or not rigid.

CONCLUSION

Additional information on the ship's development can be obtained by estimating the ship's stability by calculating the force points that are present while the ship is in operation. You can compare the findings and analysis of ship stability and the connection between resistance and ship speed by looking at earlier studies. The picture illustrates that while designing a ship with fin for shallow waters, there are a number of elements to take into account, including the ship's maximum speed and stability, useful for fishing operations. According to the hull's design, pre-planning costs are not excessively expensive and demonstrate the efficiency of production time. The impact of different representative hull construction types on shallow seas, particularly the stability and resistance of conventional fishing boats, must therefore be understood. The findings demonstrated that the engine's effective power and the stability diagram may forecast the ship's performance and offer an optimization model to forecast the design of conventional ships in shallow waters.

Ships will encounter disruptions, particularly when operations take place at an angle greater than 15 degrees. This can, at the very least, impact fishermen's ability to locate fish and support themselves. For the purpose of optimizing current fishing boats, this study focuses on static stability and a proposal for an optimal design in terms of hull form, within the constraints of the challenge. Although the method used is not very thorough, it can nonetheless serve as a source of information for authors conducting further research.

REFFERENCES

[1] B. W. Ziliwu, "STUDI KONSUMSI BAHAN BAKAR SOLAR PADA MESIN INDUK KM. FORTUNA," *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2 SE-, Oct. 2022, doi: 10.33019/jm.v8i2.3015.

[2] W. Xu, J. Jiao, G. Xu, M. Zhang, and Y. Zou, "Intelligent control of flap-type fin stabilizer for ship roll motion reduction," *Ocean Eng.*, vol. 323, p. 120630, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120630

[3] M. Koričan, N. Vladimir, N. Hadžić, and V. Ložar, "Life-cycle cost assessment of hull protection technologies considering their effect on the environmental friendliness of fishing vessels," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 209, p. 117137, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117137.

[4] S. Ma'arif, M. A. Budiyanto, Sunaryo, and G. Theotokatos, "Progress in hybrid and electric propulsion technologies for fishing vessels: An extensive review and prospects," *Ocean Eng.*, vol. 316, p. 120017, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120017

[5] M. Gil, J. Montewka, and P. Krata, "Predicting a passenger ship's response during evasive maneuvers using Bayesian Learning," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 256, p. 110765, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110765.

[6] S. F. Khristyson, Jamari, and A. P. Bayuseno, "Design of Fishing Vessel 5 GT for Traditional Fishing Community Activities," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1096, no. 1, p. 12030, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1096/1/012030.

[7] S. Bairami-Khankandi, V. Bolbot, A. BahooToroody, and F. Goerlandt, "A systems-theoretic approach using association rule mining and predictive Bayesian trend analysis to identify patterns in maritime accident causes," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 258, p. 110911, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110911.

[8] S. Sulaiman, S. D. Said, S. F. Khristyson, and I. D. Cahyo, "Desain Konstruksi Bar Keel Pada Kapal Kayu Nelayan," *J. Pengabdi. Vokasi*, vol. 1, no. 3, pp. 153–158, Jun. 2020, Accessed: Aug. 09, 2020. [Online]. Available: https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpv/article/view/5382.

[9] S. Liu, X.-J. Cui, and C. Lyu, "Analysis and prediction of fishing capacity of marine fishing vessels based on generalized additive models," *Fish. Res.*, vol. 282, p. 107268, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.fishres.2025.107268.

[10] M. Sun, H. Ye, J. Liu, T. Luan, and H. Lian, "Analysis of lift-drag characteristics and design

of collaborative anti-rolling control system for variable-diameter Magnus rotating roll stabilizer," *Ocean Eng.*, vol. 324, p. 120713, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120713

[11] H. Bao, Y. Wang, H. Zhu, X. Li, and F. Yu, "Numerical and experimental analysis of motion control of offshore fishing unmanned underwater vehicle in ocean environment," *Ocean Eng.*, vol. 295, p. 116886, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116886

[12] D. Yang, X. Li, and L. Zhang, "A novel vessel trajectory feature engineering for fishing vessel behavior identification," *Ocean Eng.*, vol. 310, p. 118677, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118677

[13] Y. Zhang, X. Huang, X. Chen, B. Liu, X. Kong, and Q. Deng, "Optimal configuration and three-dimensional light field of fishing lights on a squid fishing boat obtained using a space matrix algorithm," *Fish. Res.*, vol. 281, p. 107223, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.fishres.2024.107223.

[14] S. F. Khristyson, S. Sugeng, M. Ridwan, and A. K. Yusim, "Improved Design 5 (GT) Boat for Traditional Community Activities," *Int. J. Eng. Invent.*, vol. 13, no. 1, pp. 50–57, 2024, [Online]. Available: http://www.ijeijournal.com/papers/Vol13-Issue1/13015057.pdf.

[15] S. F. Khristyson, M. Ridwan, and A. K. Yusim, "Analisis Pengaruh Pengguanan Alat Bantu Bending pada Proses Bending High Density Polietiline (HDPE) Sheet untuk Lambung Kapal Ikan dengan Metode Heat Treatment," *Simetris J. Tek. Mesin, Elektro dan Ilmu Komput.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–10, 2024, [Online]. Available: https://jurnal.umk.ac.id/index.php/simet/article/view/11897.

[16] S. Sulaiman and S. F. Khristyson, "Analisa Sambungan Groove pada Pengelasan HDPE sebagai Material Alternatif Konstruksi Kapal Kayu Nelayan," *J. Inovtek Polbeng*, vol. 12, no. 1, pp. 9–14, 2022, doi: 10.35314/ip.v12i1.2295.

[17] M. Iqbal, M. Terziev, T. Tezdogan, and A. Incecik, "Hull form optimisation to minimise the total resistance and dynamic responses of small fishing vessels," *Ocean Eng.*, vol. 321, p. 120357, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120357

[18] W. Xu, M. Li, G. Xu, J. Jiao, and H. Liu, "Study on the intelligent anti-roll control of a ship at zero speed based on flapping fins," *Ocean Eng.*, vol. 319, p. 120263, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120263

[19] L. F. Calvo, M. E. Diego, and M. Astolfi, "Techno-economic analysis of a novel clc reactor-based system for energy storage and back-up power in a cruise ship," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 26, p. 100885, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100885.

[20] K. Kadriadi *et al.*, "Design And Construction Of Gear Wheel Alignment Setting Tools As A Learning Media In The Machine Repair And Maintenance Laboratory," *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2 SE-, Nov. 2023, doi: 10.33019/jm.v9i2.4509.

[21] H. Tira and M. Zulfikar, "Design Of Tapered Wind Turbine Using Various Naca 24112 Airfoils In Semayan Village Central Lombok Regency," *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2 SE-, Nov. 2024, doi: 10.33019/jm.v10i2.4704.

DEVELOPMENT DESIGN OF FIN HULL TRADITIONAL FISHING VESSEL FOR ACTIVITIES

Samuel Febriary Khristyson [1], Mohd. Ridwan [1], Hanggara Satuhu Hutama [1], Ridho Wahyu Pramono [1], Arjuna Diestiaputra Musyaffa [1]

[1] Department of Industrial Technology, Vocational Collage , Diponegoro University

Gubernur Mocthar, Tembalang, Semarang, Indonesia, 50275

samuelfebriarykhr@staff.undip.ac.id [1]

Abstrak

Pengembangan kapal diperlukan untuk meningkatkan aktivitas laut di sejumlah lokasi pesisir, seperti kinerja sistem propulsi kapal atau penciptaan desain gerak bergulir dan pitching. mirip dengan bagaimana konsep desain representasional bekerja pada kapal. Tujuan dari penelitian ini adalah pengembangan desain sirip kapal untuk aktivitas masyarakat tradisional, sehingga dapat mengembangkan model perahu nelayan tradisional dengan ukuran sirip yang dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Metode perbandingan akan digunakan untuk membandingkan hasil stabilitas kapal berdasarkan keadaan terbaik untuk wilayah pelayaran. Untuk menghitung pendekatan lengan pembalik kapal, perlu mempertimbangkan berat kapal di samping temuan perhitungan stabilitas. Nilai titik keseimbangan atas terhadap gaya gravitasi bervariasi tergantung pada kondisi kapal di mana sudut kritis oleng maksimum berada pada 60 derajat. Ketika kapal terisi penuh, jarak titik keseimbangan tertinggi bervariasi sebesar 11%. Jarak antara titik gravitasi kapal dan titik keseimbangan atas berkurang untuk kapal dengan dan tanpa sirip ketika sudut oleng mencapai maksimumnya. Desain tersebut menggambarkan bahwa saat merancang kapal dengan sirip untuk perairan dangkal, ada sejumlah elemen yang perlu diperhitungkan, termasuk kecepatan maksimum dan stabilitas kapal, yang berguna untuk operasi penangkapan ikan. Berdasarkan desain lambung tersebut biaya pra-perencanaan tidak terlalu mahal dan menunjukkan efisiensi waktu produksi.

Kata kunci : stabilitas, sirip, kapal ikan tradisional.

Abstract

Ship development is necessary to boost marine activities in a number of coastal locations, such as the performance of ship propulsion systems or the creation of rolling and pitching motion designs. similar to how a representational design concept performs on a ship. The goal of this development design of fin for traditional community activities is to develop traditional fishing boat models with different standard sizes fin in comparison to earlier research. The comparison's findings will be used to compare ship stability outcomes based on the best circumstances for the shipping region. In order to calculate the ship's turning arm approach, it is required to consider the ship's weight in addition to the stability calculation findings. The value of the top equilibrium point to the force of gravity varies depending on the ship situation where the critical angle of maximum roll is at 60 degrees. When the ship is completely laden, the highest equilibrium point's distance varies by 11%. The distance between the ship's gravity point and upper equilibrium point decreases for both ships with and without fins when the roll angle is at its maximum. Design illustrates that while designing a ship with fin for shallow waters, there are a number of elements to take into account, including the ship's maximum speed and stability, useful for fishing operations. According to the hull's design, pre-planning costs are not excessively expensive and demonstrate the efficiency of production time.

Key words : *stability, fins, traditional fishing vessel.*

INTRODUCTION

Ships are among the most suitable modes of transportation to assist coastal activities [1]. The Tambak Lorok Semarang area is one of the coastal areas where many people are engaged in marine activities. The government has provided assistance to a number of Semarang neighborhoods to promote communal activities along the coast, including fishing. Ship development is necessary to boost marine activities in a number of coastal locations, such as the performance of ship propulsion systems or the creation of rolling and pitching motion designs, similar to how a representational design concept performs on a ship [2]. Permits more convenient load levels, operational access, and the prioritization of ease over speed. The form of the hydrostatic table or curve that characterizes the different kinds of fishing vessels in a shipping region can be used to visualize a design [3]. To create a basic design that incorporates the optimization of earlier fishing vessels, a number of characteristics have been described. Between the weight of the structure and the load brought on by the ship's rollout, a construction design may have an impact on the ship's stability [4]. The performance of the overall resistance that influences the ship's maneuverability at sea is determined by the shape of the superstructure construction [5][6].

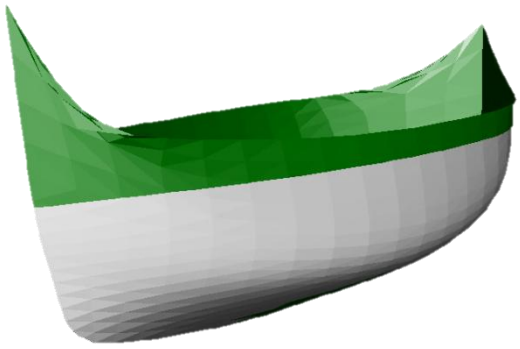


Figure 1. Design Hull Traditional Fishing Vessel

The behavior of shallow water fishing vessels and the impact of hull width on obstacles encountered on fishing vessels are demonstrated by a prior study on fishing boat objects [7]. Additionally, the study comparison of computer results with hydrostatic experiments on towing tanks and prototype ships. The influence of construction design differs by 18% between the simulation findings, which reach 25 knots, and the prototype's 21 knots [8]. However, as the analysis was conducted on the catamaran hull class and was restricted to vessels under 12 meters in length and under 9 tons in weight, more research on monohull vessels under 5 GT is required. According to the study, which compares monohull and twin-hull ship designs, this is consistent with the optimization of high-speed ro-ro passenger ship design. The main size of the ship is depicted in the distribution of spots/dots suggesting design alternatives, and the four best design rankings are determined using the GA algorithm optimization method [9], [10]. Nevertheless, further comparisons are required to depict the ship speed ratio because only three speed variables are used, with a 5-knot interval. When the object's computation excludes the ship's equipment, it may have an impact on the ship's shape requirements. A curve that depicts the estimated metacenter height of the vessel as well as the displacement of the vessel on different types of fishing vessels was described in a prior study for small fishing vessels based on loading conditions. Similar to gill nets, long liners, and jigging in South Korean waters under different circumstances, they are compared and combined into a single curve.

This study clearly demonstrates the correlation and relationship with earlier studies, specifically the impact of hull shape alterations on fishing vessels' stability and resistance performance. This establishes a provisional hypothesis that the features of shallow seas around Java's north coast, particularly Semarang in Tambak Lorok, are described by design optimization. The same is true of earlier research on the form and design of ship optimization in particular fields. Overall, the problem in this paper is limited to stability calculations from conditions 0^0 to 90^0, ship resistance based on the resistance encountered, displacement calculations on fully loaded ship conditions, and the use of data from three comparison ships. The goal of this development design of fin for traditional community activities is to develop traditional fishing boat models with different standard sizes fin in comparison to earlier research in an attempt to meet the various criteria required with comparative data, design and calculate criteria with computing software, and produce optimal design outputs. With its ability to float on water and its ability to load people or cargo, the ship is a construction model whose speed is dependent on the kind of water it passes [11], [12]. One of the primary design requirements for all floating devices is stability, but since fishing boats must always operate with a reasonably high stability load, stability is more crucial for them than for other types [13][14], [15], [16]. The capacity of a ship to regain its initial position (upright) following tilting caused by internal and external forces or following a temporal moment is known as ship stability [17]. Ship stability values calculated from several ship model development variants are compared

METHOD

The main dimensions of the ship are as follows, see table 1.

Table 1. Principal Dimention

Dimension	Value
Lwl	12,28 m
B	3,0 m
T	1,7 m
Wetted Area	183,358 m^2
Displacement	34,05 ton
Volume (Displacement)	33,20 m^3
CB	0,54
L/B	4,09
B/T	1,76

Given the rather small hull design of this fishing boat, stability is an issue that must be taken into account. The comparison's findings will be used to compare ship stability outcomes based on the best circumstances for the shipping region [18], [19]. In order to calculate the ship's turning arm approach, as shown in equation 1, it is required to consider the ship's weight in addition to the stability calculation findings.

$$GM = (BB' + MB) - (GG') \quad \text{.....(1)}$$

Where GM is the distance between the ship's point of gravity and Metasentra, w is its displacement weight, MB is the distance between Metasentra and Bouyancy (upward buoyancy), GG' is the distance between the ship's keel point (Keel) and its point of gravity, BB' is the distance between the ship's keel point (Keel) and the Bouyancy point, and x is the angle created from the ship's roll angle. Further calculations can be made regarding the value of the connection arm or arm that allows the ship to return to its initial location. The Coupling Moment (Inertia Stability Moment), which is modified to account for the degree of rollout of each condition aboard the ship, is calculated. Therefore, if expressed as in equation 2:

$$S(n^0) = w \,.\, GM \sin(n^0) \quad \text{.....(2)}$$

Where w is the weight of the ship's displacement, GM is the distance between the Gravity point and the Metasentra point, n^0 is the angle generated from the angle of the ship's roll, and $S(n^0)$ is the righting arm/returning moment for a specific angle. The flow of this research is based on the previous design then development is carried out by calculating its CSA. Furthermore, ship displacement data for ship stability is used for development, see Figure 2.

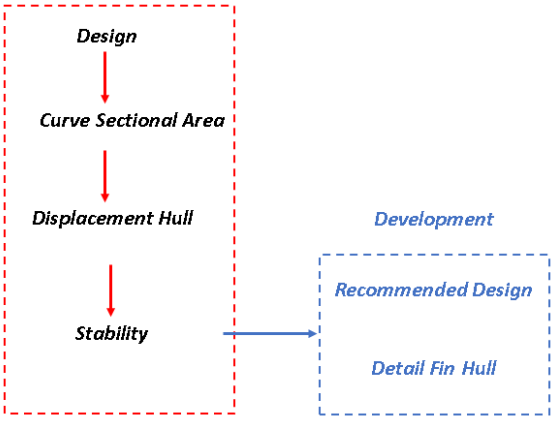


Figure 2. Flow Diagram Method

The development was carried out based on the results of the calculation recommendations of several models [20], [21], then the construction of the ship's hull fin was added to later become a reference for the ship's fin design.

RESULT AND DISCUSSION

Based on the results of the calculation analysis to obtain the area value of each section of the ship. The widest value was obtained in the section of the ship in the midship section of 3.93 m^2. This shows that the design of traditional fishing boats has the characteristics of the stern and bow sections having identical shapes, see Figure 3.

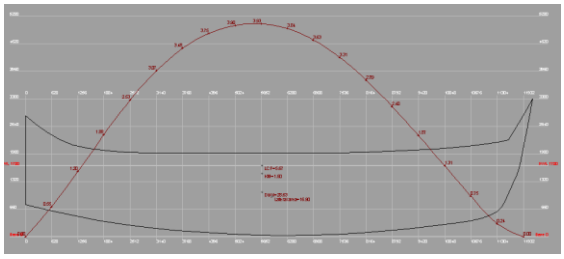


Figure 3. CSA traditional fishing vessels

Furthermore, hydrostatic data can be used to calculate the stability characteristics of a ship, the data used is the ship's displacement in tons. It can be seen that the ship's design with the addition of fins provides a shape on the right and left side of the hull bilge, see figure 4.

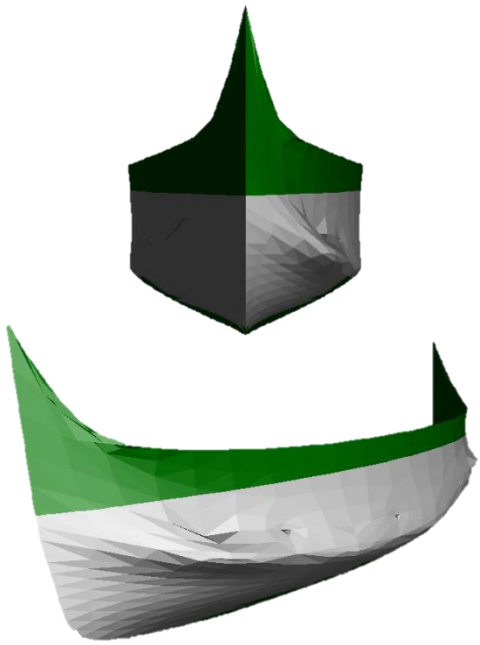


Figure 4. Addition Fin to ship design

Traditional fishing vessels with the addition of fins do not experience changes in the main dimensions of the ship. Modifications to the addition of fins still consider the overall width of the ship. With the presence of fins on the hull of this ship, it adds to the ship's ability to return to its original position to be more comfortable or not too stiff. The moment of stability of the ship can be calculated using equation 2, so that the results of the cross curve are obtained using the numerical method, as in Figure 5.

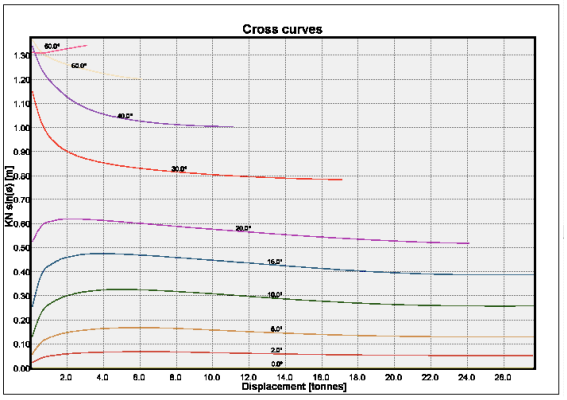


Figure 5. Cross Curve in Fishing Boat Fin Design

From the results of the cross curve calculation, it can be seen that the ship experiences the largest righting arm distance when the ship experiences a roll starting at an angle of 50 degrees. This makes ships using this fin quite comfortable for the waters of the northern coast of Java because they only have an average wave height in cloudy conditions of around 1-3 meters.

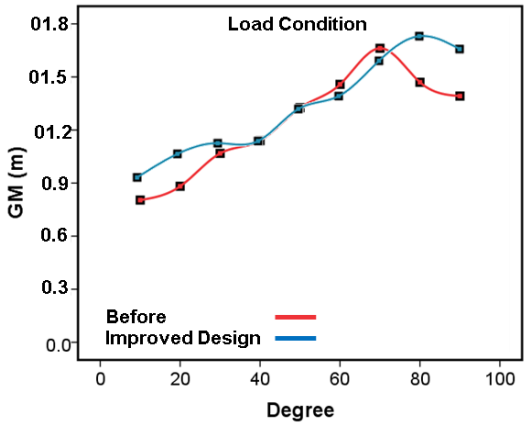


Figure 6. Comparison of ship on Load Conditions

And then, for each condition of the calculation analysis results, we group them and then form a trend as seen in table 6. Where the difference occurs in each ship condition where the critical angle of maximum roll is at 60 degrees and the value of the upper equilibrium point to the force of gravity in each ship condition has a difference. There is an 11% difference in the distance of the upper equilibrium point when the ship is fully loaded. In the condition of the maximum roll angle, both ships without fins and ships with fins each experience a decrease in the distance of the upper equilibrium point to the ship's gravity point.

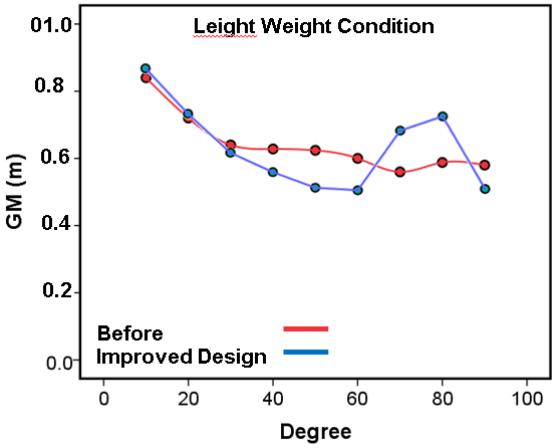


Figure 7. Comparison when Leight Weight Condition

However, in the condition of the ship without a load, it means that only the load of fishing gear and the ship's motor has a downward trend for each condition of the ship's roll. This means that the distance of the center of gravity to the upper

equilibrium point of the ship has a decreasing value, which causes the movement of the ship when it receives external force to have rigid stability. In the design of a ship that has fins that tend to have a roll angle above 60 degrees, the distance from the center of gravity to the upper equilibrium is quite large. This shows that the stability value is good and the level of comfort of using the ship is more stable or not rigid.

CONCLUSION

Additional information on the ship's development can be obtained by estimating the ship's stability by calculating the force points that are present while the ship is in operation. You can compare the findings and analysis of ship stability and the connection between resistance and ship speed by looking at earlier studies. The picture illustrates that while designing a ship with fin for shallow waters, there are a number of elements to take into account, including the ship's maximum speed and stability, useful for fishing operations. According to the hull's design, pre-planning costs are not excessively expensive and demonstrate the efficiency of production time. The impact of different representative hull construction types on shallow seas, particularly the stability and resistance of conventional fishing boats, must therefore be understood. The findings demonstrated that the engine's effective power and the stability diagram may forecast the ship's performance and offer an optimization model to forecast the design of conventional ships in shallow waters.

Ships will encounter disruptions, particularly when operations take place at an angle greater than 15 degrees. This can, at the very least, impact fishermen's ability to locate fish and support themselves. For the purpose of optimizing current fishing boats, this study focuses on static stability and a proposal for an optimal design in terms of hull form, within the constraints of the challenge. Although the method used is not very thorough, it can nonetheless serve as a source of information for authors conducting further research.

REFFERENCES

[1] B. W. Ziliwu, "STUDI KONSUMSI BAHAN BAKAR SOLAR PADA MESIN INDUK KM. FORTUNA," *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 2 SE-, Oct. 2022, doi: 10.33019/jm.v8i2.3015.

[2] D. Yang, X. Li, and L. Zhang, "A novel vessel trajectory feature engineering for fishing vessel behavior identification," *Ocean Eng.*, vol. 310, p. 118677, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118677

[3] H. Bao, Y. Wang, H. Zhu, X. Li, and F. Yu, "Numerical and experimental analysis of motion control of offshore fishing unmanned underwater vehicle in ocean environment," *Ocean Eng.*, vol. 295, p. 116886, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116886

[4] H. Tira and M. Zulfikar, "Design Of Tapered Wind Turbine Using Various Naca 24112 Airfoils In Semayan Village Central Lombok Regency," *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2 SE-, Nov. 2024, doi: 10.33019/jm.v10i2.4704.

[5] K. Kadriadi *et al.*, "Design And Construction Of Gear Wheel Alignment Setting Tools As A Learning Media In The Machine Repair And Maintenance Laboratory," *Mach. J. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2 SE-, Nov. 2023, doi: 10.33019/jm.v9i2.4509.

[6] L. F. Calvo, M. E. Diego, and M. Astolfi, "Techno-economic analysis of a novel clc reactor-based system for energy storage and back-up power in a cruise ship," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 26, p. 100885, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100885.

[7] M. Gil, J. Montewka, and P. Krata, "Predicting a passenger ship's response during evasive maneuvers using Bayesian Learning," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 256, p. 110765, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110765.

[8] M. Iqbal, M. Terziev, T. Tezdogan, and A. Incecik, "Hull form optimisation to minimise the total resistance and dynamic responses of small fishing vessels," *Ocean Eng.*, vol. 321, p. 120357, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120357

[9] M. Koričan, N. Vladimir, N. Hadžić, and V. Ložar, "Life-cycle cost assessment of hull protection technologies considering their effect on the environmental friendliness of fishing vessels," *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 209, p. 117137, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.117137.

