

ELECTRON

Jurnal Ilmiah Teknik Elektro

ELEKTRONIKA, SISTEM KENDALI, TELEKOMUNIKASI, TEKNOLOGI
INFORMASI, TEKNIK KETENAGALISTRIKAN

VOLUME 06 NOMOR 01, MEI 2025



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNIK
UNIVERSITAS BANGKA BELITUNG**



Dewan Redaksi

Ketua Redaksi

M. Yonggi Puriza, S.T., M.T.

Manajer Jurnal

Almeera Amsana Rachmani

Ketua Tim Editor

Welly Yandi, S.Pd., M.T.

Penelaah Sejawat & Editor :

Arnawan Hasibuan, S.T., M.T., Ph.D.

Brainvendra Widi Dionova, S.ST., M.Sc.Eng

Hanalde Andre, S.T., M.T.

Rika Favoria Gusa, S.T., M.Eng.

Anisa Ulya Darajat, S.T., M.T.

Asmar, S.T., M.Eng.

Diyajeng Luluk Karlina, S.T., M.T.

Dara Aulia Feryando, S.T., M.T.

Deri Latika Herda, S.T., M.T.

Fardhan Arkan, S.T., M.T.

Frenzi Agres Yudithia, M.T

Ghiri Basuki Putra, S.T., M.T.

Ir. Habib Satria, M.T, IPP

Hajjar Yuliana, S.T., M.T.

Handoko Rusiana Iskandar, ST., MT.

Imil Hamda Imran, S.T., M.Sc., Ph.D.

Iski Zaliman, S.Kom., M.Kom.

Jimmy Trio Putra, S.T., M.Eng.

Kiki Kananda, S.T., M.T.

Legenda Prameswono Pratama, S.S.T., M.Sc.Eng

Muhammad Jumnahdi, S.T., M.T.

Rizki Wahyu Pratama, S.T., M.T.

Sitti Amalia, M.T.

Swadexi Istiqphara, S.T., M.T.

Tianur, S.S.T., M.Eng.

Tri Hendrawan Budiarto, S.T., M.T.

Triuli Novianti, S.T, M.T

Umar Faruq Vista, S.Kom., M.Kom.

Ir. Wahri Sunanda, S.T., M.Eng., IPM., A.Eng.

Yandi Anzari, S.Kom., M.Kom.

Yohanes Calvinus, S.T., M.T.

Staf Administrasi

Hendy, S.T.

Kata Pengantar

Jurnal Electron saat ini memasuki Volume 06 no. 1. Mei 2025.

Fokus dan ruang lingkup Jurnal Electron meliputi bidang Teknik Elektronika, Teknik Kontrol, Teknik Telekomunikasi, Teknik Informatika dan Informatika, dan Teknik Listrik/ Ketenagalistrikan baik dari berbagai akademisi maupun praktisi industri dari instansi pemerintah maupun swasta.

Harapan kami pada edisi selanjutnya akan lebih banyak memuat tulisan-tulisan ilmiah dari hasil penelitian dan hasil pemikiran penulis di luar lembaga sehingga menjadi wadah untuk membuka wacana ilmiah yang lebih luas.

Penghargaan setinggi-tingginya kami sampaikan kepada Penelaah Sejawat atau Reviewer, Editor, Dewan Redaksi, Penulis dan semua pihak yang terlibat dalam penyusunan dan penerbitan Jurnal Electron edisi ini. Semoga jurnal ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan keilmuan di bidang Teknik Elektro pada khususnya dan Teknik pada umumnya. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun tetap kami harapkan perbaikan dan perbaikannya demi kemajuan Jurnal Electron ini.