[10] M. Sun, H. Ye, J. Liu, T. Luan, and H. Lian, "Analysis of lift-drag characteristics and design of collaborative anti-rolling control system for variable-diameter Magnus rotating roll

stabilizer," *Ocean Eng.*, vol. 324, p. 120713, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120713

[11] S. Bairami-Khankandi, V. Bolbot, A. BahooToroody, and F. Goerlandt, "A systems-theoretic approach using association rule mining and predictive Bayesian trend analysis to identify patterns in maritime accident causes," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 258, p. 110911, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.110911.

[12] S. F. Khristyson, Jamari, and A. P. Bayuseno, "Design of Fishing Vessel 5 GT for Traditional Fishing Community Activities," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1096, no. 1, p. 12030, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1096/1/012030.

[13] S. F. Khristyson, M. Ridwan, and A. K. Yusim, "Analisis Pengaruh Pengguanan Alat Bantu Bending pada Proses Bending High Density Polietiline (HDPE) Sheet untuk Lambung Kapal Ikan dengan Metode Heat Treatment," *Simetris J. Tek. Mesin, Elektro dan Ilmu Komput.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–10, 2024, [Online]. Available: https://jurnal.umk.ac.id/index.php/simet/article/view/11897.

[14] S. F. Khristyson, S. Sugeng, M. Ridwan, and A. K. Yusim, "Improved Design 5 (GT) Boat for Traditional Community Activities," *Int. J. Eng. Invent.*, vol. 13, no. 1, pp. 50–57, 2024, [Online]. Available: http://www.ijeijournal.com/papers/Vol13-Issue1/13015057.pdf.

[15] S. Liu, X.-J. Cui, and C. Lyu, "Analysis and prediction of fishing capacity of marine fishing vessels based on generalized additive models," *Fish. Res.*, vol. 282, p. 107268, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.fishres.2025.107268.

[16] S. Ma'arif, M. A. Budiyanto, Sunaryo, and G. Theotokatos, "Progress in hybrid and electric propulsion technologies for fishing vessels: An extensive review and prospects," *Ocean Eng.*, vol. 316, p. 120017, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120017

[17] S. Sulaiman and S. F. Khristyson, "Analisa Sambungan Groove pada Pengelasan HDPE sebagai Material Alternatif Konstruksi Kapal Kayu Nelayan," *J. Inovtek Polbeng*, vol. 12, no. 1, pp. 9–14, 2022, doi: 10.35314/ip.v12i1.2295.

[18] S. Sulaiman, S. D. Said, S. F. Khristyson, and I. D. Cahyo, "Desain Konstruksi Bar Keel Pada Kapal Kayu Nelayan," *J. Pengabdi. Vokasi*, vol. 1, no. 3, pp. 153–158, Jun. 2020, Accessed: Aug. 09, 2020. [Online]. Available: https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpv/article/view/5382.

[19] W. Xu, J. Jiao, G. Xu, M. Zhang, and Y. Zou, "Intelligent control of flap-type fin stabilizer for ship roll motion reduction," *Ocean Eng.*, vol. 323, p. 120630, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120630

[20] W. Xu, M. Li, G. Xu, J. Jiao, and H. Liu, "Study on the intelligent anti-roll control of a ship at zero speed based on flapping fins," *Ocean Eng.*, vol. 319, p. 120263, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120263

[21] Y. Zhang, X. Huang, X. Chen, B. Liu, X. Kong, and Q. Deng, "Optimal configuration and three-dimensional light field of fishing lights on a squid fishing boat obtained using a space matrix algorithm," *Fish. Res.*, vol. 281, p. 107223, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.fishres.2024.107223.

ANALISIS KEMAMPUAN SISTEM PENGAPIAN ENGINE TIPE 4K PADA CAR TRAINING STAND

Malik Abdul A [1], Tatang Permana [1]

[1] Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia

Jl. Dr. Setiabudi No.229, Isola, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 4015

amalikabdul9@gmail.com [1]

ABSTRAK

Sistem pengapian berperan penting dalam menentukan efisiensi pembakaran mesin bensin, yang berpengaruh langsung terhadap performa mesin dan emisi gas buang. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh jenis busi terhadap kinerja pembakaran pada mesin Toyota 4K menggunakan metode empiris dan laboratoris. Dua jenis busi dibandingkan, yaitu busi standar berbahan nikel dan busi iridium, melalui uji emisi menggunakan gas analyzer lima parameter (CO, CO_2, HC, O_2, dan λ). Hasil pengujian menunjukkan bahwa busi iridium menghasilkan pembakaran lebih efisien dibanding busi standar. Kadar CO menurun sekitar 16–20 %, HC turun signifikan dari 2240 ppm menjadi 1643 ppm, sedangkan CO_2 meningkat sekitar 4–5 %, yang menandakan proses oksidasi karbon lebih sempurna. Penurunan kadar O_2 dari 13,5 % menjadi 11,8 % juga menunjukkan pemanfaatan oksigen yang lebih efektif. Secara keseluruhan, penggunaan busi iridium meningkatkan kualitas pengapian dan efisiensi pembakaran, serta menurunkan emisi gas buang sesuai dengan standar Euro IV (KLHK, 2021). Hal ini menunjukan busi berbahan logam mulia mampu menghasilkan percikan api lebih stabil dan efisien.

Kata kunci : sistem pengapian, busi standar, busi iridium, emisi gas buang.

Abstract

The ignition system plays a pivotal role in optimizing the combustion efficiency of gasoline engines, which directly influences engine performance and exhaust emissions. This study investigates the influence of spark plug material on the combustion characteristics of a Toyota 4K engine using both empirical and laboratory-based methods. Two spark plug types—standard nickel and iridium—were evaluated through emission testing with a five-parameter gas analyzer measuring CO, CO_2, HC, O_2, and λ values. The experimental results reveal that the iridium spark plug provides more efficient combustion compared to the standard nickel plug. Specifically, carbon monoxide (CO) emissions decreased by approximately 16–20%, hydrocarbon (HC) concentrations declined significantly from 2240 ppm to 1643 ppm, and carbon dioxide (CO_2) levels increased by 4–5%, indicating a more complete oxidation process. Furthermore, the oxygen (O_2) level dropped from 13.5% to 11.8%, signifying improved oxygen utilization during combustion. Overall, the adoption of iridium spark plugs enhances ignition stability, improves combustion efficiency, and reduces exhaust emissions, aligning with the Euro IV emission standards (KLHK, 2021). These findings highlight the potential of noble-metal spark plugs in improving engine performance and environmental compliance.

Key words : *ignition system, standard spark plug, iridium spark plug, exhaust emissions.*

PENDAHULUAN

Sistem pengapian pada mesin bensin merupakan salah satu subsistem paling vital yang menentukan kualitas pembakaran di dalam ruang bakar [1]. Fungsi utamanya adalah menghasilkan percikan api yang mampu menyalakan campuran udara dan bahan bakar pada waktu yang tepat, sehingga menghasilkan daya mesin optimal. Efisiensi pengapian tidak hanya memengaruhi performa kendaraan, tetapi juga berhubungan langsung dengan konsumsi bahan bakar dan kadar emisi gas buang yang dihasilkan [2]. Ketidaktepatan waktu pengapian atau lemahnya percikan api dapat

menyebabkan pembakaran tidak sempurna yang menghasilkan emisi karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) dalam jumlah tinggi [3].

Proses pembakaran yang tidak sempurna umumnya disebabkan oleh distribusi campuran udara dan bahan bakar yang tidak merata, tekanan ruang bakar yang tidak optimal, atau energi percikan busi yang tidak cukup kuat [4]. Kualitas percikan api sangat berpengaruh terhadap laju penyalaan campuran bahan bakar, di mana peningkatan energi percikan dapat mempercepat inisiasi pembakaran serta memperbaiki efisiensi termal mesin [5]. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi sistem pengapian menjadi fokus penting dalam pengembangan mesin modern agar dapat mengurangi pemborosan energi dan polusi udara [6].

Sektor transportasi merupakan salah satu penyumbang terbesar terhadap emisi gas buang di atmosfer. Berdasarkan laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), sektor transportasi di Indonesia menyumbang sekitar 40% emisi CO dan 30% emisi NO_x di kawasan perkotaan [13]. Polusi yang dihasilkan kendaraan bermotor berdampak langsung terhadap kualitas udara, kesehatan masyarakat, dan peningkatan efek rumah kaca. Karena itu, optimalisasi sistem pengapian menjadi langkah strategis untuk menekan emisi gas buang kendaraan bermotor. Pemerintah juga telah mengeluarkan kebijakan melalui Peraturan Menteri LHK No. 11 Tahun 2021 yang mewajibkan kendaraan bensin memenuhi ambang batas CO ≤ 1,0 g/km dan HC ≤ 0,10 g/km, sejalan dengan standar Euro IV [14].

Salah satu komponen yang sangat menentukan kinerja sistem pengapian adalah busi (spark plug). Busi berfungsi menyalurkan tegangan tinggi yang dihasilkan oleh koil pengapian menuju elektroda, sehingga terjadi loncatan bunga api yang membakar campuran udara dan bahan bakar [7]. Jenis bahan elektroda pada busi berpengaruh terhadap intensitas percikan dan daya tahannya [8]. Busi konvensional berbahan nikel cenderung memiliki titik leleh lebih rendah dan cepat aus dibandingkan busi dengan bahan logam mulia seperti iridium dan platinum [9]. Busi iridium memiliki konduktivitas tinggi dan elektroda lebih halus, yang memungkinkan pembentukan percikan api lebih stabil dan efisien [1][5].

Beberapa penelitian eksperimental menunjukkan bahwa penggunaan busi dengan material logam mulia seperti iridium dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi kadar emisi gas buang [2][6][9]. penggunaan busi iridium mampu menurunkan kadar emisi CO dan HC masing-masing hingga 20–25%, serta meningkatkan kadar CO_2 sebagai indikator pembakaran lebih sempurna [7][8]. Busi iridium memberikan hasil pembakaran yang lebih stabil dan emisi lebih rendah dibandingkan busi standar pada mesin bensin berkapasitas kecil [10][11].

Selain peningkatan efisiensi pembakaran, busi iridium juga dikenal memiliki ketahanan yang lebih lama dibandingkan busi standar. Struktur elektroda yang lebih kecil dan kuat memungkinkan pembentukan percikan pada tegangan yang lebih rendah tanpa kehilangan intensitas energi [3][5]. Hal ini membuat sistem pengapian bekerja lebih ringan dan stabil pada berbagai kondisi putaran mesin (RPM) [12]. Penggunaan busi iridium dapat menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 3–5% karena efisiensi pembakaran meningkat dan kehilangan energi termal berkurang [6][12].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh penggunaan busi standar dan busi iridium terhadap performa sistem pengapian serta emisi gas buang pada mesin Toyota tipe 4K yang digunakan dalam *engine training car* [7][10]. Pengujian dilakukan menggunakan metode empiris dan laboratoris untuk memperoleh data kuantitatif terkait perubahan kadar CO, CO_2, HC, dan O_2 pada berbagai putaran mesin. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dalam peningkatan efisiensi sistem pengapian dan sebagai dasar pengembangan kurikulum praktikum otomotif berbasis emisi rendah di lingkungan pendidikan teknik otomotif [6][12].

METODE PENELITIAN

Penelitian Penelitian ini menggunakan dua pendekatan utama, yaitu metode empiris dan metode laboratoris. Pendekatan empiris digunakan untuk menghitung dan menganalisis kemampuan sistem pengapian berdasarkan parameter-parameter kelistrikan mesin [4][9], sedangkan pendekatan laboratoris diterapkan untuk mengukur emisi gas buang hasil pembakaran pada kondisi aktual di *car training stand* [10]. Kombinasi kedua metode ini memberikan hasil yang terukur secara kuantitatif sekaligus valid secara eksperime [3][6]. Adapun alat dan bahan yang digunakan, yaitu:

1. Car training stand engine 4K
2. Multimeter (AVO meter)
3. Tachometer
4. Gas analyzer
5. Timing light
6. Busi standar
7. Busi iridium
8. Koil pengapian konvensional
9. Baterai 12V
10. Bahan bakar bensin RON 90

Prosedur pengujian dilakukan pada kondisi *idle* hingga putaran tinggi untuk memperoleh data variasi emisi gas buang yang dihasilkan masing-

masing jenis busi. Data hasil pengukuran dianalisis untuk menentukan efisiensi pembakaran dan stabilitas pengapian sesuai dengan parameter CO, HC, CO_2, dan O_2 [5] [8] [10].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hitung Arus Maksimum Koil Primer

Diketahui:

- Tegangan suplai primer U= 12V
- Resistansi primer Rp = 0.5 Ω
- Putaran mesin saat idle, n = 1200rpm
- Induktansi koil primer L = 0.003H = 3mH

$$I = \frac{U}{Rp} \quad \text{.....(1)}$$

$$I = \frac{12}{0.5} = 24\text{A}$$

Hasil dari perhitungan yaitu 24A, ini adalah arus jenuh teoritis jika koil mendapat waktu yang cukup untuk terisi penuh biasanya hanya tercapai saat RPM rendah.

Hitung Waktu Pengisian Koil

$$f = \frac{n}{120} = \frac{1200}{120} = 10 \text{ Hz} \quad \text{.....(2)}$$

Hasil yang diperoleh yaitu 10Hz, maka setiap silinder menyala setiap 0,1 detik (100 ms). Namun, koil biasanya koil dapat diisi penuh pada 2-5 ms.

Hitung Energi Tersimpan dalam Magnet Koil

$$W = \frac{1}{2}Li^2 \quad \text{.....(3)}$$

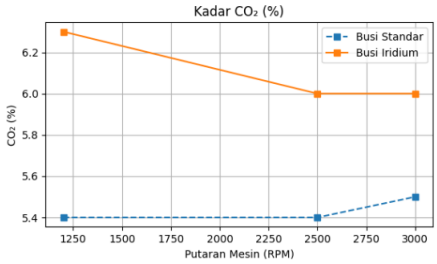
$$W = 0.5 \times 0.003 \times (9.44)^2$$

$$W = 0.0015 \times 89.1 = 0.1336J = 133.6\,mJ$$

Energi magnetik yang tersimpan pada saat *cut-off* adalah 133 mJ. Sebagian besar energi tersebut akan dilepaskan sebagai tegangan tinggi di sekunder.

Hasil Perbandingan Emisi Gas Buang Menggunakan Busi Standar dan Busi Iridium

1. Kadar CO (Karbon Monoksida)

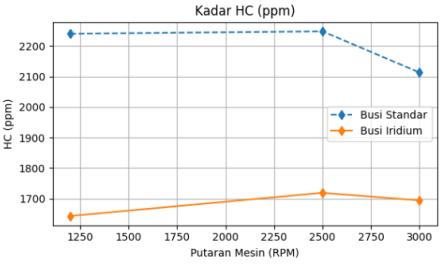


Gambar 1. Grafik perbandingan kadar CO (karbon monoksida)

CO berasal dari oksidasi parsial karbon. Kenaikan kecil CO pada beberapa kondisi iridium dapat terjadi bila temperatur pembakaran lebih tinggi (mempengaruhi keseimbangan reaksi) atau bila pengukuran terjadi saat transien. Namun secara umum literatur menunjukkan kedua efek mungkin: beberapa studi melaporkan penurunan CO besar saat memakai iridium, sedangkan studi lain menemukan variasi bergantung pada gap, timing, dan kualitas bahan bakar.

Temuan kadar CO relatif stabil untuk kedua jenis busi, dengan sedikit kenaikan pada beberapa kondisi (mis. busi iridium 0,11% pada 2500–3000 rpm vs busi standar 0,08–0,10%). Oleh karena itu, variasi kecil pada data Anda masih wajar dan perlu replikasi untuk memastikan signifikansi statistik.

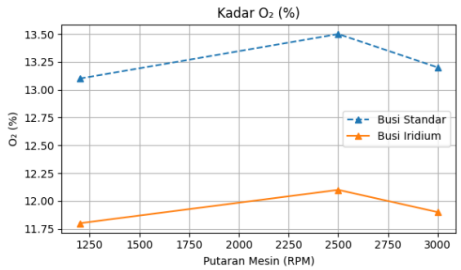
2. Kadar CO_2 (Karbondioksida)



Gambar 2. Grafik perbandingan kadar CO2 (Karbon dioksida)

Temuan CO_2 meningkat pada busi iridium (5,4–5,5% → 6,0–6,3%). Peningkatan CO_2 mengindikasikan pembakaran yang lebih lengkap (lebih banyak C dioksidasi menjadi CO_2). Ini konsisten dengan penurunan HC dan literatur yang menyebut kenaikan CO_2 sebagai indikator pembakaran lebih sempurna saat menggunakan busi iridium. Peningkatan CO_2 bersamaan dengan penurunan HC merupakan bukti kuat peningkatan efisiensi pembakaran.

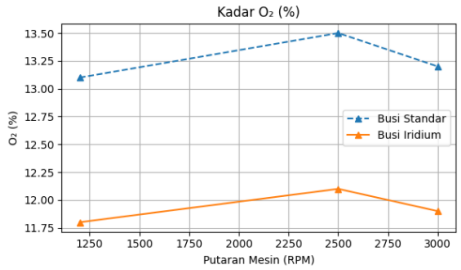
3. Kadar HC (Hidrokarbon)



Gambar 3. Grafik perbandingan kadar HC (Hidrokarbon)

Temuan kadar HC menurun secara konsisten ketika menggunakan busi iridium dibanding busi standar di semua RPM (mis. dari 2240 → 1643 ppm pada 1200 rpm). Penurunan HC menunjukkan pengurangan fuel misfire/unburned-fuel: busi iridium kemungkinan memberikan percikan yang lebih fokus/energi lebih efektif sehingga inisiasi pembakaran lebih cepat dan menyeluruh. Temuan ini sejalan dengan beberapa studi yang melaporkan pengurangan HC saat menggunakan busi iridium atau platinum.

4. Kadar O_2 (Oksigen)



Gambar 4. Grafik perbandingan kadar O2 (Oksigen)

Kadar O_2 di gas buang lebih rendah untuk busi iridium (sekitar 11,8–12,1%) dibanding busi standar (13,1–13,5%). Turunnya O_2 menandakan pemakaian oksigen yang lebih besar dalam pembakaran, mendukung hipotesis bahwa busi iridium meningkatkan tingkat konversi bahan bakar, dengan kata lain, lebih banyak oksigen habis bereaksi menjadi CO_2/H_2O sehingga sisa O_2 pada gas buang menurun. Kombinasi: ↓HC, ↑CO_2, ↓O_2 → konsisten dengan pembakaran lebih lengkap.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Busi iridium memberikan performa pembakaran yang lebih efisien dibanding busi standar (nikel) pada mesin tipe 4K dalam pengujian laboratorium ini.
2. Terbukti dari penurunan signifikan kadar HC dan O_2, serta peningkatan kadar CO_2 pada busi iridium.
3. Perubahan kadar CO tidak terlalu besar dalam penelitian ini, sehingga efek busi pada CO perlu dieksplorasi lebih lanjut.
4. Dari sisi aplikasi, penggunaan busi iridium dapat menjadi salah satu strategi untuk menurunkan emisi gas buang dan meningkatkan efisiensi pembakaran, terutama dalam kondisi mesin yang optimal dan sistem pengapian yang terkalibrasi.
5. Penelitian selanjutnya sebaiknya memperluas jenis mesin, kondisi uji, serta analisis statistik untuk menghasilkan rekomendasi yang lebih generalisasi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. B. Jadhav, S. R. Patil, and V. K. Panchal, "Variation of Spark Plug Type and Spark Gap with Hydrogen and Gasoline Fuels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 32, pp. 16234–16245, 2020.

[2] E. B. Moustafa, "A Comparative Study of Spark Plug Electrode Designs: Effects on Engine Performance, Emissions and Noise," *Materials*, vol. 7, no. 2, p. 55, 2025.

[3] E. Nurdin *et al.*, "Pengaruh Jenis Busi Terhadap Emisi Gas Buang dan Konsumsi Bahan Bakar pada Mobil Daihatsu Zebra 1.3," *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, vol. 1, no. 1, pp. 15–23, 2021.

[4] H. E. Gülcan, "Effect of Spark Plug Position and Ignition Timing on Combustion Efficiency and Emissions," *Fuel*, 2025.

[5] I. B. R. L. P. Wijaya, "Pengaruh Jenis Busi Terhadap Emisi Gas Buang Mesin Otto 1 Silinder," *Jurnal Cahaya Mandalika (JCM)*, vol. 4, no. 2, pp. 45–52, 2023.

[6] K. Tucki *et al.*, "Analysis of the Influence of the Spark Plug on Exhaust Gas Composition," *Energies*, vol. 16, no. 11, pp. 4381–4394, 2023.

[7] K. V. Kumar *et al.*, "An Effect of Iridium Spark Plugs on SI Engine Performance and Exhaust Emissions by using Plastic Oil Petrol Blends," *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 9412–9418, 2022.

[8] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, *Peraturan Menteri LHK Nomor 11 Tahun 2021 tentang Baku Mutu Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Tipe Baru*, Jakarta: KLHK, 2021

[9] KLHK, *Inventarisasi Emisi Sektor Transportasi Tahun 2023*, Direktorat Pengendalian Pencemaran Udara, Jakarta, 2023.

[10] M. Azkiya, "Perbandingan Busi Iridium dan Busi Standar pada Sepeda Motor Scoopy 110 cc Tahun 2023," *Jurnal Teknik Sistem (JTS)*, vol. 5, no. 1, pp. 77–84, 2024

[11] M. Fikri *et al.*, "Analisis Penggunaan Busi Standard, Platinum, dan Iridium Terhadap Emisi Gas Buang pada Sepeda Motor Scoopy PGM-FI 2020," *JTPVI*, vol. 2, no. 3, pp. 337–346, 2024.

[12] Y. A. Winoko, "Pengaruh Variasi Celah Busi dan Jenis Busi Terhadap Emisi Gas Buang pada Kendaraan Roda Dua 110 cc," *Jurnal Ilmiah INTEGRITAS*, vol. 3, no. 1, pp. 12–19, 2023.

[13] Y. J. Prasetyo, M. Abdulkadir, and A. Warsita, "Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan Busi Iridium terhadap Kinerja Mesin Honda Vario 150 cc Tahun 2017," *Cendekia Mekanika*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, 2022.

[14] Y. Sukrawan, "Analisis Efisiensi Sistem Pengapian dan Konsumsi Bahan Bakar Berdasarkan Jenis Busi," *Jurnal Teknologi Mesin dan Otomotif Indonesia*, vol. 6, no. 2, pp. 101–110, 2023.

PENGARUH KOMPOSISI PENGUAT DAN TEKANAN KOMPAKSI TERHADAP KEKERASAN DAN DENSITAS KOMPOSIT ALUMINIUM KAMPAS REM

Sukanto [1], Samukri [1*], Harwadi [1], Mego Wahyudi [1]

[1] Program Studi D-IV Teknik Mesin dan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

Kawasan Industri Air Kantung, Sungailiat, Bangka, Kepulauan Bangka Belitung

samukridamar19@gmail.com [1]

Abstrak

Pengembangan kampas rem non-asbes memerlukan material yang memiliki kekerasan memadai dengan densitas yang tetap dapat dikendalikan. Penelitian ini mengevaluasi komposit matriks aluminium yang diperkuat campuran serbuk kuningan, serbuk besi, dan *coconut shell ash* (CSA) melalui proses metalurgi serbuk. Fraksi penguat divariasikan sebesar 5%, 11%, dan 17%, sedangkan tekanan kompaksi dua arah ditetapkan pada 5600, 6000, dan 6400 psi. Pemaduan mekanik dilakukan menggunakan *horizontal ball mill* selama 4 jam pada 90 rpm dengan *ball-to-powder ratio* 10:1. Sebanyak 27 spesimen diuji; kekerasan diukur dengan alat uji portabel mengacu ASTM E110-14, sedangkan densitas ditentukan menggunakan prinsip Archimedes mengacu ASTM B962-17. Perhitungan kembali data mentah menunjukkan rerata kekerasan berdasarkan tekanan meningkat dari 91,11 HB pada 5600 psi menjadi 123,04 HB pada 6000 psi dan 137,33 HB pada 6400 psi. Rerata kombinasi tertinggi sebesar 144,67 HB diperoleh pada penguat 17% dan tekanan 6400 psi. Respons densitas bersifat tidak linier, dengan rerata kombinasi tertinggi 1,431 g/cm³ pada penguat 5% dan tekanan 6400 psi. Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan kompaksi memiliki hubungan yang lebih jelas dengan kekerasan dibandingkan densitas, sedangkan fraksi penguat dan distribusi partikel tetap memengaruhi respons material.

Kata kunci : *coconut shell ash*, kampas rem, kekerasan, komposit matriks aluminium, tekanan kompaksi.

Abstract

Non-asbestos brake-pad development requires materials with adequate hardness while retaining a controllable density. This study evaluates aluminum-matrix composites reinforced with a mixture of brass powder, iron powder, and coconut shell ash (CSA) produced by powder-metallurgy processing. The reinforcement fraction was varied at 5%, 11%, and 17%, while two-direction compaction pressure was set at 5600, 6000, and 6400 psi. Mechanical alloying was carried out in a horizontal ball mill for 4 h at 90 rpm with a ball-to-powder ratio of 10:1. Twenty-seven specimens were evaluated; hardness was measured using a portable tester referring to ASTM E110-14, while density was determined by the Archimedes method referring to ASTM B962-17. Recalculation of the raw data showed that mean hardness across pressures increased from 91.11 HB at 5600 psi to 123.04 HB at 6000 psi and 137.33 HB at 6400 psi. The highest combination mean was 144.67 HB at 17% reinforcement and 6400 psi. Density showed a non-linear response, with the highest combination mean of 1.431 g/cm³ at 5% reinforcement and 6400 psi. These results indicate that compaction pressure has a clearer relationship with hardness than with density, while reinforcement fraction and particle distribution still influence the final response.

Key words : *aluminum matrix composite, brake pad, coconut shell ash, compaction pressure, hardness.*

PENDAHULUAN

Kampas rem bekerja melalui kontak gesek untuk menurunkan kecepatan kendaraan, sehingga karakter material penyusunnya perlu mendukung ketahanan terhadap deformasi dan pemakaian berulang. Pengembangan material *non-asbestos* mendorong penggunaan komposit yang mampu memadukan matriks logam dengan penguat berbasis serbuk. Komposit matriks aluminium menjadi salah satu pilihan karena aluminium relatif ringan, mudah diproses, dan dapat dikombinasikan dengan penguat untuk mengubah kekerasan maupun karakter fisiknya [1], [2].

Metode metalurgi serbuk banyak digunakan pada pengembangan komposit matriks aluminium karena komposisi bahan dapat diatur sejak tahap pencampuran, kemudian campuran dipadatkan untuk membentuk specimen [14]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa tekanan kompaksi dapat memengaruhi densitas dan kekerasan material,

walaupun besar pengaruhnya dapat berbeda bergantung pada jenis penguat, ukuran partikel, homogenitas campuran, dan kondisi proses [2], [3].

Pemanfaatan limbah pertanian sebagai penguat juga berkembang karena dapat menambah nilai guna material yang sebelumnya kurang dimanfaatkan [4]. *Coconut shell ash* (CSA) mengandung fase mineral yang dapat berperan sebagai partikel penguat atau pengisi pada matriks aluminium [10]. Kajian pada komposit aluminium-CSA melaporkan perubahan kekerasan dan densitas setelah penambahan CSA, tetapi responsnya dipengaruhi oleh kadar penguat dan proses fabrikasi yang digunakan [8], [9].

Penelitian ini menggunakan alumunium sebagai matriks dengan campuran serbuk kuningan, serbuk besi, dan CSA sebagai penguat. Kebaruan praktis penelitian terletak pada penggunaan tiga jenis penguat secara bersamaan dengan variasi fraksi total 5%, 11%, dan 17% serta tekanan kompaksi 5600, 6000, dan 6400 psi. Tujuan penelitian adalah menganalisis kecenderungan perubahan kekerasan dan densitas akibat variasi komposisi penguat dan tekanan kompaksi, serta menentukan kombinasi yang menghasilkan respons tertinggi pada data pengujian yang tersedia.

METODE PENELITIAN

1. Rancangan Penelitian

Penelitian menggunakan rancangan faktorial dengan dua faktor. Faktor pertama adalah fraksi total penguat, yaitu 5%, 11%, dan 17%, sedangkan faktor kedua adalah tekanan kompaksi, yaitu 5600, 6000, dan 6400 psi. Masing-masing kombinasi dibuat tiga spesimen sehingga diperoleh 27 spesimen. Fraksi aluminium yang bersesuaian dengan variasi penguat adalah 95%, 89%, dan 83%. Rancangan perlakuan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rancangan faktorial penelitian

Komposisi Al:penguat	Tekanan (psi)
95% : 5%	5600
95% : 5%	6000
95% : 5%	6400
89% : 11%	5600
89% : 11%	6000
89% : 11%	6400
83% : 17%	5600
83% : 17%	6000
83% : 17%	6400

2. Bahan dan Proses Pembuatan

Bahan utama yang digunakan adalah serbuk aluminium pasaran sebagai matriks, sedangkan serbuk kuningan (CuZn), serbuk besi (Fe), dan *Coconut Shell Ash* (CSA) digunakan sebagai penguat. CSA yang digunakan pada penelitian ini disiapkan pada ukuran *mesh* 80. Serbuk aluminium, kuningan, dan CSA ditunjukkan berturut-turut pada Gambar 1 sampai Gambar 3.



Gambar 1. Serbuk Aluminium

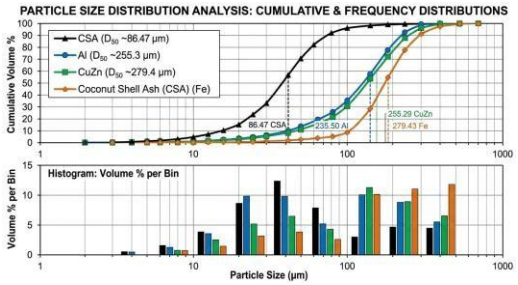


Gambar 2. Serbuk Serbuk Kuningan (CuZn)



Gambar 3. Serbuk *Coconut Shell Ash* (CSA) *mesh* 80

Pemaduan mekanik dilakukan menggunakan *horizontal ball mill* pada kecepatan 90 rpm selama 4 jam dengan *Ball-to-Powder Ratio* (BPR) 10:1. Berdasarkan hasil *Particle Size Analysis* pada laporan penelitian, ukuran median partikel (D50) CSA sebesar 86,47 µm, CuZn 255,29 µm, aluminium 235,50 µm, dan Fe 279,43 µm.



Gambar 4 Distribusi ukuran partikel bahan penyusun komposit

Gambar 4 menunjukkan distribusi kumulatif dan frekuensi ukuran partikel bahan penyusun komposit. Nilai D50 menunjukkan bahwa CSA memiliki ukuran median partikel paling kecil, yaitu 86,47 µm, diikuti aluminium 235,50 µm, CuZn 255,29 µm, dan Fe 279,43 µm. Perbedaan ukuran partikel tersebut memungkinkan partikel CSA yang lebih halus mengisi sebagian celah di antara partikel logam yang lebih besar, sehingga distribusi ukuran partikel berpotensi memengaruhi kerapatan dan homogenitas campuran [16].

Campuran serbuk dipadatkan dengan sistem penekanan dua arah menggunakan cetakan berbentuk cincin. Variasi tekanan yang digunakan adalah 5600, 6000, dan 6400 psi dengan waktu tahan 15 menit. Pembahasan pada artikel ini difokuskan pada data pra-sintering yang tersedia pada laporan proyek akhir, sehingga hasil yang dibahas merupakan karakter awal hasil pencampuran dan kompaksi, bukan validasi akhir performa kampas rem pada kondisi operasi.



Gambar 5. Hasil cetakan spesimen komposit

3. Pengujian dan Pengolahan Data

Kekerasan diukur pada tiga titik permukaan setiap spesimen menggunakan alat uji kekerasan portabel dengan acuan ASTM E110-14 [12]. Nilai tiga titik kemudian dirata-ratakan untuk mewakili kekerasan satu spesimen. Untuk menghindari kesalahan penyalinan pada kolom rerata di laporan, rerata pada artikel ini dihitung kembali dari tiga nilai pengukuran mentah setiap spesimen. Densitas ditentukan dengan prinsip Archimedes mengacu ASTM B962-17 [11]. Massa spesimen diukur dalam kondisi kering dan saat tersuspensi di dalam air. Densitas dihitung dengan Persamaan (1), dengan m_s sebagai massa kering, m^g sebagai massa tersuspensi, dan ρH_2O sebagai densitas air.

$$\rho = m_s / (m_s - m^g) \times \rho H_2O \quad \text{.....(1)}$$

Data selanjutnya dikelompokkan berdasarkan sembilan kombinasi perlakuan. Setiap nilai pada Tabel 2 merupakan rerata dari tiga spesimen pada kombinasi yang sama. Pengolahan ini digunakan untuk memperjelas kecenderungan pengaruh komposisi penguat dan tekanan kompaksi terhadap dua respons yang diamati.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kekerasan Komposit

Hasil pengolahan ulang menunjukkan bahwa tekanan kompaksi memberikan kecenderungan yang paling jelas terhadap kekerasan. Jika seluruh komposisi dirata-ratakan, kekerasan meningkat dari 91,11 HB pada 5600 psi menjadi 123,04 HB pada 6000 psi dan 137,33 HB pada 6400 psi. Kecenderungan ini sejalan dengan penelitian AMC lain yang menunjukkan bahwa peningkatan tekanan kompaksi dapat memperbesar kontak antarpartikel dan menaikkan kekerasan setelah serbuk dipadatkan [2], [5].

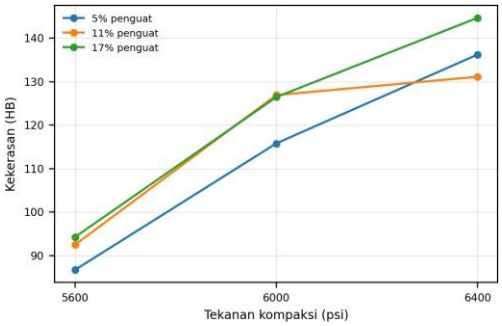
Pada level komposisi, rerata kekerasan seluruh tekanan meningkat bertahap dari 112,89 HB pada penguat 5%, menjadi 116,81 HB pada 11%, dan 121,78 HB pada 17%. Meskipun demikian, kenaikannya tidak selalu seragam pada setiap tekanan. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi penguat tidak bekerja secara terpisah dari proses kompaksi; distribusi partikel, ukuran partikel, dan keseragaman campuran ikut menentukan respons lokal permukaan terhadap penetrasi [3].

Tabel 2. Rerata hasil pengujian pada setiap kombinasi perlakuan

Penguat / tekanan	Kekerasan (HB)	Densitas (g/cm³)
5% / 5600	86,67	1,277

Penguat / tekanan	Kekerasan (HB)	Densitas (g/cm³)
5% / 6000	115,78	1,253
5% / 6400	136,22	1,431
11% / 5600	92,44	1,224
11% / 6000	126,89	1,197
11% / 6400	131,11	1,289
17% / 5600	94,22	1,260
17% / 6000	126,44	1,260
17% / 6400	144,67	1,332

Kombinasi dengan rerata kekerasan tertinggi adalah penguat 17% pada 6400 psi sebesar 144,67 HB. Pada data per spesimen, nilai tertinggi mencapai 155 HB pada salah satu spesimen penguat 11%–6000 psi dan salah satu spesimen penguat 17%–6400 psi. Perbedaan antara nilai maksimum spesimen dan rerata kombinasi penting diperhatikan karena satu nilai tinggi belum selalu menunjukkan kestabilan proses. Penelitian sejenis pada AMC juga memperlihatkan bahwa komposisi dan tekanan dapat menghasilkan perubahan kekerasan yang berbeda akibat kondisi distribusi penguat [13], [15].



Gambar 6 Pengaruh tekanan kompaksi terhadap rerata kekerasan

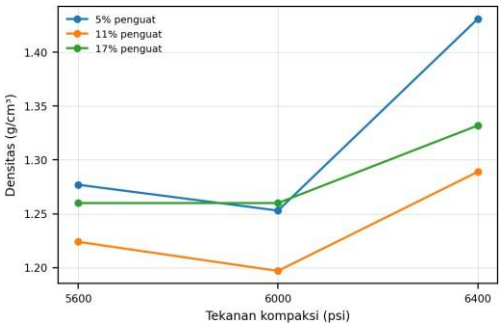
Nilai kekerasan yang tinggi belum cukup untuk menyatakan material langsung layak sebagai kampas rem. Beberapa penelitian kampas rem komposit menggunakan kekerasan sebagai salah satu indikator, tetapi tetap memerlukan pengujian lain seperti keausan, koefisien gesek, dan stabilitas termal untuk mengevaluasi performa pada kontak pengereman [1], [7]. Oleh karena itu, hasil kekerasan penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai tahap penyaringan komposisi untuk pengujian lanjutan.

2. Densitas Komposit

Berbeda dengan kekerasan, respons densitas tidak menunjukkan kenaikan yang benar-benar linier. Rerata densitas berdasarkan tekanan adalah 1,254 g/cm³ pada 5600 psi, turun sedikit menjadi 1,236 g/cm³ pada 6000 psi, kemudian meningkat menjadi 1,351 g/cm³ pada 6400 psi. Nilai ini menunjukkan bahwa penambahan tekanan dapat membantu pemadatan, tetapi hasil akhirnya tetap dipengaruhi oleh rongga, distribusi partikel, serta perbedaan densitas masing-masing bahan penyusun. [17], [18].

Jika dilihat berdasarkan fraksi penguat, densitas rata-rata adalah 1,320 g/cm³ pada 5%, 1,237 g/cm³ pada 11%, dan 1,284 g/cm³ pada 17%. Respons tidak linier tersebut sesuai dengan karakter komposit yang mengandung CSA karena penambahan partikel berbasis abu dapat menurunkan densitas bulk, sedangkan porositas dan kualitas dispersi dapat mengubah selisih antara densitas teoritis dan densitas aktual [18], [19].

Rerata kombinasi densitas tertinggi diperoleh pada penguat 5% dan tekanan 6400 psi sebesar 1,431 g/cm³, sedangkan nilai spesimen tertinggi pada kombinasi yang sama mencapai 1,658 g/cm³. Hasil ini memperlihatkan bahwa tekanan 6400 psi mampu menghasilkan densitas tertinggi pada sebagian kondisi, tetapi fraksi penguat yang lebih besar tidak otomatis menghasilkan material yang lebih rapat. Ukuran CSA yang lebih kecil dibandingkan serbuk Fe, CuZn, dan aluminium berpotensi membantu pengisian celah, namun penggumpalan atau distribusi yang tidak seragam tetap dapat membentuk pori.



Gambar 7 Pengaruh tekanan kompaksi terhadap rerata densitas

3. Implikasi terhadap Kandidat Material Kampas Rem

Secara keseluruhan, tekanan 6400 psi menghasilkan rerata kekerasan dan densitas tertinggi jika seluruh variasi komposisi digabungkan. Namun, komposisi yang memberikan kekerasan tertinggi berbeda dengan komposisi yang menghasilkan densitas tertinggi. Penguat 17% pada 6400 psi

memberikan rerata kekerasan terbesar, sedangkan penguat 5% pada 6400 psi memberikan rerata densitas terbesar. Kondisi ini menunjukkan adanya kompromi antara peningkatan kekerasan dan perubahan kerapatan material.

Temuan tersebut sejalan dengan prinsip pengembangan komposit hibrid bahwa penambahan penguat tidak selalu memberikan satu arah perubahan pada seluruh sifat material. Penelitian berbasis CSA melaporkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa dapat menaikkan kekerasan sekaligus mengubah densitas, sedangkan besarnya perubahan sangat dipengaruhi oleh kadar penguat dan kondisi proses [8], [9]. Dengan demikian, pemilihan komposisi untuk kampas rem sebaiknya tidak hanya didasarkan pada nilai kekerasan tertinggi, tetapi dilanjutkan dengan uji keausan, koefisien gesek, ketahanan panas, serta pengamatan struktur mikro. [19], [20]

4. Hasil Perbandingan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini menunjukkan pola yang berbeda jika dibandingkan dengan beberapa penelitian komposit matriks aluminium untuk kampas rem. Ridani dkk. [1] melaporkan kekerasan tertinggi 73,66 HB dan densitas 2,498 g/cm³ pada komposit yang diperkuat pasir silika hibrid. Penelitian Asep dkk. [5] juga menunjukkan peningkatan sifat setelah proses sintering, dengan kekerasan mencapai 71,8 HB dan densitas 2,368 g/cm³. Nilai tersebut tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan penelitian ini karena jenis penguat, kondisi kompaksi, tahapan proses, dan kondisi pengujiannya berbeda.

Tabel 3. Perbandingan hasil utama dengan penelitian terdahulu.

Studi	**Kekerasan (HB)**	**Densitas (g/cm3)**
Ridani dkk, [1]	73,66	2,498
Asep dkk, [5]	71,8	2,368
Penelitian ini*	144,67	1,431

**Nilai penelitian ini merupakan rerata kombinasi perlakuan tertinggi pada data pra-sintering.*

Rerata kekerasan tertinggi pada penelitian ini lebih besar dibandingkan angka yang dilaporkan pada dua penelitian tersebut, sedangkan densitasnya lebih rendah. Perbedaan ini tidak serta-merta menunjukkan material yang lebih baik atau lebih buruk. Kekerasan hanya menggambarkan ketahanan permukaan terhadap penetrasi, sedangkan densitas berkaitan dengan kerapatan material dan keberadaan pori. Komposisi serbuk kuningan dan besi yang digunakan bersama CSA juga memberikan karakter yang berbeda dari penguat berbasis silika, SiC, atau abu pertanian pada penelitian lain [1][5].

Selain itu, data yang dianalisis pada artikel ini merupakan data pra-sintering yang tersedia pada laporan proyek akhir. Karena sintering dapat meningkatkan ikatan antarpartikel, mengurangi sebagian porositas, dan mengubah respons mekanik, hasil pra-sintering lebih tepat diposisikan sebagai gambaran awal dari pengaruh komposisi dan tekanan kompaksi. Dengan demikian, tahap berikutnya yang paling penting bukan hanya mencari nilai kekerasan yang lebih tinggi, tetapi memverifikasi konsistensi hasil setelah sintering serta menghubungkannya dengan laju keausan dan koefisien gesek yang merupakan parameter utama dalam aplikasi kampas rem.

KESIMPULAN

Penelitian Variasi komposisi penguat dan tekanan kompaksi menghasilkan perubahan kekerasan dan densitas komposit matriks aluminium. Tekanan kompaksi menunjukkan kecenderungan yang paling jelas terhadap kekerasan, dengan rerata keseluruhan meningkat dari 91,11 HB pada 5600 psi menjadi 137,33 HB pada 6400 psi. Kombinasi penguat 17% dan tekanan 6400 psi menghasilkan rerata kekerasan tertinggi sebesar 144,67 HB, sedangkan nilai spesimen tertinggi mencapai 155 HB. Densitas menunjukkan respons yang tidak linier; rerata kombinasi tertinggi sebesar 1,431 g/cm³ dan nilai spesimen tertinggi 1,658 g/cm³ sama-sama diperoleh pada penguat 5% dan tekanan 6400 psi. Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan tinggi dapat mendukung pemadatan dan peningkatan kekerasan, tetapi fraksi penguat, homogenitas, serta distribusi partikel tetap menentukan karakter material. Komposit yang dihasilkan dapat dijadikan kandidat awal untuk pengembangan kampas rem non-asbestos, namun kelayakan aplikasinya masih memerlukan pengujian tribologi dan termal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, khususnya Jurusan Rekayasa Mesin serta laboratorium dan bengkel yang mendukung proses pembuatan spesimen dan pengujian material pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. H. Fikri, S. Wiryono, and M. Subhan, “Penyelidikan Kampas Rem Komposit Matriks Aluminium Diperkuat Boiler-Fly-Ash dan

Silika Terhadap Nilai Densitas dan Kekerasannya," Infotekmesin, vol. 16, no. 2, pp. 477–484, 2025, doi: 10.35970/infotekmesin.v16i2.2561.

[2] A. P. Murali, K. R. Kannan, K. V. Shankar, K. G. Krishnan, S. Kannan, B. Sankar, R. Kumar, and S. Karuppaiah, "Influence of ageing time on the microstructural and mechanical behaviour of Al-Si-Mg/coconut shell ash metal matrix composite," Scientific Reports, vol. 16, art. no. 6629, 2026, doi: 10.1038/s41598-026-35796-9.

[3] A. G. Dylan, S. Sugiyarto, A. Wanto, A. Budi, and S. Sukanto, "Pembuatan Komposit Matrik Aluminium Diperkuat Silicon Carbida Dan Rice Husk Ash Dengan Metode Metalurgi Serbuk," LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana, vol. 10, no. 2, pp. 61–68, 2023, doi: 10.35508/ljtmu.v10i02.13481.

[4] A. M. Sankhla, K. M. Patel, M. A. Makhesana, K. Giasin, D. Y. Pimenov, S. Wojciechowski, and N. Khanna, "Effect of mixing method and particle size on hardness and compressive strength of aluminium based metal matrix composite prepared through powder metallurgy route," Journal of Materials Research and Technology, vol. 18, pp. 282– 292, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.094.

[5] Ardiansyah, S. Wiryono, Erwanto, and Y. Oktriadi, "Pembuatan Komposit Matrik Resin Fenolik Diperkuat Serbuk Logam dan RHA Hibrid dengan Metode Metalurgi Serbuk," Machine: Jurnal Teknik Mesin, vol. 11, no. 2, pp. 135–142, 2025, doi: 10.33019/nea0v054.

[6] ASTM International, ASTM B962-17, Standard Test Methods for Density of Compacted or Sintered Powder Metallurgy (PM) Products Using Archimedes' Principle. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2017.

[7] ASTM International, ASTM E110-14, Standard Test Method for Rockwell and Brinell Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2014.

[8] G. T. Sudha, B. Stalin, M. Ravichandran, and M. Balasubramanian, "Mechanical properties, characterization and wear behavior of powder metallurgy composites – A review," Materials Today: Proceedings, vol. 22, pp. 2582–2596, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.389.

[9] H. N. Ridani, S. Sukanto, and R. Rodika, "Kajian Komposit Matrik Alumunium Untuk Kampas Rem Sepeda Motor Diperkuat Pasir Silika Hibrid (SiO2/BA/RHA) Dengan Metode Metalurgi Serbuk," Jurnal Inovasi Teknologi Terapan, vol. 3, no. 1, pp. 36–42, 2025, doi: 10.33504/jitt.v3i1.245.

[10] J. M. Torralba, C. E. da Costa, and F. Velasco, "P/M aluminum matrix composites: An overview," Journal of Materials Processing Technology, vol. 133, no. 1–2, pp. 203–206, 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00234-0.

[11] K. K. Sadhu, N. Mandal, and R. R. Sahoo, "SiC/graphene reinforced aluminum metal matrix composites prepared by powder metallurgy: A review," Journal of Manufacturing Processes, vol. 91, pp. 10–43, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.02.026.

[12] K. Maclin John Vasanth, P. S. Lokendar Ram, V. Pon Anand, M. Prabu, and S. Rahul, "Experimental investigation of mechanical and tribological properties of Aluminium metal matrix composites fabricated by powder metallurgy route – A review," Materials Today: Proceedings, vol. 33, pp. 1058–1072, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.057.

[13] L. J. Kumar, V. J. S., J. P. Ganjigatti, G. Irfan, and R. Thara, "Investigation of mechanical properties of Al6061 with reinforcement of coconut shell ash and graphene metal matrix composites," Materials Today: Proceedings, vol. 92, pt. 1, pp. 413–417, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.529.

[14] M. Asep, Sugiyarto, Somawardi, A. Rusdy, and S. Sukanto, "Pengaruh Variasi Tekanan Kompaksi Panas Terhadap Densitas Dan Kekerasan AMC Diperkuat SiO2," Machine: Jurnal Teknik Mesin, vol. 9, no. 1, pp. 1–7, 2023, doi: 10.33019/jm.v9i1.3606.

[15] M. G. Al Ghifari, S. Somawardi, A. Rusdi, and S. Sukanto, "Rekayasa Komposit Matrik Aluminium Diperkuat Alumina Dan Bagasse Ash Dengan Metode Metalurgi Serbuk," Jurnal Inovasi Teknologi Terapan, vol. 2, no. 2, pp. 269–276, 2024, doi: 10.33504/jitt.v2i2.151.

[16] S. Febriany, S. Sukanto, and S. Subkhan, "Pengaruh Tekanan Kompaksi Terhadap

Densitas Dan Kekerasan AMC Diperkuat SiC Dan RHA Metode Metalurgi Serbuk," Jurnal Inovasi Teknologi Terapan, vol. 2, no. 2, pp. 388–395, 2024, doi: 10.33504/jitt.v2i2.143.

[17] S. Tejyan, A. K. Tiwari, N. Kumar, V. Singh, and B. Gangil, "Influence of coconut shell ash and cow dung ash reinforcement on the mechanical properties of aluminum alloy composites synthesized by stir casting," Materials Today: Proceedings, 2024, doi: 10.1016/j.matpr.2024.05.099.

[18] S. Tejyan, A. K. Tiwari, N. Kumar, V. Singh, and B. Gangil, "Influence of coconut shell ash and cow dung ash reinforcement on the mechanical properties of aluminum alloy composites synthesized by stir casting," Materials Today: Proceedings, 2024, doi: 10.1016/j.matpr.2024.05.099.

[19] U. K. Annigeri and G. B. Veeresh Kumar, "Effect of reinforcement on density, hardness and wear behaviour of aluminium metal matrix composites: A review," MaterialsnToday: Proceedings, vol. 5, no. 5, part 2, pp. 11233–11237, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.02.002.

[20] V. Chak, H. Chattopadhyay, and T. L. Dora, "A review on fabrication methods, reinforcements and mechanical properties of aluminum matrix composites," Journal of Manufacturing Processes, vol. 56, pp. 1059–1074, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.05.042.

ANALISIS KEANDALAN MESIN JET DYEING MENGGUNAKAN METODE RCM DAN FMEA PADA INDUSTRI TEKSTIL

Rangga Putra Irdian [1], Jojo Sumarjo [1], Deri Teguh Santoso [1], Marno [1], Kayla Rahma Nourizka [2]

[1] Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

[2] Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

Jl. HS. Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat

angrangga42@gmail.com [1]

Abstrak

Tingginya frekuensi *downtime* pada mesin *jet dyeing* Tonghue di PT. Toyobo Manufacturing Indonesia berdampak langsung pada penurunan efisiensi dan keandalan proses produksi tekstil. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi moda kegagalan, menganalisis tingkat *downtime*, serta menentukan strategi pemeliharaan yang tepat berbasis data historis periode Januari 2020–Desember 2024. Metode yang diterapkan adalah *Reliability Centered Maintenance* (RCM) yang didukung oleh analisis *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), dan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyebab kerusakan didominasi oleh kebocoran dengan total 75 kejadian dari 144 total insiden, serta keausan komponen pada *mechanical seal*, *bearing*, dan *packing*. Mesin T 30-2 mencatat frekuensi kerusakan tertinggi (31 kejadian, MTBF = 45.106 menit), sedangkan mesin T 20-2 memiliki total waktu henti terbesar (13.160 menit, MTTR = 506 menit/kejadian). Analisis FMEA menghasilkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi sebesar 192 pada mesin T 20-2 dan T 30-2. Total potensi kerugian produksi akibat *downtime* seluruh mesin mencapai 15.524,3 kg. Berdasarkan nilai MTBF, *interval preventive maintenance* diusulkan pada 80% nilai MTBF, berkisar antara 25,1 hingga 40,9 hari operasi per mesin, yang berpotensi mengurangi kerugian produksi secara signifikan apabila diimplementasikan secara konsisten.

Kata kunci : *jet dyeing*, *downtime*, RCM, FMEA, *preventive maintenance*.

Abstract

The high frequency of downtime on Tonghue jet dyeing machines at PT. Toyobo Manufacturing Indonesia significantly reduces production efficiency and system reliability. This study aims to identify failure modes, analyze downtime levels, and establish appropriate maintenance strategies based on historical data from January 2020 to December 2024. The methodology employs Reliability Centered Maintenance (RCM) supported by MTBF, MTTR, and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Results indicate that failures are dominated by leakage (75 of 144 total incidents) and component wear, particularly in mechanical seals, bearings, and packing. Machine T 30-2 recorded the highest failure frequency (31 incidents, MTBF = 45,106 minutes), while machine T 20-2 exhibited the longest downtime (13,160 minutes, MTTR = 506 minutes/incident). FMEA analysis yielded the highest Risk Priority Number (RPN) of 192 for machines T 20-2 and T 30-2. Total potential production loss across all machines was estimated at 15,524.3 kg. Based on MTBF values, preventive maintenance intervals are proposed at 80% of the MTBF, ranging from 25.1 to 40.9 operational days per machine, which is projected to substantially reduce production losses if consistently implemented.