Salam Hangat

Ketua Redaksi Jurnal Electron



e-ISSN 2622-6588 / p-ISSN 2830-523X

ELECTRON

Jurnal Ilmiah Teknik Elektro



<https://jurnalelectron.org/index.php/electron>

Daftar Isi

- Comparative Analysis of Haar Cascade Classifier, Dlib, and Mediapipe for Face Recognition (Eng.)***
Elbert, Endah Setyaningsih, Lamto Widodo 1 – 8
- Sistem PID untuk Pengaturan Aliran Air pada Dua Tangki Penampungan**
Kartika, M. Fathan Naqi, Misbahul Jannah, Misriana 9 – 25
- Rancang Bangun Prototype Sistem Deteksi Kebakaran Menggunakan Board EY1703 Berbasis Mikrokontroler STC15F2K32S2**
Dwi Abrar Fatrunadi, Dwi Purwanti 26 – 38
- Innovative Automatic Winding for Transformers: An Efficient Solution for Modern Transformer Production (Eng.)***
Mardiansyah, Heri Kusnadi, Firman Amir 39 – 46
- Tinjauan Komprehensif: Simulasi Sistem Disk Scheduling dengan Berbagai Algoritma Menggunakan OS Sim**
Fidel Lusiana Putri, Djuniadi, Febry Putra Rochim 47 – 55
- Analisis Rekonfigurasi Jaringan Menggunakan Particle Swarm Optimization untuk Meningkatkan Voltage Stability Index**
Yoakim Simamora, Erita Astrid, Michael Fritz Immanuel, Bakti Dwi Waluyo, Muhammad Aulia Rahman Sembiring, Mega Silfia Dewy, Agnes Irene Silitonga, Lisa Melvi Ginting 56 – 63
- Optimasi Prediksi Sisa Umur Penggunaan Baterai dengan Model PSO-LSTM**
Wilson Wiranata, Yohanes Calvinus 64 – 71
- Tinjauan Literatur: Deteksi Anomali Berbasis Analisis Waktu pada CAN Bus Kendaraan Listrik**
Putu Ayu Citra Setiawan, Ida Ayu Dwi Giriantari, Ngurah Indra ER 72 – 84
- Rancang Bangun Sistem Throttle Brushless DC Motor pada Kursi Roda Elektrik**
Ferdinand Natanael, Bagus Made Arthaya, Faisal Wahab 85 – 94
- Deep Learning and Traditional Models for Wind Speed Forecasting in Saudi Arabia (Eng.)***
Ikhsan Hidayat, Mohammad Ali Abido 95 - 103

Comparative Analysis of Haar Cascade Classifier, Dlib, and Mediapipe for Face Recognition

Analisis Perbandingan Haar Cascade Classifier, Dlib, dan Mediapipe untuk Pengenalan Wajah

Elbert¹, Endah Setyaningsih², Lamto Widodo³

^{1,2} Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering Universitas Tarumanagara; email: ¹elbert.525210005@stu.untar.ac.id ²endahs@ft.untar.ac.id

³ Industrial Engineering Department, Faculty of Engineering Universitas Tarumanagara; email: ³lamtow@ft.untar.ac.id

[Received: 3 October 2024, Revised: 21 May 2025, Accepted: 26 May 2025]

Corresponding Author: Endah Setyaningsih

ABSTRACT — Technological developments are having considerable effects on a lot of industries, particularly in the security sector. One of the important technologies in security sector is face recognition. Face recognition is a technology that verify and identify individual identity using face. There are many processes that involved in face recognition technology such as face detection methods. Face detection is a process of searching for faces in images. Each face detection method has different way to searching the face in image. It can affect the performance of face recognition technology itself. In this study, an analysis comparison between different face detection methods for face recognition was carried out. Face detection methods that used in this study was haar cascade classifier, dlib, and mediapipe. Technology that used to identify faces was Convolutional Neural Network (CNN). CNN model was trained with different face detection methods. Then it was used to carry out a simulation in identifying faces. The result of the comparison was shown in the form of performance metrics. The performance metrics include confusion matrix, accuracy, precision, recall, and f1-score. Based on the simulation that has been carried out, CNN model with haar cascade classifier face detection method generated the highest accuracy value of 98%, precision value of 98.08%, recall value of 98%, and f1-score of 97.99%.

KEYWORDS — Face Recognition, Face Detection, Haar Cascade Classifier, Dlib, Mediapipe

INTISARI — Perkembangan teknologi mempunyai dampak yang besar terhadap banyak industri, terutama di sektor keamanan. Salah satu teknologi penting dalam bidang keamanan adalah pengenalan wajah. Pengenalan wajah adalah sebuah teknologi yang berfungsi untuk memverifikasi dan mengidentifikasi identitas individu menggunakan wajah. Terdapat banyak proses yang terlibat dalam teknologi pengenalan wajah salah satunya adalah pendeteksian wajah. Pendeteksian wajah merupakan proses pencarian wajah dalam sebuah gambar. Setiap metode untuk pendeteksian wajah memiliki cara yang berbeda-beda dalam mencari wajah pada gambar. Hal ini dapat mempengaruhi kinerja teknologi pengenalan wajah itu sendiri. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis perbandingan antara berbagai jenis metode deteksi wajah untuk pengenalan wajah. Metode deteksi wajah yang digunakan dalam penelitian ini adalah haar cascade classifier, dlib, dan mediapipe. Teknologi yang digunakan untuk mengidentifikasi wajah adalah Convolutional Neural Network (CNN). Model CNN dilatih dengan metode deteksi wajah yang berbeda kemudian digunakan untuk melakukan simulasi dengan tujuan berupa mengidentifikasi wajah pada gambar. Hasil perbandingan tersebut ditampilkan dalam bentuk metrik kinerja. Metrik kinerja mencakup matriks kebingungan dan beberapa nilai berupa akurasi, presisi, penarikan kembali dan skor f1. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, model CNN dengan metode deteksi wajah haar cascade classifier menghasilkan nilai akurasi tertinggi sebesar 98%, nilai presisi sebesar 98,08%, nilai penarikan kembali sebesar 98%, dan skor f1 sebesar 97,99%.

KATAKUNCI — Pengenalan Wajah, Pendeteksian Wajah, Haar Cascade Classifier, Dlib, Mediapipe

I. INTRODUCTION

Technology is developing quickly and widely as time goes by. Developments in technology are one of the things that drive people's lives to change. Technology advancements have led to the development of several industries, particularly in the security industry. Face recognition is an example of a technology that continues to develop in the security sector.

Face recognition is a method with facial recognition properties that is applied to existing systems or technology [1]. Face recognition identifies a person by using their facial features. This technology recognizes a person's face using artificial intelligence and image processing techniques. Face recognition is frequently used in security systems, such as for criminal identification and facility access. There are various processes that involved in face recognition. Face detection is one of the important processes in face recognition. Face detection is the process of searching for faces in the received image. There are several methods that can be used for face detection such as haar cascade classifier, dlib, and mediapipe. Every face detection technique uses a distinct way to determine the bounding box that contain face location. Bounding box is a technique that is able to mark faces on images in the form of images and frames [2]. The portion of the face that is used for recognition may not be the best if the bounding box is incorrect. For instance, it may be too big, too small, or it may not fit in the middle of the face. This could reduce the accuracy and have an impact on face recognition technology.

Different types of face detection methods affect the accuracy of face recognition technology. It is necessary to conduct a study on the comparison of face detection methods to find the most appropriate approach for face recognition. Comparison of face detection methods is quite important to provide overview and suggestion for such approaches [3].

In this study, a comparative analysis of face detection methods in face recognition is conducted. Face detection methods that used in this study are haar cascade classifier, dlib, and mediapipe. Convolutional neural network (CNN) model is used to identify faces. The parameter used for this comparison are performance metrics include confusion matrix, accuracy, precision, recall, and f1-score. This study aims to compare and identify the most accurate face detection method for face recognition by convolutional neural network from these 3 approaches.

II. METHODOLOGY

This study focused on comparing the 3 CNN model that has been trained using haar cascade classifier, dlib, and media pipe face detection methods. This study was started by preparing dataset. Dataset that was used are face image of several subject. After obtaining dataset, the next step is device preparation and creating the CNN model. Then followed by training the CNN model with each face detection methods. After that, simulation was carried out to identify face in image. After simulation is done, it provides performance metrics including confusion matrix, accuracy, precision, recall, and f1-score for the comparison. The study stages flow is shown in Figure 1 below.