Key words : *jet dyeing, downtime, RCM, FMEA, preventive maintenance.*

PENDAHULUAN

Pengujian Industri tekstil merupakan salah satu sektor strategis dalam perekonomian Indonesia. Selain menjadi penyumbang devisa negara yang signifikan, industri ini berperan dalam menciptakan lapangan kerja bagi jutaan masyarakat di berbagai daerah [1]. Keberhasilan industri tekstil nasional tidak terlepas dari kinerja mesin-mesin produksi yang beroperasi secara kontinu dan andal. Salah satu proses krusial dalam produksi kain adalah proses *dyeing* atau pencelupan, yang menentukan keseragaman warna serta tampilan akhir produk.

Mesin *jet dyeing* merupakan peralatan utama dalam proses pencelupan yang bekerja dengan prinsip sirkulasi fluida bertekanan tinggi

pada temperatur operasi hingga 130°C. Kondisi termal dan tekanan yang tinggi secara kontinu menempatkan komponen *sealing* seperti *mechanical seal*, *packing*, dan *O-ring* pada risiko keausan yang signifikan. Permasalahan yang paling sering terjadi adalah *downtime* yang tidak terencana, yang dapat menghambat proses produksi dan berpotensi menurunkan kualitas produk akhir.

Penelitian mengenai strategi pemeliharaan berbasis keandalan (*Reliability Centered Maintenance*/RCM) pada industri manufaktur telah banyak dilakukan. Nurcahyo [2] mendefinisikan RCM sebagai pendekatan sistematis yang mengintegrasikan data keandalan historis dengan analisis kegagalan untuk mengoptimalkan strategi perawatan. Prastiawan dkk. [3] berhasil menerapkan RCM pada mesin amplas *multipleks* di industri *plywood* dan membuktikan bahwa pendekatan ini mampu meningkatkan interval perawatan secara terencana dibandingkan strategi reaktif. Sejalan dengan itu, Islam dkk. [4] mengembangkan metode *Fuzzy* FMEA untuk analisis *preventive maintenance* pada mesin produksi, dan menyimpulkan bahwa identifikasi komponen kritis melalui nilai RPN merupakan langkah fundamental dalam penentuan prioritas perawatan.

Pada konteks mesin pencelupan, Sana dkk. [5] menjelaskan bahwa mesin *jet dyeing* dengan sistem sirkulasi *soft flow* memiliki keunggulan dalam efisiensi penggunaan larutan pewarna, namun rentan terhadap kegagalan pada sistem pompa dan katup akibat paparan bahan kimia bertemperatur tinggi secara berkepanjangan. Fadilah dkk. [6] lebih lanjut mendemonstrasikan bahwa perhitungan MTBF dan MTTR secara kuantitatif memberikan dasar yang objektif bagi perencanaan jadwal *preventive maintenance*, sehingga *downtime* yang tidak terencana dapat diantisipasi.

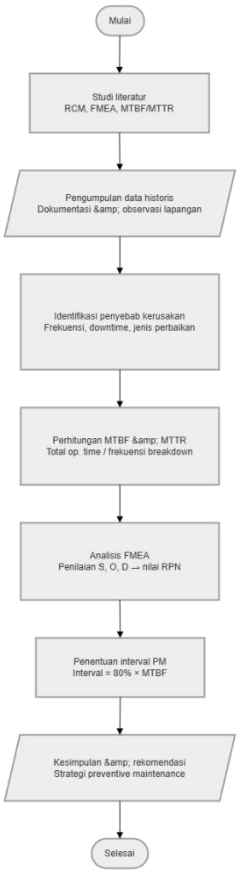
Pada PT. Toyobo Manufacturing Indonesia, mesin *jet dyeing* Tonghue digunakan secara kontinu dalam proses pencelupan kain. Berdasarkan data historis periode Januari 2020 hingga Desember 2024, mesin-mesin tersebut mengalami total 144 kejadian kerusakan dengan total *downtime* keseluruhan mencapai 45.740 menit. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan yang berjalan saat ini masih bersifat reaktif dan belum optimal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi moda kegagalan (*failure mode*) dominan pada mesin *jet dyeing* Tonghue; (2) menganalisis parameter keandalan MTBF dan MTTR; (3) menentukan komponen kritis berdasarkan nilai RPN melalui FMEA; dan (4) merumuskan strategi pemeliharaan preventif berbasis nilai MTBF yang terukur.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Departemen *Dyeing* PT. Toyobo Manufacturing Indonesia, Kawasan KIIC Karawang, Jawa Barat. Objek penelitian adalah enam unit mesin *jet dyeing* Tonghue (kode: T 05, T 20-1, T 20-2, T 30-1, T 30-2, T 30-3) yang beroperasi 24 jam per hari. Data yang dianalisis merupakan data historis periode Januari 2020 hingga Desember 2024, mencakup 144 kejadian kerusakan pada seluruh unit mesin.

Pengumpulan data dilakukan melalui dua metode: (1) dokumentasi, yaitu pengambilan data historis *downtime*, frekuensi kerusakan, dan catatan perbaikan komponen dari sistem arsip perusahaan; dan (2) observasi lapangan, yaitu pengamatan langsung terhadap kondisi operasional mesin dan prosedur pemeliharaan yang berjalan.

Teknik Analisis Data Metode utama adalah RCM dengan dukungan perhitungan keandalan dan FMEA. Langkah analisis disajikan pada Gambar 1 (diagram alir penelitian).



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Analisis dilaksanakan secara bertahap mengikuti kerangka RCM. Pertama, dilakukan perhitungan MTBF dan MTTR menggunakan persamaan berikut [4]:

$$\boldsymbol{MTBF} = \frac{\boldsymbol{Total\ Operation\ Time}}{\boldsymbol{Frekuensi\ Breakdown}} \text{.....(1)}$$

$$\boldsymbol{MTTR} = \frac{\boldsymbol{Total\ Time\ to\ Repair}}{\boldsymbol{Frekuensi\ Breakdown}} \text{.....(2)}$$

Di mana *Total Operation Time* diperoleh dari selisih antara total waktu kalender operasional standar (mesin beroperasi 24 jam/hari selama ±1.199 hari dalam periode 5 tahun, atau ±1.405.440 menit untuk seluruh periode) dengan total *downtime* masing-masing mesin. Nilai MTBF yang mendekati satu sama lain pada Tabel 4 merupakan konsekuensi langsung dari dasar penghitungan yang sama: penyebut (*total operation time*) hampir identik karena seluruh mesin tunduk pada kalender operasional yang seragam (jam kerja, hari libur, dan cuti bersama yang sama), sedangkan pembilang (jumlah frekuensi *breakdown*) yang berbeda menjadi pembeda utama nilai MTBF antarmesin.

Nilai MTBF selanjutnya digunakan sebagai landasan penentuan *interval preventive maintenance* (PM) dengan mengaplikasikan rasio keamanan 80% dari nilai MTBF, yang dalam literatur rekayasa keandalan dikenal sebagai pendekatan konservatif untuk memberikan selang waktu penyangga (*buffer*) sebelum peluang kegagalan meningkat signifikan [2]. Persamaannya adalah:

Interval PM = 0,80 × MTBF

Kedua, dilakukan analisis FMEA untuk menentukan nilai *Risk Priority Number* (RPN) menggunakan persamaan [4]:

$$RPN = S \times O \times D \text{ .....(3)}$$

Nilai *Severity* (S) ditentukan berdasarkan rata-rata MTTR aktual masing-masing mesin yang dikonversi ke dalam satuan jam dan dicocokkan dengan tabel kriteria. Nilai *Occurrence* (O) ditentukan berdasarkan rata-rata frekuensi kerusakan tahunan (total frekuensi dibagi 5 tahun) yang dicocokkan dengan tabel kriteria frekuensi. Nilai *Detection* (D) ditentukan berdasarkan kemampuan sistem pemeliharaan perusahaan dalam mendeteksi kegagalan sebelum terjadi, yang dinilai melalui observasi lapangan terhadap prosedur inspeksi yang berlaku. Pendekatan berbasis data historis ini menjamin objektivitas dan replikabilitas penilaian [4].

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Frekuensi Kerusakan dan *Downtime*

Berdasarkan data historis periode Januari 2020–Desember 2024, diperoleh rekapitulasi frekuensi kerusakan dan total *downtime* untuk setiap unit mesin *jet dyeing* Tonghue sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Frekuensi Kerusakan dan Total *Downtime* pada Mesin *Jet dyeing* Tonghue

Kode Mesin	Frekuensi Perbaikan	*Total Downtime (Menit)*
T 05	19	6.585
T 20-1	21	6.070
T 20-2	26	13.160
T 30-1	20	8.015
T 30-2	31	7.150
T 30-3	27	4.760

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa mesin T 30-2 memiliki frekuensi kerusakan tertinggi (31 kejadian, 21,5% dari total), sedangkan mesin T 20-2 mencatat total *downtime* terbesar (13.160 menit, 28,8% dari total *downtime*). Paradoks antara frekuensi dan durasi ini memiliki implikasi teknis yang signifikan: mesin T 30-2 mengalami kegagalan paling sering, namun setiap kejadiannya relatif singkat (MTTR = 231 menit); sebaliknya, mesin T 20-2 mengalami kegagalan yang lebih jarang tetapi dengan durasi perbaikan yang jauh lebih panjang (MTTR = 506 menit), mengindikasikan kompleksitas kerusakan yang lebih tinggi pada mesin tersebut.

2. Analisis Penyebab Kerusakan

Tabel 2 menyajikan distribusi penyebab kerusakan pada seluruh unit mesin selama periode observasi.

Tabel 2 Distribusi Penyebab Kerusakan pada Mesin *Jet dyeing* Tonghue

Penyebab Kerusakan	T 05	T 20-1	T 20-2	T 30-1	T 30-2	T 30-3
Bocor	10	10	13	11	17	14
Error	3	0	4	2	1	2
Karat	1	0	2	1	1	0
Rusak	2	5	0	1	2	0
Aus	2	5	4	2	6	6
Retak	0	1	0	0	1	1
Kotoran	0	0	2	1	1	1
Kerusakan *Gear*/ Baut	0	0	1	2	2	2
Total	**19**	**21**	**26**	**20**	**31**	**27**

Kebocoran (*leakage*) merupakan penyebab kegagalan yang paling dominan dengan total 75 kejadian (52,1% dari 144 total insiden). Keausan (aus) menempati posisi kedua dengan 25 kejadian, disusul kerusakan komponen (rusak) sebanyak 10 kejadian.

Dominasi kebocoran sebagai penyebab *downtime* memiliki justifikasi teknis yang jelas dan dapat dijelaskan melalui *Root Cause Analysis* (RCA). Mesin *jet dyeing* Tonghue beroperasi pada tekanan kerja hingga 3–4 bar dan temperatur larutan pencelup mencapai 130°C secara siklus berulang. Paparan termal dan tekanan tinggi yang kontinu ini menyebabkan degradasi material elastomer pada *mechanical seal* dan *packing*, yang bermanifestasi sebagai kebocoran (*leakage*). Mekanisme kegagalannya adalah: (a) siklus termal berulang menyebabkan *thermal fatigue* dan *creep* pada material karet/elastomer *seal*, yang secara bertahap kehilangan elastisitas dan kemampuan *sealing*-nya; (b) paparan kimia dari larutan pewarna bersifat korosif dan dapat mendegradasi komposisi material *seal* dari dalam; dan (c) beban hidrodinamik dari putaran pompa sirkulasi menyebabkan aus abrasif pada *mechanical seal face*. Ketiga faktor ini bekerja secara sinergis, yang menjelaskan mengapa penggantian *mechanical seal* mendominasi jenis perbaikan (30 penggantian dari total 144 aksi, atau 20,8%).

3. Jenis Perbaikan Komponen Kritis

Tabel 3 Jenis Perbaikan Komponen Kritis pada Mesin *Jet dyeing* Tonghue

Jenis Perbaikan	T 05	T 20-1	T 20-2	T 30-1	T 30-2	T 30-3
Ganti *Mechanical seal*	3	2	5	5	8	7
Ganti *Bearing*	0	5	4	2	6	6
Ganti *Packing*	4	1	1	1	2	1
Ganti O-Ring	1	0	1	2	2	1
Ganti *Rubber Coupling*	1	0	2	0	4	0
Perbaikan *Valve*	0	3	1	2	1	2
Overhaul	1	0	1	1	1	1
Lainnya	9	10	11	7	7	9
Total	**19**	**21**	**26**	**20**	**31**	**27**

Data pada Tabel 3 mengkonfirmasi bahwa penggantian *mechanical seal* (total 30 kali), *bearing* (total 23 kali), dan *packing* (total 10 kali) merupakan tiga jenis perbaikan yang paling dominan. Ketiga komponen ini secara bersama-sama merepresentasikan 43,8% dari seluruh aksi perbaikan, mengkonfirmasikan status mereka sebagai komponen kritis (*critical components*) yang harus menjadi fokus utama program *preventive maintenance*.

4. Perhitungan MTBF dan MTTR

Hasil perhitungan parameter keandalan mesin disajikan pada Tabel 4. Nilai *Total Operation Time* diperoleh dari total waktu kalender standar (±1.405.440 menit untuk seluruh periode 5 tahun, mencerminkan operasi 24 jam/hari pada hari kerja aktif, setelah dikurangi hari libur nasional, cuti bersama, dan akhir pekan) dikurangi total *downtime* masing-masing mesin. Nilai yang hampir seragam pada kolom *Total Operation Time* (rentang 1.392.280–1.400.680 menit) merupakan konsekuensi wajar dari kesamaan kalender operasional yang diberlakukan pada seluruh unit mesin, sementara perbedaan antarmesin semata-mata ditentukan oleh besarnya total *downtime* masing-masing.

Tabel 4 Hasil Perhitungan MTBF dan MTTR Mesin *Jet dyeing* Tonghue

Kode Mesin	*Time to Repair* (menit)	*Total Operation Time* (menit)	MTBF (menit)	MTTR (menit)
T 05	6.585	1.398.855	73.624	347
T 20-1	6.070	1.399.370	66.637	289
T 20-2	13.160	1.392.280	53.549	506
T 30-1	8.015	1.397.425	69.871	401
T 30-2	7.150	1.398.290	45.106	231
T 30-3	4.760	1.400.680	51.877	176

Mesin T 05 menunjukkan keandalan tertinggi dengan MTBF = 73.624 menit (±51,1 hari) dan MTTR = 347 menit (±5,8 jam), sementara mesin T 30-2 memiliki keandalan terendah dengan MTBF = 45.106 menit (±31,3 hari). Nilai MTTR tertinggi dimiliki mesin T 20-2 sebesar 506 menit (±8,4 jam), yang mengindikasikan kompleksitas perbaikan yang signifikan, konsisten dengan ditemukannya dua *overhaul* besar (*over houle*) dan durasi *cek hike* yang panjang (7.680 menit) pada mesin tersebut.

5. Analisis FMEA dan Penentuan RPN

Penentuan nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) didasarkan pada tiga kriteria tabel yang ditetapkan secara objektif menggunakan data historis perusahaan, sebagaimana disajikan pada Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7.

Tabel 5 Kriteria *Severity* (S) Berdasarkan Rata-rata MTTR

Nilai S	Kriteria	Rata-rata Downtime	Dampak pada Produksi
1	Sangat Rendah	≤ 1 jam	Hampir tidak berdampak pada produksi
2	Rendah	1–2 jam	Gangguan kecil, dapat diatasi tanpa menghentikan produksi
3	Cukup Rendah	2–3 jam	Mengurangi efisiensi, masih dapat diatasi dengan penjadwalan ulang

4	Sedang	3–4 jam	Menghambat sebagian proses, menyebabkan keterlambatan *output*
5	Cukup Tinggi	4–5 jam	Produksi terganggu signifikan, menyebabkan backlog
6	Tinggi	5–6 jam	*Downtime* cukup panjang, berdampak pada pengiriman produk
7	Sangat Tinggi	6–7 jam	Produksi terhenti lama, kehilangan pendapatan signifikan
8	Parah	7–9 jam	Gangguan produksi sangat besar, perlu tindakan segera
9	Sangat Parah	9–10 jam	Produksi hampir tidak berjalan, dampak finansial besar
10	Kritis	> 10 jam	*Downtime* ekstrem, berpotensi penghentian operasional sementara

Tabel 6 Kriteria *Occurrence* (O) Berdasarkan Frekuensi Tahunan

Nilai O	Kriteria	Frekuensi Kejadian
1	Sangat Jarang	< 1× per tahun
2	Jarang Terjadi	1× per tahun
3	Tidak Sering	2× per tahun
4	Kadang-kadang	3–4× per tahun
5	Cukup Sering	4–5× per tahun
6	Sering Terjadi	5–6× per tahun
7	Sangat Sering	6–7× per tahun
8	Hampir Selalu	7–8× per tahun
9	Nyaris Pasti	8–9× per tahun
10	Selalu Terjadi	> 9× per tahun

Tabel 7 Kriteria *Detection* (D) Berdasarkan Kemampuan Deteksi Sistem

Nilai D	Kriteria	Kemungkinan Terdeteksi
1	Sangat Mudah Dideteksi	≥ 99%
2	Mudah Dideteksi	≥ 95%
3	Cukup Mudah Dideteksi	≥ 85%
4	Terkadang Dapat Dideteksi	≥ 75%
5	Tidak Selalu Dapat Dideteksi	≥ 60%
6	Cukup Sulit Dideteksi	≥ 40%
7	Sulit Dideteksi	≥ 20%
8	Sangat Sulit Dideteksi	≥ 10%
9	Hampir Tidak Dapat Dideteksi	< 5%
10	Tidak Ada Mekanisme Deteksi	0%

Sebagai contoh justifikasi skor untuk mesin T 20-2: (a) S = 8 karena MTTR rata-rata = 506 menit ≈ 8,4 jam, yang masuk dalam rentang 7–9 jam (kriteria "Parah"); (b) O = 6 karena frekuensi kerusakan 26 kejadian dalam 5 tahun = 5,2 kejadian/tahun, masuk dalam rentang 5–6 kali/tahun (kriteria "Sering Terjadi"); (c) D = 4 karena sistem inspeksi hanya mampu mendeteksi kegagalan dengan probabilitas ≥ 75% berdasarkan observasi lapangan, menunjukkan deteksi yang belum konsisten. Dengan justifikasi yang analog dan berbasis data, skor untuk seluruh mesin ditentukan sebagaimana tersaji pada Tabel 8.

Tabel 8 Nilai RPN Hasil Analisis FMEA Mesin Jet *dyeing Tonghue*

Kode Mesin	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN	Prioritas
T 05	6	3	6	108	Sedang
T 20-1	5	4	5	100	Sedang
T 20-2	**8**	**6**	**4**	**192**	**Kritis**
T 30-1	7	5	5	175	Tinggi
T 30-2	**4**	**8**	**6**	**192**	**Kritis**
T 30-3	3	7	4	84	Rendah

Mesin T 20-2 dan T 30-2 memperoleh RPN tertinggi sebesar 192, namun dengan profil risiko yang berbeda. Mesin T 20-2 memiliki RPN = 8 × 6 × 4 = 192, yang didominasi oleh nilai *Severity* tinggi (dampak perbaikan yang panjang dan parah), sedangkan mesin T 30-2 memiliki RPN = 4 × 8 × 6 = 192 yang didominasi oleh nilai *Occurrence* sangat tinggi (kegagalan sangat sering terjadi) dikombinasikan dengan *Detection* yang sulit. Perbedaan profil ini memerlukan respons strategi yang berbeda: mesin T 20-2 membutuhkan perbaikan kualitas komponen dan prosedur perbaikan untuk memperpendek MTTR, sementara mesin T 30-2 membutuhkan peningkatan frekuensi inspeksi untuk mengurangi laju kegagalan.

6. Estimasi Loss Produksi dan Potensi Penghematan

Mesin *jet dyeing* beroperasi dengan kapasitas produksi: 30 kg/480 menit untuk T 05; 170 kg/480 menit untuk T 20-1 dan T 20-2; dan 200 kg/480 menit untuk T 30-1, T 30-2, dan T 30-3. Total estimasi kerugian produksi akibat *downtime* disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9 Estimasi Potensi Kerugian Produksi Akibat *Downtime* (2020–2024)

Kode Mesin	Produksi per 480 menit (kg)	Total Downtime (menit)	Total Loss Produksi (kg)
T 05	30	6.585	411,6

T 20-1	170	6.070	2.149,8
T 20-2	170	13.160	4.660,8
T 30-1	200	8.015	3.339,6
T 30-2	200	7.150	2.979,2
T 30-3	200	4.760	1.983,3
Total	**—**	**45.740**	**15.524,3**

Total potensi kerugian produksi seluruh mesin selama lima tahun mencapai 15.524,3 kg kain, dengan kontribusi terbesar dari mesin T 20-2 (4.660,8 kg) dan T 30-1 (3.339,6 kg). Apabila program *preventive maintenance* dengan interval yang diusulkan (Tabel 10) diimplementasikan secara konsisten, maka target pengurangan frekuensi *downtime* tidak terencana diperkirakan dapat mencapai 30–40% (asumsi konservatif berdasarkan literatur industri tentang efektivitas PM), yang berimplikasi pada potensi penghematan kerugian produksi sebesar 4.657–6.210 kg per siklus lima tahun.

7. Usulan Interval preventive maintenance

Berdasarkan nilai MTBF yang diperoleh, *interval preventive maintenance* (PM) diusulkan pada 80% nilai MTBF. Rasio 80% dipilih karena pada titik tersebut, berdasarkan kurva keandalan Weibull, peluang kegagalan mulai meningkat secara akseleratif sehingga intervensi PM sebelum titik ini secara statistik lebih efektif daripada menunggu hingga MTBF tercapai [5].

Tabel 10 Usulan *Interval preventive maintenance* Berdasarkan Nilai MTBF

Kode Mesin	MTBF (menit)	Interval PM (80% MTBF) (menit)	Interval PM (hari)	MTTR (menit)
T 05	73.624	58.899	40,9	347
T 20-1	66.637	53.310	37,0	289
T 20-2	53.549	42.839	29,7	506
T 30-1	69.871	55.897	38,8	401
T 30-2	45.106	36.085	25,1	231
T 30-3	51.877	41.502	28,8	176

Interval PM untuk mesin T 30-2 yang paling kritis adalah 25,1 hari (36.085 menit), sedangkan mesin T 05 dengan keandalan terbaik dapat dijadwalkan setiap 40,9 hari (58.899 menit). Jadwal ini harus diintegrasikan dengan sistem *work order* perusahaan dan mencakup pemeriksaan serta penggantian preventif pada *mechanical seal*, *bearing*, dan *packing* sebagai komponen kritis prioritas.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis RCM, MTBF/MTTR, dan FMEA pada enam unit mesin *jet dyeing* Tonghue di PT. Toyobo Manufacturing Indonesia periode 2020–2024, dapat disimpulkan:

1. Moda kegagalan dominan adalah kebocoran komponen **sealing** (75 dari 144 kejadian, 52,1%), yang secara teknis disebabkan oleh degradasi material elastomer akibat siklus termal berulang pada temperatur operasi ±130°C, paparan kimia korosif, dan aus abrasif pada permukaan *seal face*. Komponen kritis yang paling sering memerlukan penggantian adalah **mechanical seal** (30 kali), **bearing** (23 kali), dan **packing** (10 kali).
2. Analisis MTBF dan MTTR menunjukkan bahwa mesin T 30-2 memiliki keandalan terendah (MTBF = 45.106 menit, ±31,3 hari) dengan frekuensi kegagalan tertinggi, sementara mesin T 20-2 memiliki MTTR tertinggi (506 menit/kejadian) yang menunjukkan kompleksitas perbaikan tertinggi. Mesin T 05 mencatat performa terbaik dengan MTBF = 73.624 menit (±51,1 hari).
3. Analisis FMEA mengidentifikasi mesin T 20-2 (S=8, O=6, D=4) dan T 30-2 (S=4, O=8, D=6) sebagai mesin dengan RPN tertinggi (192) dan memerlukan prioritas penanganan. Kedua mesin memiliki profil risiko berbeda: T 20-2 didominasi *severity* tinggi akibat durasi perbaikan panjang, sedangkan T 30-2 didominasi *occurrence* tinggi akibat frekuensi kegagalan sangat sering.
4. Total potensi kerugian produksi selama lima tahun mencapai 15.524,3 kg kain. *Interval preventive maintenance* diusulkan pada 80% MTBF, berkisar 25,1–40,9 hari per mesin (T 30-2 paling sering pada 25,1 hari; T 05 paling jarang pada 40,9 hari), yang berpotensi mengurangi kerugian produksi sebesar 30–40% apabila diimplementasikan secara konsisten.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Toyobo Manufacturing Indonesia yang telah memberikan izin dan fasilitas penelitian. Apresiasi juga disampaikan kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang atas dukungan bimbingan akademik selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Anugrah *Et Al.*, "Analisis Industri Tekstil Di Jawa Barat Sebelum Dan Setelah Krisis Ekonomi Universitas Pakuan," Vol. 2, No. 2, Pp. 118–135, 2024, Doi: 10.59581/Doktrin-Widyakarya.V2i1.2579.

[2] A. N. Rahmat Nurcahyo, "Manajemen Pemeliharaan Preventive," 2024.

[3] A. Prastiawan *Et Al.*, "Metode Rcm Untuk Sistem Perawatan Mesin Amplas Multipleks Pada Pabrik Plywood Rcm Method For Multiplex Sandary Machine Maintenance System At Plywood Factory," *Jurnal Ilmiah Teknologi Fst Undana*, Vol. 15, No. 2, 2021.

[4] A. Wibi Sana, E. Novarini, U. Prayudie, R. Marlina Balai Besar Tekstil, And J. Jenderal Ahmad Yani No, "Studi Penggunaan Mesin Pencelupan Sistem Jet Tipe Soft Flow Untuk Pencelupan Kain Poliester Dan Kain Rayon A Study On Soft Flow Type *Jet dyeing* Machine Application For Polyester And Rayon Fabric Dyeing Process," 2015.

[5] H. P. R. A. K. Nur Fadilah Fatma, "Analisis Preventive Maintenance Dengan Metode Menghitung *Mean Time Between Failure* (Mtbf) Dan *Mean Time To Repair*(Mttr) (Studi Kasus Pt. Gajah Tunggal Tbk)".