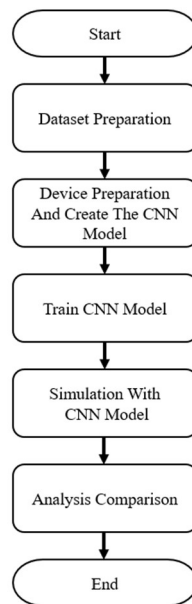


Figure 1. Study Stages Flow

A. DATASET PREPARATION

This phase involves the preparation of dataset that used in this research. The dataset that used are face images. The dataset used in this study contain 10000 images. This dataset includes facial images of 10 different subjects. Each subject has 1000 image consisting of 600 training images, 200 validation images, and 200 testing images for simulation.

B. DEVICE PREPARATION AND CREATE THE CNN MODEL

This phase involves the preparation of devices and creating the CNN model to support the implementation in comparative analysis of face detection method for face recognition. For device preparation, there are 2 categories of tools that are used. They are hardware and software. The hardware devices used in this study include a laptop with windows operating system. The hardware used in this study is a laptop with a windows operating system. The laptop that used in this study is asus X409FJ with Intel Core i7 8565U 1.8 GHz processor and 8.00 GB RAM. The software that used in this study are the visual studio code version 1.92.1. The desktop view of visual studio code is shown in Figure 2 below.

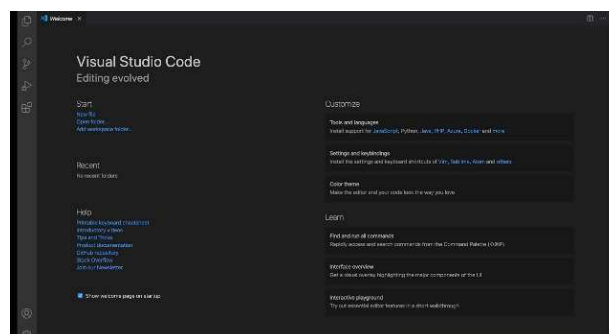


Figure 2. Visual Studio Code Desktop View

Convolutional Neural Network (CNN) is a development of multilayer perceptron which is designed to process two dimensional data [4]. CNN can be used to process and analyze image. CNN are generally used to categorize images. In order to process data, CNN requires an architecture.

In general, CNN architecture consists of convolution, pooling, flatten and fully connected layer. Convolution layer is a layer that used to extract features from the image [5]. Pooling layer is a layer for reducing the size of image data with the aims to increase invariance position of features [5]. Flatten layer is a layer that convert the 2 dimensional data into 1 dimensional vector [6]. Fully connected layer is a layer that usually used to process the converted data so that it can be classified [5].

CNN also using activation function for feature extraction and classification. Activation function is a function that determines the output of a neuron either is linear or nonlinear [7]. Activation function is used in the end of each layer inside the sneural network. Activation function that used in this CNN architecture are Rectified Linear Unit (ReLU) and Softmax. An example of CNN architecture is shown in Figure 3 below.

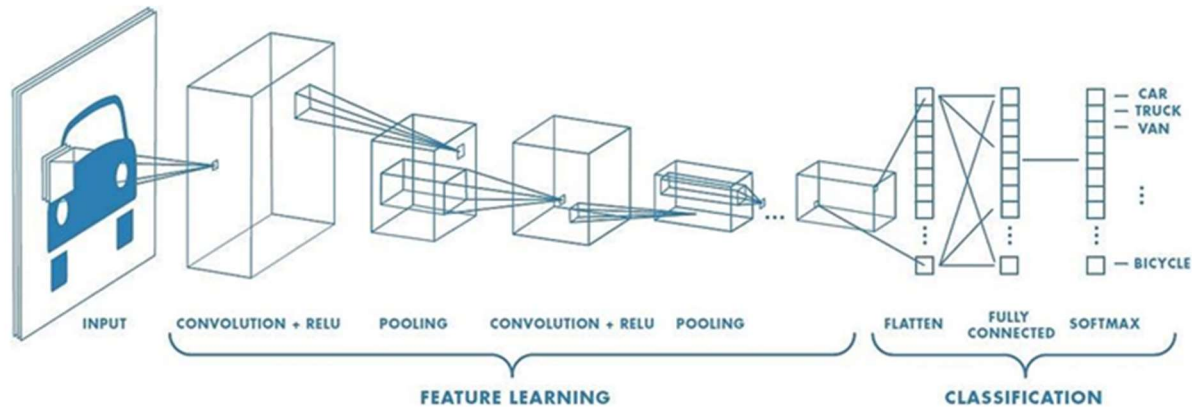


Figure 3. An Example of CNN Architecture [8]

ReLU is an activation function that converts linear values to nonlinear by activating and deactivating neurons [8]. ReLU change all the negative value to 0. If the value is positive, ReLU will maintain it. The equation for ReLU activation function is shown in (1) below.

$$f(x) = \max(0, x) \quad (1)$$

Based on equation (1), x is the input value [8]. ReLU usually used in convolutional layer for feature extraction. This function allows CNN to study more complex pattern. Softmax is an activation function that used to obtain output which are probability or classification values [8]. Softmax uses a set of values to determinine a probability for every class so that the sum of all probabilities equals to 1. Softmax activation function usually used in the final layer with fully connected layer. The equation for softmax activation function is shown in (2) below.

$$f_i(\vec{v}) = \frac{e^{x^i}}{\sum_{j=1}^n e^{x^j}} \quad (2)$$

Based on equation (2.2), $f_i(\vec{v})$ is the probability of each class. e is the euler value equal to 2,71828183. v is the vector value for all class. n is the length of v . i is the position of the class value [8]. The CNN architecture in this study used 64 and 128 filter because it can capture simple and complex features for faces without taking long time to train the model. The CNN architecture that used in this study is shown in Table I.

TABLE I
CNN MODEL ARCHITECTURE

Layer	Layer Configuration
Convolution	64 filter, 3×3 kernel, and ReLU
Convolution	64 filter, 3×3 kernel, and ReLU
Pooling	2×2 kernel
Convolution	128 filter, 3×3 kernel, and ReLU
Convolution	128 filter, 3×3 kernel, and ReLU
Pooling	2×2 kernel
Flatten	10368 neuron
Fully Connected	128 neuron and ReLU
Fully Connected	64 neuron and ReLU
Fully Connected	10 neuron and Softmax

C. TRAIN CNN MODEL

After the CNN model was created, it will be trained using dataset and face detection methods. Dataset that used in this study for training the CNN model include 10000 images with 10 subjects. The CNN model will be trained using 3 different face detection methods, namely haar cascade classifier, dlib, and mediapipe.

Haar cascade classifier is a machine learning algorithm for object detection. Haar cascade classifier uses a filter called haar features [9] [10]. Haar features has a similar concept to the convolutional kernel [9]. It extracts features from images for object detection. There are several features that are extracted with this filter such as edge, line, and four rectangle features that are shown in Figure 4.

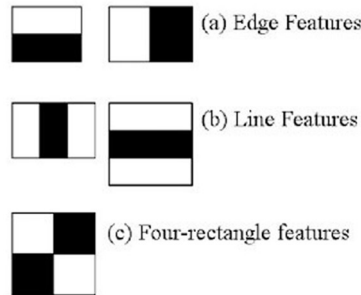


Figure 4. Features that Extracted with Haar Feature [9]

This filter will check one section at a time. For each section, the sum of the pixel intensities for the white and black section will be obtained. Then the difference between the sum of the 2 sections will be calculated. The difference value is the extracted feature value. Then there will be multilevel classification to determine the section that has the part of object or not. Workflow of the multilevel classification is shown in Figure 5 below.

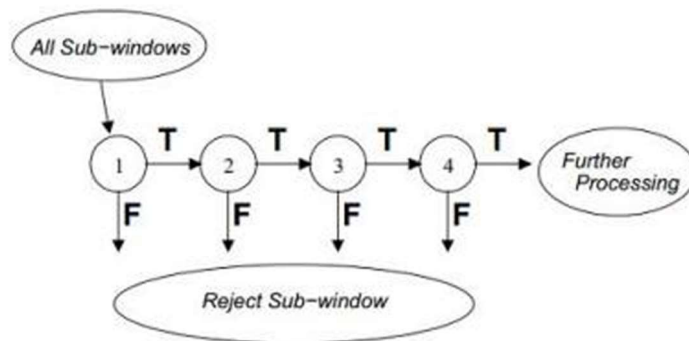


Figure 5. Workflow of Multilevel Classification [11]

In the initial level of classification, one characteristic will be used to classify each section. For example, when a section fulfills the criteria for haar features it is classified as True (T) else False (F). As the level of classification rise, more specific requirements are needed for categorization. Haar cascade classifier can be used to detect various type of object including human faces.