[6] S. S. Islam, T. Lestari, A. Fitriani, And D. A. Wardani, "Analisis Preventive Maintenance Pada Mesin Produksi Dengan Metode Fuzzy Fmea," 2020.

Identifikasi risiko bahaya kerja dengan metode hiradc di PT. Pelabuhan Tanjung Priok pada bagian *maintenance* mesin *gantry lufting crane* (GLC)

Ariyo Agustianto Wibowo [1], Sulaeman Deni Ramdani [1], Misar Hardiyan [1]

[1] Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Mesin, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jl. Ciwaru Raya, No. 25, Serang Banten, 42117

2284220024@untirta.ac.id [1]

Abstrak

Semua jenis pekerjaan pastinya memiliki risiko bahaya dengan tingkatan masing-masing termasuk pekerjaan pada bagian *maintenance*. Dari permasalahan di atas, penelitian bertujuan untuk mengidentifikasi bahaya, penilaian risiko, dan pengendalian risiko bahaya di PT Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten dengan menggunakan metode HIRADC. Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis penelitian deskriptif. Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh melalui observasi langsung. Kemudian, data tersebut dianalisa dengan menggunakan Metode HIRADC (*Hazard Identification, Risk Assesment, and Determine Control*). Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat lima jenis pekerjaan yang diamati meliputi pengelasan, perawatan mesin bakar, pembersihan ruang kelistrikan, pelumasan, dan *preventif maintenance*. Hasil identifikasi menunjukkan tingkat risiko bervariasi dari rendah hingga tinggi, dengan risiko tertinggi pada pekerjaan di ketinggian. Upaya pengendalian yang direkomendasikan meliputi penggunaan APD, pelatihan keselamatan kerja, penerapan prosedur *lockout-tagout*, serta pemasangan sistem proteksi jatuh. Penerapan pengendalian ini penting untuk meminimalkan kecelakaan kerja dan meningkatkan keselamatan di lingkungan dermaga.

Kata kunci : HIRADC, identifikasi bahaya, penilaian risiko kerja, keselamatan kerja.

Abstract

All types of work certainly have a risk of danger with their respective levels including work in the maintenance section. From the above problems, the research aims to identify hazards, risk assessment, and risk control of hazards at PT Pelabuhan Tanjung Priok Banten Branch using the HIRADC method. This research uses qualitative methods with descriptive research types. The data in this study were taken from direct observation during the process of implementing industrial practice, which is one month. Then, the data was analysed using the HIRADC Method (Hazard Identification, Risk Assessment, and Determine Control). The results showed that there were five types of work observed including welding, combustion engine maintenance, cleaning the electrical room, lubrication, and preventive maintenance. The identification results show that the risk level varies from low to high, with the highest risk in work at height. Recommended control measures include the use of PPE, occupational safety training, implementation of lockout-tagout procedures, and installation of fall protection systems. The implementation of these controls is important to minimise work accidents and improve safety in the dock environment.

Key words : *HIRADC, hazard identificaion, occupational risk assessment, occupational safety.*

PENDAHULUAN

Sumber Daya Manusia (SDM) memiliki peranan pentin dalam menjamin kesuksesan suatu organisasi atau industri. Oleh karena itu, para pekerja wajib memperoleh perhatian lebih dari industri khususnya dalam hal keselamatan saat bekerja. Kemnaker memberikan keterangan bahwa disetiap tahunnya selalu terjadi peningkatan kasus kecelakaan kerja yang terjadi di Indonesia. Berdasarkan data dari kemnaker (BPJS Ketenagakerjaan) pada tahun 2024 kemnaker melaporkan terjadinya 162.327 insiden kecelakaan kerja. Sekitar 91,83% di antaranya adalah insiden yang melibatkan peserta yang menerima upah, sementara 7,26% adalah insiden di kalangan peserta yang tidak menerima upah, dan 0,91% mencakup

insiden yang melibatkan peserta layanan konstruksi. Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan kasus tersebut terus terjadi, diantaranya kurangnya penerapan Kesehehatan dan Keselamatan Kerja (K3), minimnya kesadaran akan keselamatan kepada setiap individu pada saat berada di tempat bekerja, dan beberapa faktor lainnya.

Istilah Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) tentunya tidak asing dalam dunia pekerjaan. K3 merupakan segala kegiatan yang dilakukan untuk menjamin kesehatan dan keselamatan pekerja melalui usaha pencegaha dari lecelakaan kerja sampai bahaya penyakit akibat kerja [2]. Penerapan K3 bertujuan untuk menghindari terjadinya kecelakaan di tempat kerja, penyakit yang disebabkan oleh pekerjaan, serta melindungi aspek-aspek produksi agar efisensi dan produktivitas dapat terus meningkat [3]. Bahkan dalam Undang-Undang Nomor 13 Tahun 2003 sudah mengatur bahwa K3 merupakan salah satu bentuk perlindungan bagi para pekerja. Oleh sebab itu penerapan K3 di dunia kerja perlu dilakukan.

Dalam penerapan K3 terdapat sistem yang mengatur hal tersebut yang dinamakan Sistem Manajemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja (SMK3). Sistem Manajemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja (SMK3) merupakan bagian dari sistem manajemen yang komprehensif, yang mencakup struktur organisasi perencanaan, tanggung jawab, evluasi, implementasi, serta kebijakan yang mengatur tentang K3 untuk mengendalikan dampak yang berkaitan dengan pekerjaan dalam rangka menciptakan lingkungan kerja yang aman dan nyaman [4]. Berdaarkan OHSAS 18001:2007, SMK3 merupakan bagian dari sistem manajemen organisasi yang digunakan untuk merancang dan mengimplementasikan kebijakan K3 serta menglola risiko yang dihadapi oleh organisasi tersebut [5]. Setiap industri pasti mngelola keamanan serta perlindungan pada area kerja beserta keselamatan para pekerjanya. Oleh karena itu, semua industri wajib menjalankan peraturan yang berlaku dan sistem yang sudah dijalankan.

PT. Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten merupakan perusahaan yang bergerak di bidang jasa kepelabuhanan dan logistik. Perusahaan ini adalah cabang dari kantor pusat PT Pelabuhan Tanjung Priok yang membawahi wilayah Banten dan sekitarnya dalam kegiatan operasionalnya. Layanannya mencakup penyediaan serta pengelolaan perairan dan kolam pelabuhan untuk lalu lintas pelayaran dan tempat berlabuhnya kapal, pelayanan pemanduan dan penundaan kapal saat keluar masuk pelabuhan, serta penyediaan fasilitas sandar kapal dan kegiatan bongkar muat komoditas curah kering, baik pangan maupun nonpangan, sesuai dengan jenisnya. Proses pembongkaran barang tersebut tentunya memerlukan bantuan alat pengangkut yang mampu memindahkan muatan dari kapal menuju ke truk pengangkut atau sebaliknya. Alat tersebut bernama *Gantry Luffing Crane* (GLC), alat tersebut merupakan suatu alat berat yang berbentuk seperti crane kapal yang di gunakan untuk memindahkan benda seperti box kontainer atau bahan curah dari kapal. PT. Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten ini merupakan pelabuhan non peti kemas yang artinya pada perusahaan tersebut hanya menyediakan jasa bongkar muat barang curah seperti gandum, garam. Selain itu, ada juga barang-barang konstruksi dan hasil pertambangan seperti batu bara.

Demi menunjang kelancara dari kinerja alat tersebut, tentunya tidak terlepas dari perawatan mesin beserta komponen-komponen pada alat tersebut. Orang yang bertugas melakukan hal tersebut tentunya para karyawan yang sudah ditempatkan pada bagian tersebut yaitu bagian *maintenance.* Bagian *maintenance* merupakan bagian yang bertugas menjaga dan merawat kondisi alat/mesin pabrik, memperbaiki atau melakukan penyesuaian mesin agar memperoleh proses produksi yang direncanakan [6]. Maitenance pada mesin GLC yang ada di PT. Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten merupakan kegiatan yang dilakukan di dermaga. Kegiatan tersebut dilakukan setiap hari oleh para karyawan dengan di bantu alat-alat pendukung dalam pekerjaan tersebut. Semua jenis pekerjaan pastinya memiliki risiko bahaya dengan tingkatan masing-masing termasuk pekerjaan pada bagian *maintenance*. Kecelakaan di tempat kerja atau penyakit yang disebabkan oleh pekerjaan bisa terjadi disebabkan oleh kurangnya pemahaman tentang sumber-sumber risiko, pada akhirnya hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya kondisi dan tindakan tidak aman sehingga proses pekerjaan berjalan tidak sesuai dengan yang diinginkan [7].

Dari permasalahan di atas, penelitian bertujuan untuk mengenali ancaman bahaya, mengevaluasi risiko, dan mengatur risiko yang terkait dengan bahaya di PT Pelabuhan Tanjung Priok Cabang Banten dengan menggunakan metode HIRADC. Dari penelitian tersebut diharapkan kecelakaan kerja dapat diminimalisir dan dapat meberikan informasi serta evaluasi untuk kedepannya.

METODE PENELITIAN

Metode Penelitian ini menerpkan pendekatan kualitatif dengan jenis penelitian Deskriptif. Penelitian kualitatif jenis penelitian yang dilakanakan dalam situasi alami, berinteraksi

langsung dengan sumber data, di mana peneliti berperan sebagai instrumen kecil yang menyajikan informasi dalam bentuk kata-kata atau gambar, bukan dalam bentuk angka [8]. Data dalam penelitian ini diambil dari observasi langsung selama proses pelaksanaan penelitian yaitu satu bulan. Kemudian, data tersebut dianalisa dengan menerapkan Metode HIRADC *(Hazard Identification, Risk Assesment, and Determine Control).*

1. Identifikasi Potensi Bahaya (*Hazard Identification*)

Identifikasi bahaya adalah Langkah pertama dalam pengelolaan risiko. Proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan bahaya yang dapat muncul dalam setiap aktivitas pekerjaan [9]. Pada proses ini, data yang diperoleh dari observasi pada saat di dermaga tepatnya pada mesin GLC merupakan sumber utama untuk dilakukan proses identifikasi bahaya, yang diterapkan untuk menghindari dan mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan kerja bagi karyawan di bagian pemeliharaan, yang dimana di setiap harinya mereka melakukan perawatan pada mesin GLC yng terletak di dermaga.

2. Penilaian Risiko *(Risk Assesment)*

Penilaian risiko merupakan proses yang dijalankan untuk menentukan pengutamaan dalam pengelolaan evaluasi risiko dan mengurutkan prioritas pengendalian berdasarkan seberapa besar risiko kecelakaan atau penyakit yang diakibatkan oleh pekerjaan [10]. Risiko merupakan kemungkinan terjadinya suatu peristiwa yang dapat memengaruhi suatu entitas. Penilaian risiko dilakukan dengan mempertimbangkan kemungkinan terjadinya kejadian dan tingkat dampak yang ditimbulkan dari kejadian tersebut. Metode kualitatif untuk bagian penilaian risiko disini mengacu kepada standar AS/NZS 4360-2004.

$$\boldsymbol{NR = Likelihood\ (L) \times Severity\ (S)}.(1)$$

Keterangan:
NR = Nilai Risiko
L = *Likelihood*
S = *Severity*

Tabel 1 Ukuran Kualitatif *Likelihood* pada Standar AS/NZS 4360-2004

Tingkat	Deskripsi	Keterangan
A	*Almost Certain*	Dapat terjadi setiap saat
B	*Likely*	Sering terjadi
C	*Possible*	Dapat terjadi sekali-sekali
D	*Unlikely*	Jarang terjadi

Tabel 2 Ukuran Kualitatif Keparahan (*Severity*) berdasarkan Standar AS/NZS 4360-2004

Tingkat	Deskripsi	Keterangan
1	*Insignificant*	Tidak menimbulkan cedera dan hanya menyebabkan kerugian finansial yang sangat kecil.
2	*Minor*	Mengakibatkan cedera ringan dengan kerugian finansial pada tingkat sedang.
3	*Moderate*	Menyebabkan cedera sedang yang memerlukan penanganan medis serta menimbulkan kerugian finansial yang cukup besar.
4	*Major*	Mengakibatkan cedera berat pada satu orang atau lebih, disertai kerugian besar dan terganggunya proses produksi.
5	*Catastropic*	Menyebabkan korban jiwa (minimal satu orang), kerugian yang sangat besar dengan dampak luas, serta menghentikan seluruh kegiatan operasional.

Tabel 3 Skala Pengukuran Kemungkinan (*Likelihood*)

Level	Tingkat Kemungkinan	Definisi
1	Sangat Jarang	Kecelakaan terjadi sekitar sekali dalam lima tahun.
2	Jarang	Kecelakaan terjadi dalam rentang waktu 2–5 tahun.
3	Mungkin Terjadi	Kecelakaan terjadi dalam rentang waktu 1–2 tahun.
4	Sering	Kecelakaan terjadi dalam rentang waktu 2–10 bulan.
5	Hampir Pasti	Kecelakaan terjadi sekitar satu kali setiap bulan.

Tabel 4 Ukuran Kualitatif *Likelihood* pada Standar AS/NZS 4360-2004

Level	Tingkat Keparahan	Deskripsi
1	Tidak Signifikan	Tidak menimbulkan dampak atau dampaknya sangat kecil terhadap manusia, proses produksi, maupun properti,

Level	Tingkat Keparahan	Deskripsi
		serta hanya memerlukan perawatan fisik singkat (±15 menit).
2	Kecil	Menyebabkan cedera ringan yang dapat ditangani oleh tim P3K dan/atau mengakibatkan kehilangan waktu kerja maksimal satu hari.
3	Sedang	Menimbulkan cedera tingkat sedang yang memerlukan penanganan medis serta menyebabkan kehilangan waktu kerja sedikitnya dua hari.
4	Besar	Mengakibatkan cedera berat yang membutuhkan perawatan di rumah sakit dan/atau menyebabkan kehilangan waktu kerja lebih dari dua hari.
5	Bencana	Dampak yang ditimbulkan menyebabkan kecacatan permanen, baik sebagian maupun total, atau bahkan kematian.

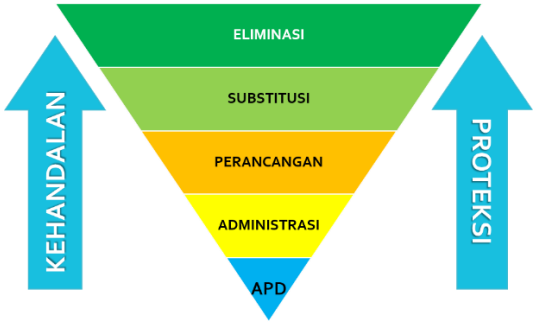
Tabel 5 Skala Risk Rating pada Standar AS/NZS 4360-2004

Kemungkinan	Keparahan (Severity)				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Keterangan:
Low : 1-4 Hijau
Sedang : 5-10 Kuning
Tinggi : 12-25 Merah

3. Pengendalian Risiko *(Determine Control*

Kemudian dilajutkan proses pengedalian risiko dengan meperhatikan hasil penilaian risiko yang sudah didapatkan. Pengendalian tersebut dilakukan dengan memperhatikan hierarki dari pengendalian risiko yang dimulai dari yang tertinggi hingga yang terendah dengan tujuan untuk mengurangi risiko seefektif mungkin dengan cara yang permanen dan andal [11]. Terdapat lima tahapa dalam pengendalian risiko sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 8 Hirarki Pengendalian Risiko

Pengendalian risiko terbagi menjadi beberapa bagian yaitu eliminasi, subtitusi, perancangan/rekayasa teknis, administrasi, dan APD. Eliminasi merupakan teknik pengendalian risiko dengan cara menghilangkan atau mengurangi pekerjaan, alat proses, mesin, dan subtansi yang dapat menimbulkan bahaya untuk melindungi para pekerja. Subtansi merupakan pengendalian yang dilakukan dengan cara melakukan pekerjaan yang sama namun dengan mengurangi risiko bahaya yang ada. Perancangan/rekayasa teknis merupakan pengendalian yang dilakukan dengan cara memberikan tambahan peralatan dan pebaikan alat yang dapat menunjang keselamatan pekerja. Administrasi merupakan pengendalian risiko yang dilakukan dengan cara membat peraturan, peringatan, rambu-rambu, prosedur instruksi kerja, dsb. Terakhir yaitu pengendalian denga cara memberikan APD, pengendalian ini dilakukan dengan cara memberikan atau menginstruksikan kepada semua pekerja untuk menggunakan APD yang sesuai dengan jenis pekerjaannya agar dapat melindungi diri dari risiko pekerjaannya [12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukannya penilaian risiko bahaya dengan menggunakan metode HIRADC pada kegiatan *maintenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok cabang Banten. Terdapat 5 jenis pekerjaan yang menjadi fokus pada penelitian ini dan kelima pekerjaan tersebut merupakan bagian dari *maintenance* mesin GLC diantaranya pengelasan grabs, perawatan mesin bakar, pembersihan ruang kelistrikan, pelumasan, dan *preventif maintenance*.

Identifikasi Potensi Bahaya

Proses ini dilakukan dengan cara melakukan observasi selama penelitian untuk mengidentifikasi aspek pekerjaan yang berpotensi menimbulkan bahaya dan kecelakaan kerja dalam kegiatan *maintenance* dapat berasal dari lingkungan

kerja, peralatan yang digunakan, serta bahan yang terkait dengan pekerjaan tersebut. Berikut ini tabel data mengenai identifikasi potensi bahaya.

Table 6 Data Identifikasi Bahaya Pekerjaan *Minetenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok

Lokasi	**Pekerjaan /Kegiatan/ Aktivitas/ Fasilitas**	**Bahaya & Risiko**	
		Bahaya	**Risiko**
Dermaga B (Mesin GLC)	Pengelasan Komponen Mesin GLC (Grabs)	Percikan api	Cedera fisik
		Asap Pengelasan	Iritasi Mata
	perawatan pada ruang mesin bakar	Terjepit atau terhimpit	Cidera fisik
		Kebocoran fluida bertekanan	Luka pada kulit
	Pembersihan ruang kelistrikan	Tegangan tinggi	Kematian
	Pemberian pelumasan pada komponen (*wire roo)*	Terjepit atau terhimpit	Cidera fisik
		bekerja di ketinggian	Terjatuh, patah tulang, dan kematian
	Preventif Minetenance 2 (PM2)	Kebocoran fluida	Cidera fisik akibat terjatuh karena licin

Selama pelaksanaan penelitian, terdapat lima pekerjaan *maintenance* pada masin GLC di dermaga B. Semua pekerjaan yang dilakukan pastinya memiliki bahaya dan risiko masing-masing. Seperti pada pekerjaan pengelasan komponen mesin GLC (Grabs), terdapat bahaya berupa percikan api dan asap pengelasan yang dapat menimbulkan risiko cedera fisik dan iritasi mata. Kemudian, saat melakukan perawatan pada ruang mesin bakar, pekerja berisiko terjepit atau terhimpit serta mengalami luka pada kulit akibat kebocoran fluida bertekanan. Pekerjaan pembersihan ruang kelistrikan juga tidak kalah berbahaya karena melibatkan tegangan tinggi yang bisa menyebabkan risiko kematian.

Pada kegiatan pemberian pelumasan pada komponen seperti *wire roop*, terdapat bahaya terjepit atau terhimpit serta risiko terjatuh saat bekerja di ketinggian yang dapat menyebabkan patah tulang atau bahkan kematian. Sedangkan dalam pekerjaan *preventif maintenance* 2 (PM2), bahaya kebocoran fluida dapat menimbulkan risiko cedera fisik akibat terjatuh karena permukaan yang licin. Oleh karena itu, sangat penting untuk memperhatikan prosedur keselamatan kerja dan menggunakan alat pelindung diri (APD) yang sesuai pada setiap jenis pekerjaan tersebut.

Hasil Penilaian Risiko

Pada langkah selanjutnya dilakukan *Risk Assessment* terhadap setiap potensi bahaya yang dapat ditimbulkan dari pekerjaan *minetenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok. Hasil penilaian tersebut didapatkan dari proses wawancara dengan bagian K3 di perusahaan tersebut. Data yang diperoleh terdapat pada tabel berikut.

Table 7 Data Penilaian Risiko Pekerjaan *Minetenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok

No	**Bahaya**	**Penilaian Risiko**			
		***Likehood* (L)**	***Severity* (S)**	**Nilai Risiko**	**Level Risiko**
1.	Percikan api	3	2	6	Medium
2.	Asap Pengelasan	2	1	2	Low
3.	Terjepit atau terhimpit	1	3	3	Low
4.	Kebocoran fluida bertekanan	2	2	4	Low
5.	Kebocoran fluida	2	2	4	Low
6.	Tegangan tinggi	2	4	8	Medium
7.	Bekerja di ketinggian	3	4	12	High

Pengendalian Bahaya

Berikut merupakan pengendalian bahaya yang dilakukan mulai dari kategori rendah hingga tinggi. Rekomendasi pengendalian ini diberikan dengan tujuan untuk mengurangi potensi bahaya yang ditimbulkan dari proses pekerjaan baik dari lokasi maupun dari kondisi setiap pekerjanya. Rekomendasi pengendalian bahaya ditampilkan pada tabel berikut.

Table 8. Pengendalian Bahaya Pada Pekerjaan *Minetenance* di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok

Bahaya & Risiko		Level Risiko	Pengendalian
Bahaya	**Risiko**		
Percikan api	Cedera fisik	Medium	*Engineering*: Memasang tirai las (*welding screen)* untuk menahan percikan api. Administrasi: Memberikan pelatihan keselamatan kerja pengelasan. APD: Menggunakan helm las, kacamata pelindung, sarung tangan tahan panas, masker respirator, dan pakaian pelindung.
Asap Pengelasan	Iritasi Mata	Low	*Engineering*: Memasang ventilasi lokal *(exhaust fan)* atau sistem penyedot asap. Administrasi: Membatasi durasi paparan dan melakukan rotasi kerja. APD: Menggunakan helm las dan masker respirator.
Terjepit atau terhimpit	Cidera fisik	Low	*Engineering*: Memasang pelindung mesin *(machine guard)* pada bagian bergerak. Administrasi: Membuat SOP penggunaan mesin dan pelatihan operator. APD: Menggunakan sarung tangan, pakaian pelindung, dan sepatu safety.
Kebocoran fluida bertekanan	Luka pada kulit	Low	*Engineering*: Melakukan perawatan dan inspeksi rutin pada sistem perpipaan. Administrasi: Menyusun SOP penanganan kebocoran fluida. APD: Menggunakan sarung tangan tahan panas, kacamata pelindung, dan pakaian pelindung.
Kebocoran fluida	Cidera fisik akibat terjatuh karena licin	Low	Engineering: Memperbaiki sistem drainase dan memastikan lantai tidak licin. Administrasi: Membersihkan tumpahan segera dan memasang rambu peringatan. APD: Menggunakan sepatu safety anti slip.
Tegangan tinggi	Kematian	High	Engineering: Memasang sistem grounding dan pelindung panel listrik. Administrasi:

Bahaya & Risiko		Level Risiko	Pengendalian
Bahaya	**Risiko**		
			Menerapkan prosedur LOTO (*Lock Out Tag Out*) dan inspeksi rutin. APD: Menggunakan sarung tangan isolasi, sepatu safety isolator, dan pakaian tahan listrik.
Bekerja di ketinggian	Terjatuh, patah tulang, dan kematian	High	Engineering: Memasang guardrail, jaring pengaman, dan lifeline serta menyediakan platform kerja yang stabil. Administrasi: Menerapkan buddy system dan pelatihan kerja di ketinggian serta simulasi penyelamatan. APD: Menggunakan full body harness, helm safety dengan chinstrap, sepatu anti slip, dan sarung tangan.

Berdasarkan Tabel 7 dan 8 identifikasi bahaya dan penilaian risiko pada pekerjaan di Dermaga B menunjukkan adanya variasi tingkat risiko dari rendah hingga tinggi pada beberapa jenis pekerjaan.

Pada pekerjaan pengelasan, potensi bahaya berupa percikan api dan asap pengelasan memiliki tingkat risiko sedang dan rendah. Percikan api dikategorikan sedang karena cukup sering terjadi dan dapat menyebabkan cedera fisik, sedangkan asap pengelasan tergolong rendah karena dampaknya relatif ringan seperti iritasi mata. Pengendalian yang diterapkan sudah mencakup rekayasa teknik (tirai las dan ventilasi), administrasi (pelatihan dan pembatasan paparan), serta APD, sehingga secara umum cukup efektif, namun tetap memerlukan konsistensi penerapan di lapangan.

Pada pengoperasian mesin, bahaya terjepit atau terhimpit memiliki tingkat risiko rendah karena kemungkinan kejadian jarang, meskipun dampaknya dapat menyebabkan cedera fisik. Pengendalian yang dilakukan melalui pemasangan pelindung mesin, SOP kerja, serta penggunaan APD sudah sesuai dengan hirarki pengendalian. Efektivitasnya cukup baik, tetapi sangat bergantung pada kepatuhan operator dalam mengikuti prosedur kerja yang telah ditetapkan.

Pada pekerjaan penanganan fluida, risiko berasal dari kebocoran fluida bertekanan dan lantai licin yang sama-sama berada pada kategori rendah. Hal ini disebabkan oleh tingkat kemungkinan dan dampak yang relatif sedang. Pengendalian melalui perawatan sistem perpipaan, perbaikan drainase, serta SOP penanganan tumpahan sudah cukup efektif, ditambah dengan penggunaan APD sebagai perlindungan tambahan, namun tetap memerlukan pengawasan rutin agar kondisi kerja tetap aman.

Pada pekerjaan instalasi listrik, bahaya tegangan tinggi memiliki tingkat risiko tinggi karena dampaknya sangat fatal meskipun kemungkinan kejadiannya tidak terlalu sering. Pengendalian yang diterapkan seperti sistem grounding, pelindung panel, prosedur *Lockout-Tagout* (LOTO), serta penggunaan APD sudah cukup komprehensif. Namun, efektivitasnya sangat ditentukan oleh kedisiplinan pekerja dalam menerapkan prosedur keselamatan secara konsisten.

Pekerjaan di ketinggian memiliki tingkat risiko tinggi karena kombinasi antara kemungkinan kejadian yang cukup sering dan dampak yang sangat fatal seperti jatuh dari ketinggian. Pengendalian yang dilakukan sudah lengkap meliputi rekayasa teknik (*guardrail* dan *lifeline*), administrasi (*buddy system* dan pelatihan), serta penggunaan APD (*full body harness*). Meskipun demikian, efektivitas pengendalian sangat bergantung pada pengawasan dan kepatuhan pekerja dalam menjalankan prosedur keselamatan.

KESIMPULAN

Berdasarkan temuan dari pengidentifikasian serta evaluasi risiko dengan menerapkan metode HIRADC (*Hazard Identification, Risk Assessment, and Determining Control*) terhadap lima jenis pekerjaan *maintenance* mesin GLC di Dermaga B PT. Pelabuhan Tanjung Priok cabang Banten, ditemukan berbagai potensi bahaya yang memiliki tingkat risiko berbeda-beda, mulai dari kategori rendah (*low*), sedang (*medium*), hingga tinggi (*high*).

Sebagian besar potensi bahaya yang ada terklasifikasi dalam kelompok risiko rendah, seperti iritasi mata akibat asap pengelasan, cedeta fisik akibat terjepit atau terhimpit, serta cedera karena kebocoran fluida. Meskipun termasuk kategori rendah, bahaya ini tetap memerlukan pengendalian melalui penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) serta kepatuhan terhadap Standar Operasional Prosedur (SOP) yang aman.

Risiko dengan kategori sedang ditemukan pada bahaya percikan api dan tegangan tinggi, yang dapat menimbulkan cedera serius hingga kematian. Hal ini menegaskan pentingnya pengendalian administratif seperti pelatihan K3 serta pengendalian teknis seperti penerapan sistem *Lockout-Tagout* (LOTO). Bahaya dengan tingkat risiko tinggi berasal dari pekerjaan bekerja di ketinggian, yang dapat menyebabkan kecelakaan fatal seperti patah tulang dan kematian. Untuk itu, diperlukan upaya pengendalian yang komprehensif, meliputi pendekatan engineering, administratif, dan penggunaan APD lengkap seperti *full body harness*, helm safety dengan chinstrap, dan sepatu anti-slip.

Secara keseluruhan, hasil penilaian risiko ini menunjukkan pentingnya penerapan sistem keselamatan kerja yang baik, pengawasan rutin, serta edukasi berkelanjutan kepada seluruh pekerja. Dengan pengendalian risiko yang tepat, diharapkan kecelakaan kerja dapat dicegah dan keselamatan serta kesehatan kerja (K3) di lingkungan dermaga dapat terjaga secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Trisiana, S. A. Y. Dwi, and R. Anik, "Assessment Risiko Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) Menurut Variabel OHSAS Dengan Menggunakan HAZOP (Hazard And Operability Study) dan HIRADC (Hazard Identification Risk Assement end Determining Control (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Ciputra World Ph," *Pengaruh Ter. Psikoedukasi Kel. Terhadap Tingkat Kecemasan Kel. pada Anggota Kel. yang Menderita Katakan di Wil. Kerja Puskesmas Jelbuk Kabupaten Jember*, vol. 3, pp. 28–37, 2019.

[2] B. Ketenagakerjaan, "Jumlah Kasus Kecelakaan Kerja di Indonesia Menurut Provinsi dan Segmen Kepesertaan Bulan Mei Tahun 2023." 2023.

[3] D. S. Urrohmah and D. Riandadari, "Identifikasi Bahaya dengan Metode HIRARC dalam Upaya Memperkecil Risiko Kecelakaan Kerja di PT . PAL Indonesia," *J. Tek. Mesin UNESA*, vol. 08, no. 01, pp. 34–40, 2019.

[4] Dea Artha Melati, Ekowati Retnaningtyas, and Diniyah Kholidah, "Analisis Tingkat Pengetahuan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Mengenai Lockout/Tagout (LOTO) terhadap Tindakan Tidak Aman (Unsafe Action) dalam Lockout/Tagout (LOTO) Pekerja Divisi Manufactur dan Divisi Enggenering pada PT. X Kabupaten Banyuwangi," *Detect. J. Inov. Ris. Ilmu Kesehat.*, vol. 2, no. 3, pp. 99–108, 2024, doi: 10.55606/detector.v2i3.4149.

[5] M. I. Pasaribu, D. A. A. Ritonga, and A. Irwan, "Analisis Perawatan (*Maintenance*) Mesin Screw Press Di Pabrik Kelapa Sawit Dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis (Fmea) Di Pt. Xyz," *Jitekh*, vol. 9, no. 2, pp. 104–110, 2021, doi: 10.35447/jitekh.v9i2.432.

[6] R. M. Zein, M. Jufriyanto, and Y. Pandu, "Manjemen Risiko Pada Proses Produksi Tanki Air: Metode Hazard Identification Risk Assessment Risk Control (HIRARC)," *Gn. Malang, Randu Agung, Kec. Kebomas. Kab. Gresik*, vol. 19, no. 2, p. 61121, 2022.

[7] R. Safrudin, Zulfamanna, M. Kustati, and N. Sepriyanti, "Penelitian Kualitatif," *J. Soc. Sci. Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–15, 2023.

[8] Restu and F. Yuamita, "Analisis Risiko Potensi Kecelakaan Kerja Pada Pekerja Departemen Persiapan Produksi Menggunakan Metode HIRADC (Hazard Identification, Risk Assesment And Determining Control)," *J. Teknol. dan Manaj. Ind. Terap.*, vol. 2, no. 3, pp. 159–167, 2023, doi: 10.55826/tmit.v2i3.63.

[9] S. Santoso, "Penerapan Metode Hiradc Sebagai Upaya Pencegahan Risiko Kecelakaan Kerja Pada Divisi Operasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas Uap," *J. Bisnis Manaj.*, vol. 20, pp. 41–64, 2020.

[10] T. Ihsan, S. A. Hamidi, and F. A. Putri, "Penilaian Risiko dengan Metode HIRADC Pada Pekerjaan Konstruksi Gedung Kebudayaan Sumatera Barat," *J. Civronlit Unbari*, vol. 5, no. 2, p. 67, 2020, doi: 10.33087/civronlit.v5i2.67.

[11] T. Saputro and D. Lombardo, "Metode Hazard Identification, Risk Assessment and Determining Control (HIRADC) Dalam Mengendalikan Risiko Di PT. Zae Elang

Perkasa," *J. Baut Dan Manufaktur*, vol. 03, no. 1, pp. 23–29, 20216.

[12] T. Sukwika, "Analisis Manajemen Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja Menggunakan Metode HIRADC pada Departemen Assembly Listrik," *J. Appl. Manag. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 119–127, 2021.

[13] Y. Atiyah and E. K. Wibowo, "Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Pegawai Saat Pandemi Covid-19 di Rumah Sakit Jantung dan Pembuluh Darah Harapan Kita," *J. Sumber Daya Apar.*, pp. 61–81, 2023.

EVALUATION STUDY ON PERFORMANCE OF HEAT EXCHANGER – 4000 IN CENTRAL PROCESSING AREA PT. PERTAMINA EP ASSET 4 SUKOWATI FIELD

Izal Daffa Rizqullah [1], Dimas Ilham Akbar [1], Amma Muzayyin [1], Wiliandi Saputro [2], Ardika Nurmawati [1], Erwan Adi Saputro[1*]

[1] Chemical Engineering Department, Engineering and Sains Faculty, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, Indonesia 60294

[2] Mechanical Engineering Department, Engineering and Sains Faculty, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, Indonesia 60294

Jl. Rungkut Madya, Gn. Anyar, Kec. Gn. Anyar, Surabaya, Jawa Timur 60294

erwanadi.tk@upnjatim.ac.id [1]

Abstract

PT Pertamina EP Asset 4 is one of Pertamina's subsidiaries operating in the oil and gas industry. In its production process, PT Pertamina EP Asset 4 requires heat exchangers for various purposes. Impurities on the shell and tube walls is unavoidable, which, if left unchecked, will disrupt the efficiency of the heat exchanger. These impurities accumulate over time and hinder the heat exchanger's efficiency due to debris adhering to the shell and tube surfaces. Therefore, this calculation is aimed at determining the heat transfer efficiency during industrial processes. Heat efficiency, which describes the ratio of heat transferred from a high-temperature fluid (water) to a low-temperature fluid (oil) per unit of time, is a crucial metric for evaluating the effectiveness of the heat exchanger. The research findings show that the overall net coefficient (U_c) and overall design average coefficient (U_d) are recorded at 88.2422 Btu/ft^2.hr.°F and 51.7160 Btu/ft^2.hr.°F, respectively. Meanwhile, the fouling factor (R_d) is assessed at 0.0079 ft^2.hr°F/Btu. Based on the significant difference between Uc and Ud as well as the high Rd value, it can be concluded that the heat exchanger unit has experienced considerable fouling, necessitating a special mechanical cleaning to restore its performance.

Key words : *heat efficiency, heat exchanger, shell and tube.*

INTRODUCTION

PT. Pertamina EP Asset 4 is a subsidiary of Pertamina specializing in the upstream sector of the oil and gas industry, encompassing exploration and exploitation activities. It was established on September 13, 2005. Subsequent to the establishment of PT. Pertamina EP, PT Pertamina (Persero) entered into a Cooperation Contract (KKS) with BPMIGAS (now SKKMIGAS) on September 17, 2005. This contract, which retroactively came into effect on September 17, 2003, grants authority over the entire Oil and Gas Mining sector delegated through legislation outlined in Law Number 22 of 2001 concerning Oil and Gas [1]. A heat transfer device is deemed effective in its application when it meets certain criteria, particularly the capability to transfer heat as required by the operational process within a fouling factor or R_d. Typically, the dirt factor of a heat exchanger is assessed over several periods. As this period elapses, the Heat Exchanger may struggle to operate efficiently due to contaminants accumulating on the shell and tube walls. To prevent this, periodic shutdowns and cleaning of the Heat Exchanger are necessary. Rd represents the maximum impact of dirt accumulation on the exterior of the shell and the interior of the tube walls, which, if left uncleansed, diminishes the heat transfer capacity [2]. Heat exchangers operate based on three fundamental modes of heat transfer: conduction, convection, and, in some cases, radiation. In shell and tube heat exchangers, conduction primarily occurs through the tube wall material, while convection dominates the heat exchange between the fluids and the tube surfaces. The performance of a heat exchanger depends largely on the overall heat transfer coefficient (U), which is influenced by the material thermal conductivity, fluid velocity, and the degree of surface cleanliness. The shell and tube type typically consists of a bundle of tubes enclosed within a cylindrical shell, where one fluid flows through the tubes and another fluid passes over the tubes within the shell side. Baffles are commonly installed to enhance turbulence and improve heat transfer efficiency by increasing the fluid mixing on the shell side.

The thermal design of a shell and tube heat exchanger aims to achieve a high rate of heat transfer while maintaining a reasonable pressure drop on both fluid sides. Key parameters influencing

its performance include the tube arrangement (triangular or square pitch), flow configuration (counter-flow, parallel-flow, or cross-flow), and the number of passes through the tubes. Among these, the counter-flow configuration generally offers the best thermal performance, as it maintains a higher mean temperature difference between fluids along the exchanger length. In industrial applications, however, the actual performance often deviates from design expectations due to fouling, corrosion, and partial blockage within the tubes or shell passages.

Fouling, defined as the accumulation of unwanted materials on heat transfer surfaces, can originate from multiple sources such as crystallization of salts, corrosion products, biological growth, or particulate deposition. Each fouling type contributes differently to thermal resistance and pressure loss. In hydrocarbon systems, especially in crude oil processing, the most common fouling issues arise from asphaltene and wax deposition, which can form hard layers on tube walls and significantly lower the overall heat transfer coefficient (U). The relationship between fouling and efficiency degradation is nonlinear, meaning even a small fouling layer can cause a substantial reduction in thermal performance.

Heat exchangers are increasingly being utilized in a variety of sectors to reduce and raise temper-atures in order to fulfill the technical requirements of different goods. Chemical plants, factories, office buildings, hospitals, and power plants are among the industries that employ heat exchangers [3]. In the oil and gas industry, heat exchangers are essential equipment for temperature regulation in processes such as crude oil stabilization, gas dehydration, and produced water treatment. Maintaining high thermal efficiency directly impacts the operational cost and safety of these processes. A decrease in heat transfer efficiency results in increased fuel consumption, production downtime, and potential operational hazards due to temperature deviations. Therefore, a periodic performance evaluation is crucial to ensure the exchanger continues to meet design expectations while minimizing energy losses. In the operational environment of Central Processing Areas (CPA), where crude oil and produced water are continuously processed, maintaining the heat exchanger's reliability is a crucial part of asset integrity management. Thermal inefficiencies not only lead to increased fuel consumption but can also disrupt separation efficiency in downstream units such as three-phase separators and dehydrators. Hence, predictive maintenance and periodic thermal performance assessments have become an integral practice in petroleum operations. The evaluation of fouling tendencies under real operating data, such as temperature and flow rate variations, provides valuable insights into the actual condition of the exchanger and helps determine the optimal cleaning intervals.

Furthermore, modern performance evaluations increasingly integrate computational methods such as process simulation or data-driven monitoring using digital twins. However, such systems must still rely on accurate field measurements to validate models. Thus, analytical evaluations—like those performed in this study—remain a vital step for ensuring operational safety and maintaining heat transfer performance within design specifications.

According to [4], the efficacy of the shell and tube of the Heat Exchanger with the COG Booster system was 37.4%. According to [5], the effectiveness value obtained on shell and tube of Heat Exchangers utilizing four baffles is 43%. The efficacy value found in the study by [6] on the Heat Exchanger with the Kern technique was 76.0613%. The Heat Exchanger then received a 47.77% efficacy rating in research conducted by [7]. In research done by [8], the efficacy of a shell and tube heat exchanger with baffles 15 cm apart was 82.13%. Whereas according to studies done by [9], the efficacy value for the shell and tube Heat Exchanger type BEM is 70%. The previous studies demonstrate a wide variation in efficiency among different shell and tube configurations, depending on baffle spacing, flow arrangement, and fouling accumulation. However, limited research has specifically addressed the performance of field-operated heat exchangers under real production conditions, particularly in upstream oil facilities. This research fills that gap by providing an in-depth evaluation of the HE-4000 unit operating in the Central Processing Area (CPA) of PT Pertamina EP Asset 4 Sukowati Field. The findings are expected to serve as a reference for optimizing maintenance intervals and improving operational reliability. Given the high operating temperature and the multiphase nature of crude oil streams, the HE-4000 heat exchanger is particularly vulnerable to fouling and scaling over extended operation periods. Factors such as variable crude composition, water cut, and intermittent shutdowns can accelerate fouling formation, resulting in a reduced effective heat transfer area. Therefore, continuous monitoring of temperature differentials between the shell and tube sides is essential for early detection of performance deterioration. Evaluating the actual fouling factor (R_d) relative to its design value enables engineers to determine whether the exchanger still operates within acceptable limits or requires immediate cleaning actions.

There is just one heat exchanger at CPA (Central Processing Area) PT. Pertamina EP Asset 4 Sukowati Field. The HE-4000 (Heat Exchanger

4000) receives crude oil and water from the well and functions as a heater to warm up the crude oil before it undergoes the FSO (Floating, Storage, and Offloading) process, preventing the product from gelling when transported from CPA to FSO. The type of heat exchanger used is Shell and Tube. The benefits of shell and tube Heat Exchanger are that the pressure drop can be varied according to the capacity of the heat exchanger, and maintenance is relatively easier because it can be dismantled and assembled [10].

The purpose of the study was to evaluate the performance of the Heat Exchanger (E-4000 in Pertamina EP Asset 4 Sukowati Field).

MATERIAL AND METHODS

Metode Data collection is needed to evaluate the heat exchanger (E – 4000). The evaluation process involves both field data collection and analytical calculations. The performance of a heat exchanger can be assessed by comparing its actual thermal behavior to the design parameters. In this study, the analysis focuses on quantifying the extent of fouling accumulation through thermal resistance calculations. Therefore, the measured parameters include inlet and outlet temperatures of both fluids, flow rates, and the corresponding operating pressure on each side. These data were obtained directly from the CPA control system logs and daily operation records to ensure that they represent normal operating conditions. The data utilized is the heat exchanger (E – 4000) work data from August 17, 2021 to August 23, 2021. This information will subsequently be used to determine the Dirt Factor (R_d). Following the collection of these data, it is possible to determine whether or not the heat exchanger needs to be cleaned. All processes are represented using flow charts, which is meant to clarify the processes to be performed, to decision making from problem formulation. The flowchart illustrates the overall sequence of the analytical evaluation, starting from data acquisition, preprocessing, calculation of thermal parameters, and interpretation of results. The steps were carried out systematically using spreadsheet-based computation for efficiency and transparency.

The HE-4000 unit is a horizontal shell and tube heat exchanger installed at the Central Processing Area (CPA) of the Sukowati Field. The unit operates under continuous oil-water processing with water as the cooling medium in the tube side and crude oil as the hot fluid in the shell side. It is designed to prevent crude oil solidification during transfer to the Floating Storage and Offloading (FSO) facility. The heat exchanger is equipped with a removable tube bundle, enabling periodic mechanical cleaning when fouling exceeds design limits.

This design configuration makes it representative of typical field units used in upstream oil production, where both reliability and maintainability are key performance indicators.

Table 1 Tube and shell temperature

Date	TUBE (WATER)		SHELL (OIL)	
	IN (°F)	OUT (°F)	IN (°F)	OUT (°F)
17/08/2021	219	216	117	150
18/08/2021	221	218	116	150
19/08/2021	223	219	116	149
20/08/2021	222	219	119	150
21/08/2021	223	220	117	148
22/08/2021	222	218	117	151
23/08/2021	222	219	118	150

Table 2. Tube and shell flow rate

Date	TUBE (WATER) FLOW RATE (BWPD)	SHELL (OIL) FLOW RATE (BOPD)
17/08/2021	35400	4306
18/08/2021	35400	4172
19/08/2021	35900	4124
20/08/2021	35200	4204
21/08/2021	36300	4135
22/08/2021	36500	4110
23/08/2021	36500	4175

The monitoring period was selected to represent a stable production window without any planned shutdowns, ensuring that the operating data reflected steady-state behavior. The data were then validated through cross-checking with historical averages to minimize anomalies caused by sensor drift or operational disturbances. The reliability of these data is essential because even a minor deviation in temperature readings can significantly affect the calculated heat transfer coefficient and fouling factor.

During the observation period, environmental conditions such as ambient temperature and cooling water temperature were relatively constant, with variations below ±2°F. Such stability ensures that changes in thermal performance can be primarily attributed to fouling effects rather than external factors.

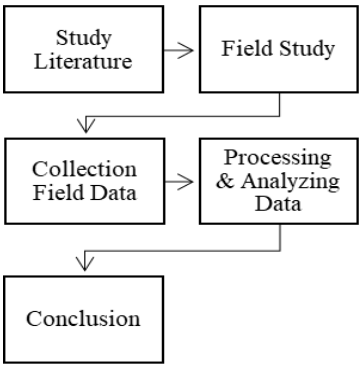


Figure 1. Research block diagram

RESULT AND DISCUSSION

Based on the results of data processing, The evaluation began by comparing the measured operating data with the heat exchanger design specifications. These comparisons provide insight into how closely the field operation aligns with expected thermal behavior. The recorded data include daily variations in temperature and flow rate for both fluids, which directly influence the rate of heat transfer. Before detailed calculations were conducted, the data were plotted to visualize temperature trends and to identify any anomalies that may indicate operational disturbances. The data acquired in the form of real data and heat exchanger design data (E-4000) are presented in the following graph:

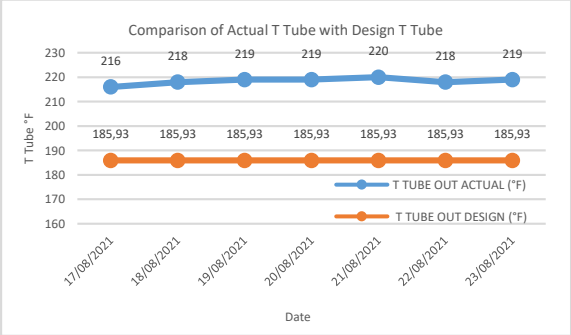


Figure 2 Comparison of actual T tube with design T tube

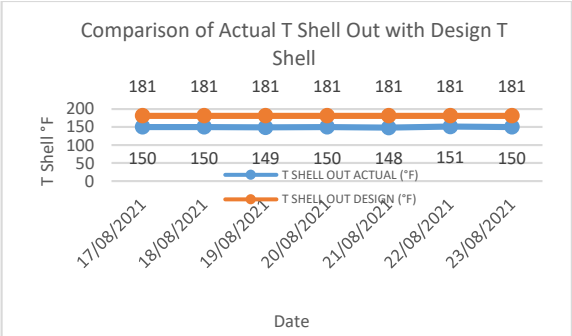


Figure 3 Comparison of actual T shell out with design T shell

As shown in Figure 2, the actual outlet temperature of the tube side (cooling water) exhibits a gradual decrease in comparison to the design value. This deviation suggests a reduced heat absorption capacity by the tube-side fluid, which may result from thermal resistance caused by fouling on the inner tube walls. Conversely, Figure 3 demonstrates that the shell-side outlet temperature (crude oil) remains slightly lower than design expectations, indicating that the intended heat delivery to the shell fluid is not fully achieved. The temperature difference between the shell and tube outlets (ΔT) can therefore serve as an indicator of the exchanger's decreasing performance over time.

The average deviation in tube outlet temperature during the observation period was approximately 2–3°F below design, while the shell-side outlet temperature was 1–2°F below design. These differences, though small numerically, can significantly affect the overall heat transfer rate due to the high flow rate and large surface area involved. In heat exchanger systems, even a few degrees of reduction in temperature differential may correspond to several percent loss in thermal efficiency.

The data collected from the field were then calculated through the following equations, the calculation of Fouling Factor (Rd) from Overall Coefficient (Uc) based on the first equations (Kern,1965)

$$U_C = \frac{h_{io} + h_o}{h_{io} \times h_o} \quad \text{.....(1)}$$

U_c = Clean overall Coefficient, btu/hr.ft^2.°F
h_o = Shell heat transfer coefficient,, btu/hr.ft^2.°F
h_{io} = tube heat transfer coefficient, btu/hr.ft^2.°F

Design Overall Coefficient (Ud) calculated from the equations below

$$U_d = \frac{Q}{A \times \Delta T} \quad \text{.....(2)}$$

U_d = Overall Heat Transfer Coefficient, btu/hr.ft^2.°F
A = Total surface

From the equations (1) & (2) then the fouling factor (R_d) could be determined as follow:

$$R_d = \frac{U_c - U_d}{U_c \times U_d} \quad \text{.....(3)}$$

The calculation results show that the clean overall heat transfer coefficient (U_c) is considerably higher than the design overall coefficient (U_d). This indicates that the exchanger's effective heat transfer area has been reduced by fouling layers. The fouling factor (R_d)acts as an additional thermal resistance in series with the metal wall and film resistances on both sides. As the thickness of the fouling layer increases, the overall heat transfer coefficient decreases exponentially.

In this study, the fouling factor reached an average value of 0.0079 ft²·hr·°F/Btu, which is significantly higher than the typical design range for shell-and-tube exchangers handling clean fluids (generally 0.001–0.002 ft²·hr·°F/Btu). Such high resistance values suggest substantial accumulation of deposits on the tube walls. The difference between Uc and Ud values also indicates a notable decline in heat transfer efficiency, approximately 40% below design performance.

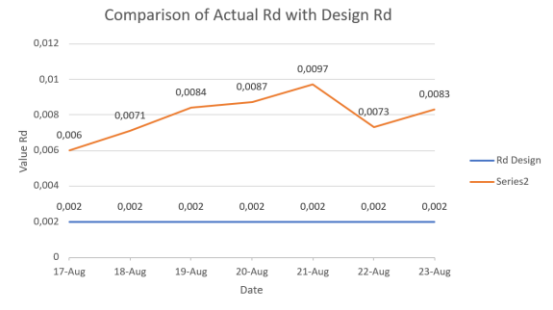


Figure 4. Comparison of actual R_d with design R_d

The temperature for the tube and shell output does not match the design temperature, as shown in figure 1 and 2 from August 17, 2021 to August 23, 2021. The discrepancy in temperatures is due to the heat exchanger's high fouling factor. Figure 3 shows that the actual fouling factor (R_d) is higher than the design fouling factor (R_d). This indicates that the heat exchanger's inner and outer tube walls have crust, resulting in less efficient heat transmission from the heat exchanger. As a result, cleaning the heat exchanger is required to lower the value of Rd and increase the efficiency of heat exchange once more.

Overall, the results indicate that the HE-4000 unit operates below its optimal efficiency due to fouling accumulation. The thermal resistance value obtained suggests that the exchanger should be scheduled for mechanical cleaning within the next maintenance window. Implementing a predictive maintenance system based on continuous temperature and flow monitoring could prevent severe efficiency degradation. Furthermore, adjusting the cooling water flow rate or applying antifouling treatments may help delay the formation of deposits. These recommendations are expected to enhance the exchanger's operational lifespan and energy efficiency.

In addition to maintenance optimization, future improvement efforts could also involve material selection and design modification. Using corrosion-resistant or low-fouling tube materials such as stainless steel or titanium can reduce the rate of deposit buildup and extend cleaning intervals. Incorporating surface enhancement techniques, such as coating or micro-grooved surfaces, may further improve heat transfer by promoting turbulence and minimizing fouling adhesion. Moreover, regular chemical cleaning using environmentally friendly descaling agents could be integrated into the maintenance schedule to complement mechanical cleaning methods.

From an operational standpoint, data-driven monitoring systems offer a promising approach to manage heat exchanger performance. By combining historical data with real-time analytics, operators can predict fouling trends and determine the most cost-effective maintenance intervals. This integration of conventional engineering analysis with digital monitoring technologies supports the broader goal of achieving energy efficiency and sustainability in petroleum processing facilities.

REFERENCES

By calculation, the heat exchanger E-4000 has a lower heat transfer than the design due to the inhibiting factors such as crust on the inner and outer tube walls. The computed Rd value between Agustus 17, 2021 and Agustus 23, 2021 is higher than the design Rd value, indicating that the heat exchanger requires cleaning. The E-4000 heat exchanger is still usable in August 2021, but it will need to be cleaned to reduce the actual fouling factor and increase the heat transfer efficiency. In addition, the higher fouling factor shows that deposits on the tube surface significantly decrease the overall heat transfer coefficient (U). This condition leads to reduced energy efficiency and limits the exchanger's ability to achieve the desired outlet temperature for both shell and tube fluids. Regular maintenance and cleaning schedules are therefore needed to maintain performance close to design values. It is also recommended that performance monitoring be carried out periodically to detect early fouling

buildup, allowing corrective actions before severe efficiency loss occurs. The implementation of preventive measures—such as optimizing fluid velocity, maintaining stable operating conditions, and using appropriate antifouling chemicals—can further minimize fouling formation. By applying these strategies, the E-4000 unit is expected to operate more efficiently, extend its service life, and ensure reliable heat transfer performance in the long term.

REFERENCES

[1] A. Barun And E. Rukmana, "Analisis Performansi Pada Heat Exchanger Jenis Shell And Tube Tipe Bem Dengan Menggunakan Perubahan Laju Aliran Massa Fluida Panas (Mh)," Jurnal Teknik Mesin, Vol. 1, No. 2, Pp. 1–7, 2015.

[2] A. Budiman And A. Syarief, "Analisis Perpindahan Panas Dan Efisiensi Efektif High Pressure Heater (Hph) Di Pltu Asam-Asam," Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Unlam, Vol. 3, No. 2, Pp. 76–82, 2014.

[3] A. M. Flynn, T. Akashige, And L. Theodore, Kern's Process Heat Transfer. Wiley, 2019. Doi: 10.1002/9781119364825.

[4] C. Wicaksono, E. Wijanarko, O. H. Simanullang, And A. Tahad, "Perancangan Eco Heat Exchanger Type 1-2 Shell And Tube Dan Pengaruh Jumlah Baffle Terhadap Transfer Panas," Jurnal Chemurgy, Vol. 1, No. 1, P. 27, Apr. 2018, Doi: 10.30872/Cmg.V1i1.1136.

[5] G. Marawijaya, L. Trisnaliani, And C. Purna, "Protoype Heat Exchanger Type Shell And Tube Ditinjau Dari Variasi Jarak Baffle Dan Laju Alir Massa Udara Panas Protoype Heat Exchanger Type Shell And Tube In Terms Of Variation Of Baffle Distance And Hot Air Flow Rate," Jurnal Kinetika, Vol. 10, No. 01, Pp. 18–23, 2019.

[6] I. Putra, "Studi Perhitungan Heat Exchanger Type Shell And Tube Dehumidifier Biogas Limbah Sawit Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Biogas," Jurnal Polimesin, Vol. 15, No. 2, P. 42, Sep. 2017, Doi: 10.30811/Jpl.V15i2.373.

[7] J. Sudrajat, "Analisis Kinerja Heat Exchanger Shell &Amp; Tube Pada Sistem Cog Booster Di Integrated Steel Mill Krakatau," Jurnal Teknik Mesin, Vol. 6, No. 3, P. 174, Nov. 2017, Doi: 10.22441/Jtm.V6i3.1967.

[8] M. R. Zain And A. Mustain, "Evaluasi Efisiensi Heat Exchanger (He - 4000) Dengan Metode Kern," Distilat: Jurnal Teknologi Separasi, Vol. 6, No. 2, Pp. 415–421, May 2023, Doi: 10.33795/Distilat.V6i2.133.

[9] Pertamina Ep, "Company Profile Pertamina Ep Asset 4," 2018.

[10] S. Siagian, "Analisa Efektivitas Alat Penukar Kalor Jenis Shell And Tube Hasil Perencanaan Mahasiswa Skala Laboratorium," Bina Teknika, Vol. 12, No. 2, P. 211, 2017, Doi: 10.54378/Bt.V12i2.75.

PERANCANGAN DAN ANALISIS *LOADER* INPUT MESIN TEMPERING PADA *LINE PRODUKSI HOT COIL SPRING* PT. XYZ

Aditya Nugraha [1], Agustinus Wisnu Setiawan [1], Yudha Samudra [1]

[1] Program Studi Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik ATMI Surakarta

Jl. Mojo No. 01, Karangasem, Laweyan, Kota Surakarta, Jawa Tengah 57145

aditya.nugraha@atmi.ac.id [1]

Abstrak

Loader merupakan alat pendukung produksi yang berfungsi untuk memindahkan benda kerja dari satu tempat ke tempat lainnya. *Loader* pada *input* mesin *tempering* memiliki prinsip kerja dengan memindahkan benda berupa *hot coil spring* dari *chain conveyor* menuju konveyor yang ada pada mesin *tempering* sebagai proses *input* benda kerja. Permasalahan utama yang terjadi pada *loader* adalah kapasitas angkut yang terbatas yaitu 6 benda kerja dalam satu *cycle* dan terdapat getaran akibat konstruksi *loader* yang mengayun pada saat perpindahan material. Rancangan baru *loader* pada *input* mesin *tempering* diperlukan untuk meningkatkan kapasitas angkut benda kerja minimal sebesar 50% sesuai dengan permintaan pihak industri dan meminimalkan getaran akbibat gerakan mengayun. Proses perancangan *loader input* mesin *tempering* menggunakan metode VDI 2222. Hasil penelitian berupa rancangan baru *loader* yang memiliki dimensi total sebesar 6000 × 1810 × 3845 mm. Hasil perhitungan dan analisis konstruksi menunjukkan bahwa *loader* dapat meningkatan kapasitas angkut benda kerja hingga 66% yaitu 10 pcs *coil spring*, dan cycle time menurun 29%, dari 11 detik menjadi 7,79 detik.

Kata kunci : *hot coil spring, loader*, metode VDI 2222.

Abstract

Loader is a production support tool that functions to move workpieces from one place to another. The loader at the input of the tempering machine has a working principle by moving objects in the form of hot coil springs from the chain conveyor to the conveyor on the tempering machine as a workpiece input process. The main problem that occurs with the loader is the limited transport capacity of 6 workpieces in one cycle and there is vibration due to the loader construction that swings when moving material. A new loader design at the input of the tempering machine is needed to increase the workpiece transport capacity by at least 50% according to industry requests and minimize vibrations due to swinging movements. The design process for the input loader of the tempering machine uses the VDI 2222 method. The results of the study are in the form of a new loader design that has total dimensions of 6000 × 1810 × 3845 mm. The results of the calculations and construction analysis show that the loader can increase the workpiece carrying capacity by up to 66%, namely 10 pcs coil springs, and the cycle time decreases by 29%, from 11 s to 7.79 s.

Key words : *hot coil spring, loader, VDI 2222 method.*

PENDAHULUAN

Industri otomotif merupakan salah satu sektor andalan yang memiliki kontribusi cukup besar terhadap perekonomian nasional Indonesia. Industri otomotif nasional menunjukkan perkembangan yang terbilang atraktif dalam beberapa tahun terakhir [1]. Pertumbuhan sektor otomotif berada di atas pertumbuhan ekonomi nasional dengan pertumbuhan cukup signifikan sejak kuartal kedua 2021 sehingga mampu meneruskan tren pemulihan hingga mencapai 10,26% pada kuartal ketiga 2022.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa optimalisasi sistem material *handling*, khususnya melalui penggunaan mekanisme translasi, mampu meningkatkan efisiensi proses produksi secara signifikan. Mekanisme berbasis translasi seperti *ball screw* terbukti memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi serta mampu mereduksi getaran dibandingkan dengan mekanisme konvensional berbasis engsel [2] [3]. Selain itu, penerapan analisis numerik menggunakan Finite Element Analysis (FEA) pada tahap perancangan memungkinkan evaluasi kekuatan dan distribusi tegangan struktur secara komprehensif sebelum implementasi aktual di lapangan [4]. Dalam konteks metodologi desain, pendekatan sistematis seperti VDI 2222 telah banyak digunakan dalam perancangan sistem mekanik kompleks karena mampu mengakomodasi

proses pengembangan produk secara terstruktur dan terintegrasi [5] [6].

PT. XYZ selaku perusahaan manufaktur me-rupakan salah satu kontributor di industri otomotif yang memproduksi komponen kendaraan berupa *hot coil spring*. *Hot coil spring* memiliki permintaan pasar yang kian meningkat sejalan dengan perkembangan industri otomotif. Semakin besarnya permintaan *output* produksi, alat produksi yang digunakan diharapkan memiliki kemampuan yang memadahi untuk dapat memenuhi tuntutan yang ada. Fasilitas produksi yang memiliki peranan penting dalam proses produksi *hot coil spring* salah satunya adalah *loader* yang berada pada *input* mesin *tempering*.

Loader merupakan alat pendukung produksi yang berfungsi untuk mengangkat dan memindahkan benda kerja [7]. *Loader* pada *input* mesin *tempering* memiliki prinsip kerja dengan memindahkan benda berupa *hot coil spring* dari *chain conveyor* menuju konveyor mesin *tempering* sebagai proses *input* / memasukkan benda kerja. Konstruksi *loader* yang terpasang memiliki sistem pergerakan horizontal berupa engsel, salah satu ujung konstruksi *loader* terikat pada bagian atas rangka. Konstruksi *loader* menggunakan silinder *pneumatic* sebagai komponen pendorong dan dapat bergerak ke arah horizontal dengan cara mengayun, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Permasalahan utama yang terjadi pada *loader* adalah kapasitas angkut yang terbatas yaitu 6 benda kerja dalam satu *cycle*, terdapat getaran akibat konstruksi *loader* yang mengayun pada saat perpindahan material, dan *cycle time* sebesar 11 detik dalam satu kali proses kerja. Posisi konstruksi *loader* yang berada pada *input* mesin *tempering* membuat bagian pencekam benda kerja memiliki suhu yang cukup tinggi, yaitu hingga 100°C akibat radiasi termal.

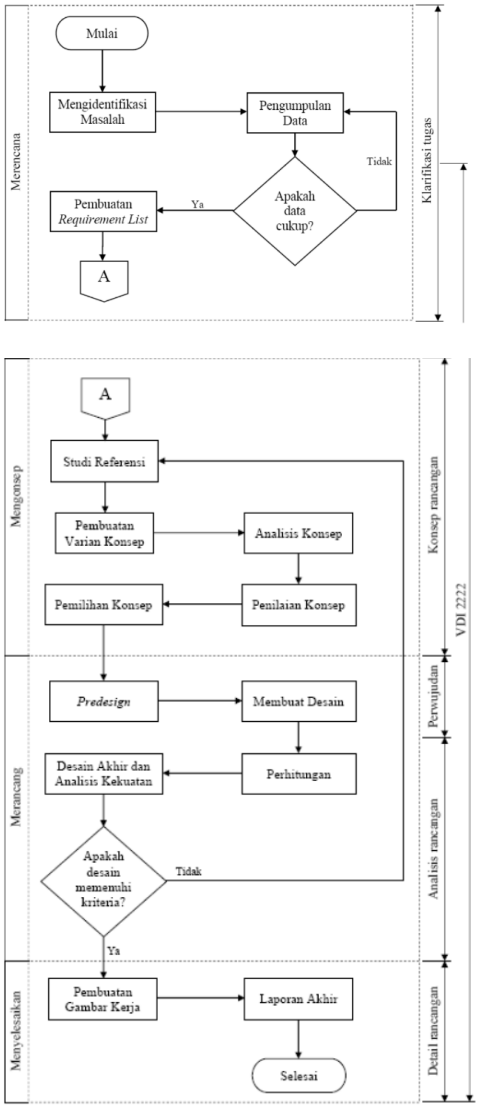


Gambar 1 Konstruksi Lama Loader

Berdasarkan kondisi konstruksi *loader* yang ada, PT. XYZ selaku pihak industri meminta untuk dilakukan perancangan ulang terhadap konstruksi *loader* pada *input* mesin *tempering*. Pihak industri juga meminta untuk dilakukan peningkatan kapasitas angkut *loader* menjadi 10 pcs. Perhitungan kekuatan dan analisis akan digunakan untuk menguji tingkat kekakuan konstruksi sehingga didapatkan gerakan mengayun yang minim. Proses perancangan konstruksi dilakukan dengan memperhatikan faktor-faktor keamanan sehingga dapat dioperasikan dengan aman. Kebaruan penelitian ini terletak pada Transformasi mekanisme *loader* dari sistem ayun berbasis engsel menjadi sistem translasi berbasis ball screw, integrasi *dual-axis control* (servo + motor induksi) untuk meningkatkan presisi positioning, peningkatan performa signifikan yang belum dicapai pada penelitian sebelumnya terkait *loader* industri.

METODE PENELITIAN

Verein Deutsche Ingenieuer (VDI) 2222 adalah metode perancangan yang digunakan dalam penelitian dengan konsep sistem [8]. Tahap perancangan menurut VDI 2222 dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu merencana, mengonsep, merancang, dan menyelesaikan. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian

Tahap Merencana

Tahap merencana terdiri dari tiga kegiatan, yaitu identifikasi masalah pada konstruksi lama *loader*, pengumpulan data sebagai bahan pendukung penelitian, dan pembuatan *requirement list* (Tabel 1) sebagai acuan dalam membuat desain. Adapun identifikasi masalah bertujuan untuk menentukan permasalahan-permasalahan yang menjadi dasar dilakukannya penelitian. Pengumpulan data dapat berasal dari hasil pengamatan langsung, wawancara, maupun dokumentasi.

Tabel 1 Requirement List

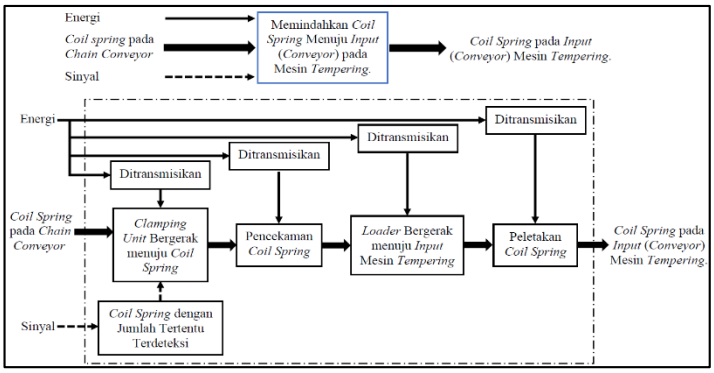
	Persyaratan	Kuantifikasi	Ket.
1	**Persyaratan Utama**		
1.1	Panjang Langkah	- Tinggi dari lantai : 1.900 - 2.000 mm - Pergerakan panjang minimal : 750 mm	
1.2	Getaran yang minim		
1.3	Kapasitas angkut	- Jumlah benda : 6 - 10 pcs - Diameter luar benda : 98 - 178 mm - Panjang maksimal benda : 250 mm - Berat maksimal tiap benda : 4.57 kg	
1.4	Kecepatan *cycle time*	- Lebih cepat dari 11 detik	
1.5	Suhu kerja	- Pada beberapa bagian konstruksi dapat bekerja pada suhu hingga 100°C	
2	**Persyaratan Minimum**		
2.1	Umur pakai	≥ 3 Tahun	IV
2.2	Penggunaan bebas perawatan	Pelumasan tipis pada permukaan yang bergesekan	II
2.3	Material konstruksi kuat dan ringan		III
2.4	Termin	Agustus 2023	IV
3	**Keinginan / Harapan**		
3.1	Penggunaan ruang efisien		
3.2	Perakitan mudah		
3.3	Perawatan mudah		

Keterangan Persyaratan:
IV : Sangat penting sekali II : Penting
III : Sangat penting I : Tidak penting

Pembuatan *requirement list* secara umum dilakukan dengan mengacu pada hal-hal penting yang dibutuhkan oleh pihak industri.

Tahap Mengonsep

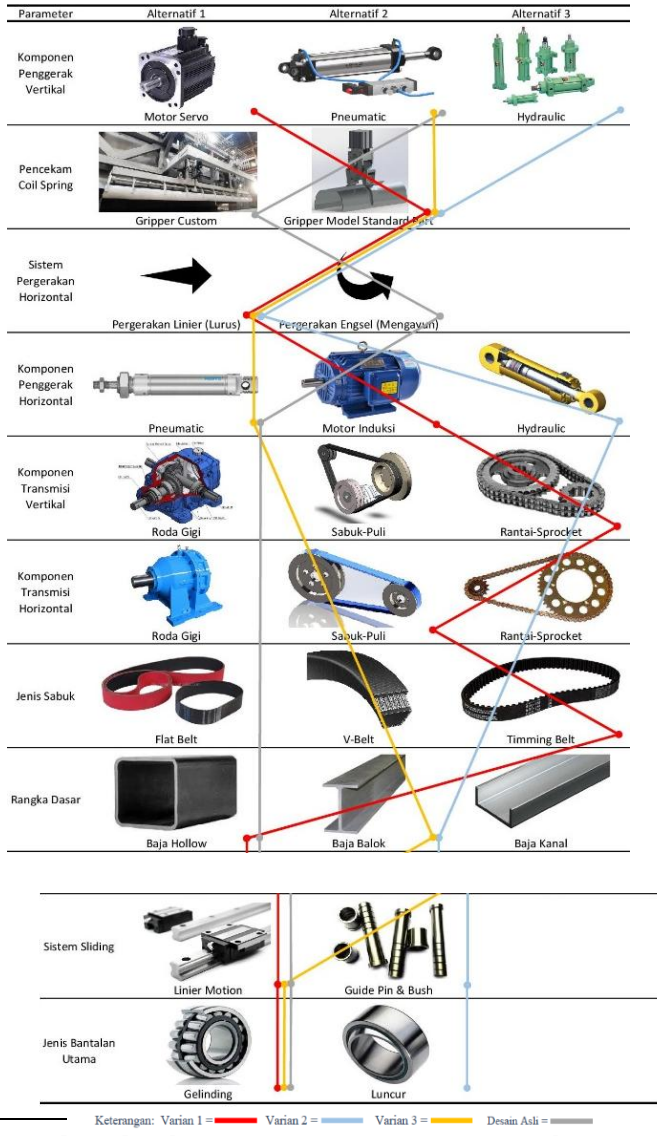
Tahap mengonsep diawali dengan pembuatan struktur fungsi. Struktur fungsi digunakan sebagai dasar pembuatan konsep varian dalam penelitian. *Loader input* mesin *tempering* secara umum ber-fungsi sebagai pemindah *coil spring* dari *chain conveyor* menuju konveyor pada mesin *tempering* yang dapat didefinisikan sesuai Gambar 3.



Gambar 3 Struktur fungsi

Setelah mendefinisikan struktur fungsi konstruksi *loader*, tahap mengonsep dilanjutkan dengan membuat varian konsep. Pembuatan varian konsep dilakukan dengan menggunakan morfologi desain seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Morfologi Desain



Morfologi desain yang dibuat menghasilkan tiga varian baru dan satu varian lama. Masing-masing konsep dari varian baru dianalisis dan dinilai berdasarkan penilaian teknis dan juga ekonomis untuk menentukan varian terbaik. Penilaian varian konsep dengan beberapa aspek dan pembobotan tertentu dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4.

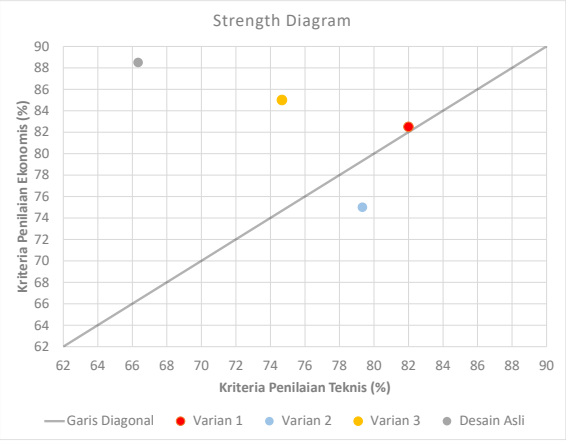
Tabel 3 Penilaian Teknis

Kriteria Penilaian Teknis	Bobot	Varian 1		Varian 2		Varian 3		Desain Asli		Nilai Ideal	
		Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai
Kekuatan Konstruksi	3	7	21	10	30	8	24	7	21	10	30
Efektifitas Gerakan	5	10	50	8	40	7	35	8	40	10	50
Ketepatan Posisi	4	9	36	7	28	6	24	6	24	10	40
Keamanan Konstruksi	3	8	24	9	27	8	24	7	21	10	30
Kemudahan Perawatan	2	7	14	8	16	9	18	8	16	10	20
Kemudahan Perakitan	2	6	12	7	14	8	16	7	14	10	20
Faktor Kebisingan	2	8	16	6	12	6	12	5	10	10	20
Tingkat Getaran	5	9	45	7	35	7	35	5	25	10	50
Keandalan	4	7	28	9	36	9	36	7	28	10	40
Total		71	246	71	238	68	224	60	199	90	300
Nilai Teknis		0.82		0.793		0.747		0.663		1	
Presentase (%)		82		79.3		74.7		66.3		100	
Peringkat		1		2		3		4			

Tabel 4 Penilaian Ekonomis

Kriteria Penilaian Ekonomis	Bobot	Varian 1		Varian 2		Varian 3		Desain Asli		Nilai Ideal	
		Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobot x Nilai	Nilai	Bobo x Nila
Biaya Bahan Baku Material	5	9	45	6	30	7	35	9	45	10	50
Biaya Standard Part	4	8	32	8	32	9	36	9	36	10	40
Biaya Permesinan	3	8	24	8	24	9	27	9	27	10	30
Biaya Perakitan	3	8	24	8	24	9	27	8	24	10	30
Biaya Perawatan	3	8	24	8	24	9	27	9	27	10	30
Biaya Desain	2	8	16	8	16	9	18	9	18	10	20
Total		49	165	46	150	52	170	53	177	60	200
Nilai Teknis		0.825		0.75		0.85		0.885		1	
Presentase (%)		82.5		75		85		88.5		100	
Peringkat		3		4		2		1			

Berdasarkan penilaian teknis dan penilaian ekonomis yang telah dilakukan, pemilihan varian konsep terbaik dapat dipertimbangkan dengan menggunakan *strength diagram* seperti pada Gambar 4. Pemilihan varian konsep terbaik dipilih berdasarkan varian dengan nilai / *rating* paling mendekati garis diagonal dengan arah sumbu positif. *Strength diagram* menunjukkan bahwa varian konsep 1 merupakan konsep terbaik karena memiliki *rating* yang paling mendekati garis diagonal positif.

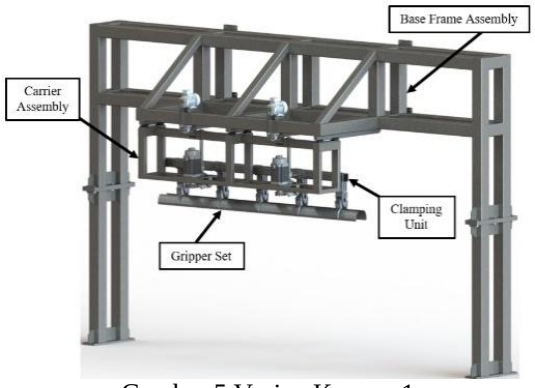


Gambar 4 Strength Diagram

Tahap Merancang

Tahap merancang diawali dengan proses *predesign*. *Predesign* meliputi proses pembuatan daftar urutan komponen yang akan dirancang dan pengumpulan referensi berupa katalog *standard part* maupun data-data lain yang berhubungan dengan desain yang akan dibuat. Proses selanjutnya dalam tahap merancang adalah proses membuat desain dari varian konsep terpilih yang dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Solidworks*. Tahap merancang diselesaikan dengan proses perhitungan dan analisis hasil desain. Proses perhitungan dan analisis bertujuan untuk memastikan desain yang dibuat apakah dapat memenuhi kebutuhan / standar tertentu atau tidak. Perhitungan dapat dilakukan dengan menggunakan standar rumus-rumus perhitungan dan analisis terhadap kekuatan konstruksi *loader* menggunakan FEA pada *software Solidworks*.

Varian konsep 1 sebagai konsep terpilih direalisasikan ke dalam bentuk desain rancangan pada tahapan proses merancang. Varian konsep 1 merupakan alternatif desain konstruksi yang memiliki dasar penggerak berupa motor listrik. Motor listrik yang digunakan sebagai penggerak dengan arah sumbu vertikal adalah motor *servo* dan horisontal adalah motor induksi. Motor listrik akan ditransmisi-kan ke komponen *screw shaft* sehingga dapat melakukan pergerakan ke arah vertikal maupun horizontal dengan jarak / posisi tertentu. Komponen transmisi yang digunakan untuk *axis* vertikal berupa rantai dan *sprocket*, sedangkan pada *axis* horizontal berupa sabuk dan puli (*pulley*). Penggunaan meka-nisme motor dan *shaft screw* memungkinkan konstruksi varian konsep 1 seperti pada Gambar 5, untuk dapat menentukan jarak pergerakan seefisien mungkin.



Gambar 5 Varian Konsep 1

Tahap Menyelesaikan

Tahap menyelesaikan terdiri dari proses pem-buatan gambar kerja dan laporan akhir. Pembuatan gambar kerja dilakukan setelah didapatkan desain akhir yang telah melalui proses

analisis. Gambar kerja secara umum dibuat dalam bentuk gambar 2D dan 3D dengan tampilan berupa *assembly* maupun detail dari *sub-assembly*. Proses akhir dari kegiatan penelitian menggunakan metode VDI 2222 adalah membuat kesimpulan dari rangkaian kegiatan perancangan yang telah selesai dilakukan sebagai penutup suatu laporan konstruksi. Rang-kuman seluruh rangkaian kegiatan penelitian dapat dituliskan dalam laporan akhir.

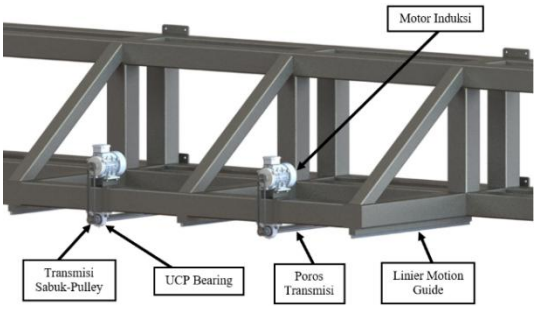
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perancangan

Rancangan konstruksi *loader input* mesin *tempering* pada *line* produksi *hot coil spring* dibuat berdasarkan konsep varian terpilih yang telah melalui proses penilaian baik secara teknis maupun ekonomis. Rancangan konstruksi *loader* dibagi ke dalam 4 *sub-assembly* / bagian utama yang terdiri dari *base frame assembly*, *carrier assembly*, *clamping unit*, dan *gripper set*. *Base frame assembly* merupakan bagian *loader* yang berfungsi sebagai penopang / penyangga utama konstruksi secara keseluruhan. *Carrier assembly* pada *loader* berfungsi untuk memungkinkan konstruksi bergerak secara horizontal, sedangkan *clamping unit* untuk memungkinkan bergerak secara vertikal. Proses pencekaman benda kerja berupa *coil spring* pada konstruksi *loader* dilakukan oleh *gripper set* yang secara keseluruhan berjumlah 5 unit. Secara umum konstruksi *loader input* mesin *tempering* pada *line* produksi *hot coil spring* memiliki dimensi total sebesar 6000 × 1810 × 3845 mm.

Base Frame Assembly

Base frame assembly terdiri dari beberapa komponen rangka, *ball screw*, motor induksi, *bearing*, *pulley*, sabuk, *linier motion guide*, seperti terlihat pada Gambar 6. Komponen rangka pada *base frame assembly* dibuat dengan kombinasi besi plat dan *hollow* berjenis MS (*Mild Steel*) yang disatukan menggunakan proses pengelasan. Rangka dasar dibuat dengan mempertimbangkan ukuran dan posisi pemasangan konstruksi lama *loader*. Motor induksi yang ter-pasang pada rangka berfungsi sebagai penggerak poros transmisi untuk memungkinkan terjadinya pergerakan horisontal pada sistem melalui transmisi sabuk-*pulley*. Komponen *linier motion guide* sebanyak 3 unit digunakan sebagai penyangga beban dari *carrier assembly* dan sekaligus sebagai pemandu pergerakan horizontal.

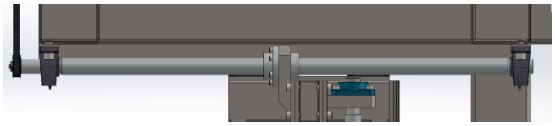


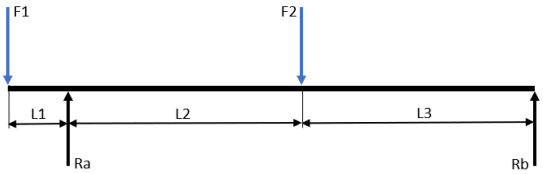
Gambar 6 Base Frame Assembly

Rancangan *base frame assembly* yang dibuat akan dipasangkan pada lantai pabrik dan juga dinding / *body* mesin *tempering* sesuai dengan *layout* pabrik yang ada. *Base frame assembly* memiliki dimensi total sebesar 6000 × 1810 × 1995 mm. Perhitungan yang digunakan sebagai dasar pemilihan jenis / spesifikasi komponen akan dijabarkan lebih lanjut sebagai berikut:

a. Perhitungan poros transmisi

Poros transmisi pada *base frame assembly* berupa *ball screw* akan dipasangkan dengan sebuah *ball screw bearing* untuk membentuk sistem pergerakan horizontal pada *loader*. Ukuran diameter minimum poros transmisi dapat ditentukan berdasarkan besaran dan posisi beban yang diterima (momen bengkok), serta jenis material poros yang digunakan. Posisi pem-bebanan dan ilustrasi gaya pada poros transmisi dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8.


Gambar 7 Poros Transmisi *Base Frame Assembly*



Gambar 8 Ilustrasi Gaya pada Poros

Beban total komponen transmisi F1 dan *carrier assembly* F2kN yang diterima oleh *ball screw* adalah 2,453 N dan 866,604 N. Panjang L1, L2, dan L3 secara berurutan adalah 80, 595, dan 595 mm. Nilai Ra dan Rb dapat dihitung dengan menggunakan rumus kesetimbangan:

$$\Sigma F_y = 0 \quad \text{.....(1)}$$

$$\Sigma M_a = 0 \quad \text{.....(2)}$$

Sehingga, didapatkan nilai Ra dan Rb sebesar 435,92 N dan 433,137 N. Ra > Rb, maka Ra

digunakan untuk mencari momen bengkok maksimal dan berfungsi sebagai momen virtual (M_v) pada perhitungan diameter minimal poros. Batas tekuk (σ_{bD}) dan angka keamanan (V) yang dimiliki *ball screw* adalah 625 N/mm^2 dan 2,5. Berdasarkan data yang ada, dapat ditentukan tegangan bengkok ijin sementara ($\overline{\sigma_b}'$), momen virtual (M_v), dan diameter inti sementara (d_k') dengan rumus sebagai berikut:

$$\overline{\sigma_b}' = \frac{\sigma_{bD}}{V} \quad \text{.....(3)}$$

$$M_v = \text{Ra (L2 + L3)} \quad \text{.....(4)}$$

$$d_k' = \sqrt[3]{\frac{M_v}{0{,}1 \times \overline{\sigma_b}'}} \quad \text{.....(5)}$$

Berdasarkan perhitungan maka didapat-kan faktor kekasaran permukaan (b_1), faktor ukuran (b_2), angka efek lekuk (β_k), dan angka keamanan (V) sebesar 0,95, 0,9, 2, dan 1,5. Data hasil perhitungan dapat digunakan untuk me-nentukan tegangan bengkok ijin sebenarnya ($\overline{\sigma_b}$) dan diameter inti sebenarnya (d_k) untuk me-ngetahui diameter minimal poros (d) sesuai dengan rumus berikut:

$$\overline{\sigma_b} = \frac{\sigma_{bD} \times b_1 \times b_2}{\beta_k \times V} \quad \text{.....(6)}$$

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{M_v}{0{,}1 \times \overline{\sigma_b}}} \quad \text{.....(7)}$$

$$d = d_k + t_1 \quad \text{.....(8)}$$

Perhitungan menghasilkan ukuran dia-meter minimal poros (d) sebesar 30,766 mm. Diameter minimal poros yang dipilih untuk desain konstruksi dengan menyesuaikan diameter dalam bearing adalah 35 mm.

b. Perhitungan sabuk / *belt*

Jenis komponen penerus transmisi yang digunakan untuk pergerakan horizontal pada *loader* adalah transmisi sabuk-*pulley*. Jenis *pulley* yang digunakan adalah *timming pulley* dengan kode produk **PTPP30P5M150-A-N19**. Dimensi *timming belt* dapat ditentukan dari diameter *pulley* yang digunakan dan jarak antar sumbu yang diperlukan, kemudian disesuaikan dengan panjang sabuk yang tersedia pada katalog. Ukuran diameter dan jarak sumbu *pulley* diketahui sebesar 46,6 mm dan 331,9 mm. Per-hitungan dalam pemilihan panjang *timming belt* (ℓ) dapat menggunakan rumus berikut:

$$\ell = 2 \times \text{jarak sumbu} + \text{keliling } pulley \quad (9)$$

Maka, didapatkan hasil perhitungan pan-jang *timming belt* yang diperlukan sebesar 810, 198 mm. Panjang *timming belt* yang tersedia di katalog dan paling mendekati hasil perhitungan adalah 810 mm.

c. Perhitungan motor induksi

Komponen penggerak yang digunakan dalam pergerakan horizontal adalah motor induksi yang dilengkapi dengan *encoder* sebagai pengatur koordinat pergerakan. Pemilihan jenis motor induksi dilakukan dengan memper-timbangkan kapasitas torsi, ukuran poros, dan kecepatan putaran motor. Ukuran poros motor dipilih dengan menyesuaikan ukuran pasangan *pulley*. Beban total yang diterima motor didapat-kan dari total massa semua poros, *pulley*, dan komponen lain yang berkaitan secara langsung dengan sistem transmisi, dikalikan dengan per-cepatan gravitasi (g) dan koefisien gesek (fc). Torsi yang akan digunakan sebagai dasar pemilihan spesifikasi motor induksi didapat berdasarkan beban *axial* (F_2), *pitch* (Ph) poros transmisi / *ball screw*, dan angka keamanan (V). Per-hitungan torsi minimal yang dibutuhkan motor menggunakan rumus berikut:

$$\tau = \frac{F_2 \times Ph}{2 \times \pi} \times V \quad \text{.....(10)}$$

Perhitungan torsi memiliki hasil bahwa motor induksi yang digunakan sebagai peng-gerak sistem horizontal harus memiliki torsi lebih dari 1.260 Nm.

d. Perhitungan umur pakai *bearing*

Jenis *bearing* yang dipakai untuk me-numpu poros transmisi pergerakan horizontal adalah *bearing* UCP . *Bearing* UCP 207 memiliki kapasitas beban dinamis (C) sebesar 15.400 N. *Bearing* me-nerima beban (P) sebesar 435,92 N, memiliki nilai konstanta (q) sebesar 3, dan memiliki kece-patan putaran (n) sebesar 910 Rpm. Perhitungan umur pakai bearing (L_h) dapat menggunakan rumus berikut:

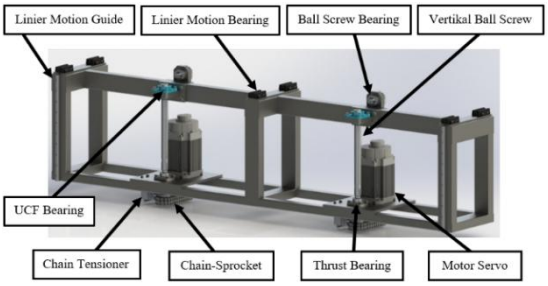
$$\left(\frac{C}{P}\right)^q = \frac{L_h \times n \times 60}{10^6} \quad \text{.....(11)}$$

Sehingga, umur pakai *bearing* UCP 207 adalah $807{,}512 \times 10^6$ jam.

Carrier Assembly

Carrier assembly merupakan bagian dari *loader* yang berfungsi sebagai pembawa atau tempat meletakkan komponen-komponen *loader* yang ber-fungsi sebagai sistem pergerakan vertikal. *Carrier assembly* terdiri dari komponen rangka, poros trans-misi vertikal, *thrust bearing*, *ball screw bearing*, motor *servo*, *sprocket*, *chain tensioner*, *linier motion guide*, *linier motion bearing*, yang dapat dilihat pada Gambar 9. Rangka pada *carrier assembly* menggunakan kombinasi besi plat dan *hollow* ber-jenis MS. Komponen penggerak vertikal yang digunakan adalah motor *servo* yang dilengkapi dengan *encoder* sebagai sensor titik koor-dinat dan *electromagnetic brake* untuk menahan beban pada saat berhenti, serta menggunakan pa-sangan *chain-*

sprocket sebagai penyalur sistem transmisi. *Carrier assembly* memiliki 6 buah *linier motion bearing* pada bagian atas rangka dan 2 buah *linier motion guide* pada salah satu sisi samping rangka sebagai pemandu pergerakan vertikal. *Carrier assembly* juga memiliki 2 buah *ball screw bearing* pada bagian atas rangka yang berfungsi sebagai penghubung poros transmisi horisontal.



Gambar 9 Carrier Assembly

Carrier assembly memiliki dimensi total sebesar 2750 × 425 × 771 mm. Beberapa perhitungan yang digunakan sebagai dasar pemilihan komponen pada *carrier assembly* akan dijabarkan sebagai berikut:

a. Perhitungan poros transmisi

Poros transmisi yang digunakan pada *carrier assembly* adalah *ball screw* yang dipasang-kan dengan *ball screw bearing* untuk membentuk sistem pergerakan vertikal pada *loader*. Perhitungan beban minimum yang perlu diangkat oleh setiap poros vertikal *ball screw* (W) didapatkan dari jumlah total massa benda kerja (m.BK) dan *clamping unit* (m.CU), kemudian dikalikan dengan per-cepatan gravitasi (g) dan dibagi dengan jumlah sistem transmisi, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$W = \frac{(10 \times m.BK + m.CU) \times g}{2} \quad \text{.....(12)}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa beban minimal yang harus diangkat oleh masing-masing vertikal *ball screw* adalah 1,030 kN. Tipe pasangan vertikal *ball screw* dan *ball screw bearing* yang dipilih memiliki kapasitas beban *axial* statis sebesar 91,5 kN, sehingga dapat dinyatakan bahwa tipe yang digunakan memenuhi dasar perhitungan elemen konstruksi.

b. Perhitungan rantai / *chain*

Komponen penerus transmisi pada sistem pergerakan vertikal pada *loader* adalah transmisi *chain-sprocket*. Penggunaan tipe transmisi *chain-sprocket* bertujuan untuk memastikan *loader* dapat menahan beban pada koordinat ketinggian tertentu dengan aman. Jenis *sprocket* yang di-gunakan adalah *two-row sprocket.* Dimensi dan jumlah mata rantai dapat ditentukan dari diameter *sprocket* yang digunakan dan jarak antar sumbu yang di-perlukan. Ukuran diameter dan jarak sumbu *sprocket* diketahui sebesar 91,62 mm dan 175 mm. Perhitungan dalam pemilihan panjang rantai (ℓ) dan jumlah rantai (n) dapat menggunakan rumus berikut:

$$\ell = 2 \times \text{jarak sumbu} + \text{keliling rantai} \quad \text{(13)}$$

$$n = \frac{\text{Panjang total lintasan rantai}}{\text{Pitch rantai}} \quad \text{.....(14)}$$

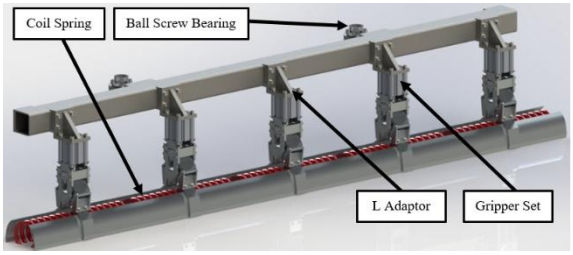
Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan ukuran panjang lintasan rantai yang diperlukan adalah 637,833 mm dan jumlah mata rantai yang dibutuhkan adalah 34 unit.

c. Perhitungan motor *servo*

Komponen penggerak yang digunakan dalam pergerakan vertikal adalah motor *servo* yang dilengkapi dengan *encoder* sebagai sensor titik koordinat dan *electromagnetic brake* untuk menahan beban pada saat berhenti. Pemilihan jenis motor *servo* dilakukan dengan mem-pertimbangkan kapasitas torsi, ukuran poros, dan kecepatan putaran motor yang seminim mungkin. Ukuran poros motor dipilih dengan menyesuai-kan ukuran *sprocket.* Beban axial total (F_2) yang diterima motor didapatkan dari total massa semua komponen yang berkaitan secara langsung dengan sistem transmisi, kemudian dikalikan percepatan gravitasi (g) dan dibagi dengan jumlah sistem transmisi. Torsi yang akan di-gunakan sebagai dasar pemilihan spesifikasi motor *servo* didapat menggunakan Rumus 10 sehingga motor *servo* yang akan digunakan sebagai penggerak sistem pergerakan vertikal harus memiliki torsi lebih besar dari 6,556 Nm.

Clamping Unit

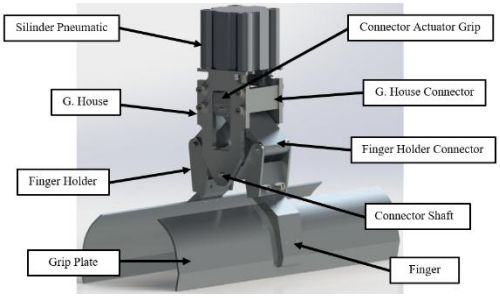
Clamping unit merupakan bagian dari loader yang dapat bergerak secara vertikal dan berfungsi sebagai dasar penempatan gripper [9]. Clamping unit terdiri dari komponen rangka, linier motion bearing, ball screw bearing, gripper set, dll. Gambar 10 menunjuk-kan bahwa clamping unit dapat mengangkut 10 pcs coil spring dengan panjang masing-masing sebesar 250 mm. Coil spring dicekam secara berjajar dengan jarak antar benda sebesar 50 mm. Clamping unit menggunakan kombinasi besi plat dan hollow berjenis MS. Rangka pada clamping unit memiliki 2 buah linier motion bearing pada salah satu sisi samping dan 2 buah ball screw bearing yang ber-hubungan dengan vertikal ball screw sebagai pem-bentuk sistem pergerakan vertikal. Clamping unit memiliki dimensi sebesar 3000 × 485 × 568 mm.



Gambar 10 Clamping Unit

Gripper Set

Gripper set adalah alat yang berfungsi sebagai pencekam benda kerja berupa *coil spring* pada konstruksi *loader*. *Gripper set* (Gambar 11) terdiri dari beberapa komponen, di antaranya yaitu silinder *pneumatic*, kerangka, *connector bush*, *grip plate*.



Gambar 11 Gripper Set

Gripper set yang terpasang pada rangka *clamping unit* berjumlah 5 buah dengan kapasitas pencekaman maksimal benda sebesar Ø 183 mm. *Gripper set* secara umum memiliki dimensi sebesar 600 × 219 × 440,5 mm. Komponen pendorong pada *gripper set* yang berfungsi sebagai penggerak mekanisme pencekaman adalah sebuah silinder *pneumatic*. Pemilihan tipe / spesifikasi Silinder *pneumatic* pada *gripper set* didasarkan pada besarnya kapasitas daya dorong dan menyesuaikan dengan ukuran rangka *gripper*. Silinder *pneumatic* pada *gripper set* menerima beban yang harus diangkat sebesar 215,231 N. Perhitungan kapasitas gaya (F) yang digunakan sebagai pertimbangan dalam memilih silinder *pneumatic* adalah sebagai berikut:

$$F = \mathrm{p} \times \mathrm{A} \quad \text{.....(15)}$$

Silinder *pneumatic* terpilih memiliki ukuran *bore* Ø80 mm dan *stroke* 50 mm. Silinder *pneumatic* juga memiliki tekanan kerja sebesar 500.000 Pa dan luasan *bore* sebesar 0,00503 m^2, sehingga memiliki kapasitas gaya se-besar 2.513,274 N. Tipe silinder *pneumatic* yang digunakan memenuhi dasar perhitungan elemen konstruksi.

Perhitungan *Cycle Time*

Perhitungan total *cycle time* pergerakan *loader* dari posisi diam hingga kembali ke posisi awal dihitung berdasarkan kecepatan pencekaman (pergerakan *pneumatic*), putaran motor (n), dan juga *pitch/revolution* (Ph) dari poros transmisi (*ball screw*). Perhitungan *cycle time* (t) secara umum dilakukan dengan mengalikan kecepatan linier ($\mathcal{V}_{linier}$) dengan panjang langkah (ℓ). Perhitungan *cycle time loader* pada kondisi optimal meng-gunakan rumus berikut:

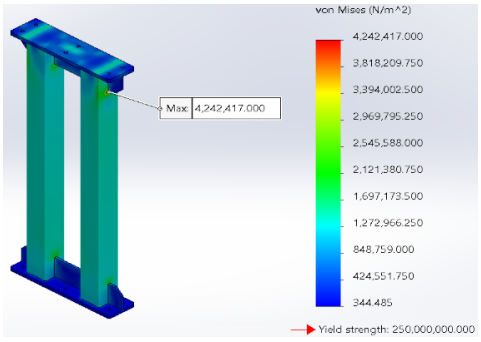
$$\mathcal{V}_{linier} = \frac{n \times \mathrm{Ph}}{60 \times 10^3} \quad \text{.....(16)}$$

$$t = \frac{\ell_1}{\mathcal{V}_{linier}} \quad \text{.....(17)}$$

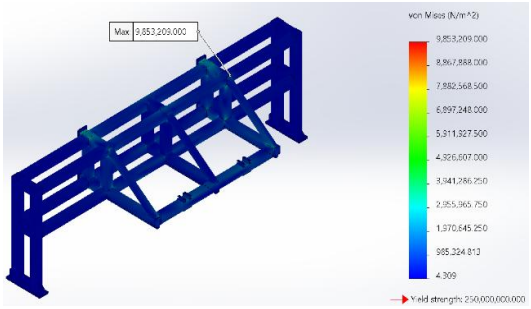
Maka, didapatkan hasil perhitungan bahwa konstruksi *loader* yang baru memiliki *cycle time* pada kondisi optimal sebesar 7,788 detik sehingga lebih cepat dari konstruksi lama *loader* yang memiliki *cycle time* sebesar 11 detik. Dibandingkan desain lama, performa dari segi kapasitas naik 66% dan *cyle time* turun 29%.

Hasil Analisis

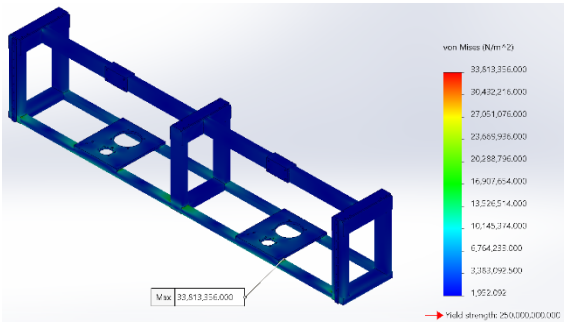
FEA pada *software Solidworks* digunakan untuk menganalisis kekuatan konstruksi *loader*, terutama pada bagian rangka. Metode FEA digunakan untuk menganalisis hasil desain dengan menyesuaikan material, *constraint*, dan *load* yang mewakili kondisi sebenarnya agar mendapatkan hasil yang seakurat mungkin [10]. Penggunaan FEA bertujuan untuk memastikan keamanan konstruksi rangka dengan membandingkan *von Mises* terhadap *yield strength* dari material rangka. Hasil analisis pada rangka *loader* menggunakan metode FEA adalah sebagai berikut:



Gambar 12 Analisis FEA *Foot Frame*



Gambar 13 Analisis FEA *Base Frame*



Gambar 14 Analisis FEA *Carrier Frame*

Hasil analisis FEA pada komponen *foot frame*, *base frame*, dan *carrier frame* menunjukkan bahwa tegangan *von Mises* yang diterima oleh masing-masing rangka sebesar 3.370 MPa, 9.853 MPa, dan 33.813 MPa. *Yield strength* maksimal yang dapat diterima masing-masing rangka dengan material *hollow* dan plat MS adalah sebesar 250.000 MPa, sehingga rangka konstruksi *loader* aman dan dapat memenuhi pembebanan yang ada. Seluruh komponen rangka memiliki *safety factor* antara 7–74 sehingga berada jauh di atas batas minimum desain (SF ≥ 2), sehingga konstruksi dinyatakan aman.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari Perancangan dan Analisis *Loader Input* Mesin *Tempering* pada *Line* Produksi *Hot Coil Spring* PT. XYZ. yaitu:

1. Rancangan *loader input* mesin *tempering* memiliki sistem pergerakan baru dengan menggunakan *ball screw* sehingga tidak terdapat lagi pergerakan mengayun sehingga menghilangkan sumber getaran utama dan memiliki kapasitas angkut lebih besar hingga 10 pcs *coil spring*, naik sebesar 66% dan cycle time menurun 29%, dari 11 detik menjadi 7,79 detik.
2. Hasil analisis FEA pada rangka menunjukkan bahwa komponen *foot frame*, *base frame*, *carrier frame*, dan *clamping frame* secara berurutan memiliki nilai *von Mises* sebesar 3.370 MPa, 9.853 MPa, dan 33.813 MPa, sedangkan *yield strength* yang dimiliki material rangka adalah 250.000 MPa dengan *safety factor* antara 7–74 sehingga dapat disimpulkan konstruksi rangka kuat dan aman.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Ilyas, M. F. H. (2024). *Rancang Bangun Multiple Drilling Menggunakan Robot Lengan Dan Perencanaan Handling Station Stacking magazine Pada Proses Drilling Di PT. Yamaha Elektronik Manufacturing Indonesia (YEMI)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).Wardenier, J. 2001. *Hollow Sections in Structural Applications.* Netherlands: Comité International pour le Développement et l`Etude de la Construction Tubulaire.

[2] Li, T. J., Wang, M. Z., Zhang, Y. M., & Zhao, C. Y. (2020). Real-time thermo-mechanical dynamics model of a ball screw system based on a dynamic thermal network. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *108*(1), 613-624.

[3] Müller, J. H. (2021). *Entwicklung, Aufbau & Erprobung eines Sekundärreflektors zur experimentellen Verwendung im Hochleistungsstrahler SYNLIGHT* (Doctoral dissertation, Hochschule Kaiserslautern).

[4] Park, H., Han, J. W., Na, W., & Yu, J. (2023). Characterizing the biaxial compressive deformation behavior of epoxy polymer through cruciform experiment and finite element analysis. *Composite Structures*, *305*, 116488.

[5] Salimi, A. A. (2023). Simulasi Finite Element Analysis (Fea) Dan Fabrikasi Implan Untuk Perbandingan Kinerja Implan Kovensional Dan Custom Cruciate Retaining (Cr) Untuk Penderita Osteoarthritis Berdasarkan Rekonstruksi Data Mri/Ct Scan Tulang Lutut.

[6] Sarmidi, S., Faisal, M., Mases, Y., Nurbaiti, N., & Nuryanneti, I. (2025). Optimalisi Kinerja dan Keselamatan Kerja Melalui Implementasi Prosedur Pemeriksaan dan Pengecekan Harian (P2H) Unit Wheel Loader WA-200-5 di Pabrik Briket Tanjung Enim PT. Bukit Asam Tbk. *Jurnal Ilmiah Teknik dan Sains*, *3*(2), 260-268.

[7] Suryaman, Y., Nuridah, S., & Sagitarius, E. (2023). Analisis Pengaruh Leverage dan Rasio Aktivitas terhadap Profitabilitas Perusahaan Manufaktur Sub Sektor Otomotif dan Komponen yang Terdaftar di Bursa Efek Indonesia Tahun 2017-2022. *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, *3*(4), 7835-7844.

[8] Wang, D., Zhang, S., Wang, L., & Liu, Y. (2021). Developing a ball screw drive system of high-speed machine tool considering dynamics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *69*(5), 4966-4976.

[9] Wijaya, D. K., Hartono, B. R., Jazuli, J., & Izzhati, D. N. (2024). Optimizing product design and development of engine carbon

cleaning maintenance tools using reverse engineering and VDI 2222 methods. *OPSI*, *17*(1), 185-203.

[10] Wijaya, D. K., Hartono, B. R., Jazuli, J., & Izzhati, D. N. (2024). Optimizing product design and development of engine carbon cleaning maintenance tools using reverse engineering and VDI 2222 methods. *OPSI*, *17*(1), 185-203.Rhakasywi, D. 2015. Rancang Bangun Elemen Mesin 3D dengan *Solidworks*. *Handbook* pe-tunjuk penggunaan *software Solidworks*.