Dlib is an open source library that offers a C++ development environment [12]. Dlib can be used for detect face in image. Dlib using Histogram of Oriented Gradients (HOG) with Support Vector Machine (SVM) algorithm for face detection [12]. HOG is used for extract features from images. Then SVM will determine parts that contain face and non-face.

HOG extract features on image by converting image in color format Red, Green, and Blue (RGB) into grayscale then calculate the gradient value of each pixel in the image. Each image has unique characteristic. This can be seen in the gradient distribution that is produced by splitting the image into tiny sections know as HOG cell [12]. Each HOG cell contain histogram of a gradient that represent an object [12]. HOG will produce a vector array from pixel that has a histogram. Image transformation using HOG is shown in Figure 6 below.

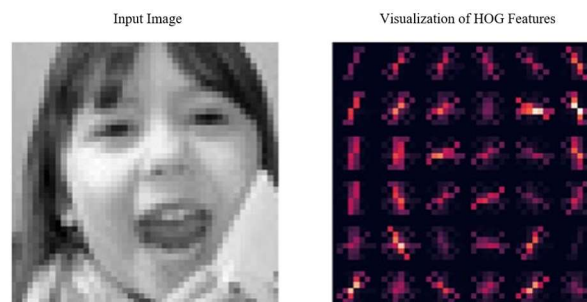


Figure 6. Image Transformation using HOG [13]

The vector array from HOG will be used for SVM for classify part that has face and not. The vector array will be inputted into SVM. SVM will use hyperplane for classify the input data [14]. It will separate the value with face part and without it.

Mediapipe is an open source machine learning framework that can used on various programming languages and platform [15]. This framework simplifies the process of implementing complex machine learning models. Mediapipe uses blazeface algorithm to detect human face in image. Blazeface is an algorithm that used to identify the center of face with concentrating on mouth center, eye center, ear lobe, and tip of the nose [15]. Blazeface can be used for various task related to face classification, segmentation, facial features, and expressions. Blazeface uses 468 face landmark for various task related to face including detection [15] [16]. Face landmark that detected with blazeface is shown in Figure 7.

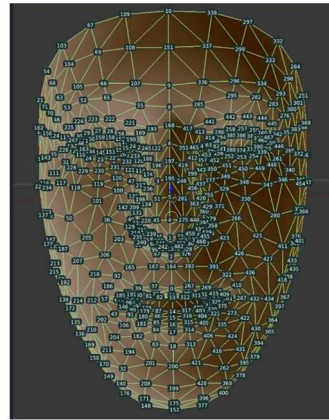


Figure 7. 468 Face Landmark Point with Blazeface Mediapipe [15]

D. SIMULATION WITH CNN MODEL

When the CNN model training was done, it is used for face identification simulation. Dataset that are used for this simulation are 2000 images consisting of 10 subjects. Each model with different face detection method will perform the simulation. The result of simulation is shown in the form of performance metrics. Block diagram for this simulation is shown in Figure 8.



Figure 8. Block Diagram for Simulation

E. ANALYSIS COMPARISON

Analysis comparison is carried out after each CNN model has finished identifying the given data. The performance metric produced by each model are used to compare and identify the most accurate face detection method for face recognition. Performance metrics include several things, namely the confusion matrix, accuracy, precision, recall, and f1-score. Confusion matrix is a table that states the quantity of data from correct and incorrect test [17]. There are four terms as a representation of the classification results in confusion matrix. The four terms are True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), and False Negative (FN) that can be viewed in Figure 9.

		TRUE VALUES	
		TRUE	FALSE
PREDICTION	TRUE	TP <i>Correct Result</i>	FP <i>Unexpected Result</i>
	FALSE	FN <i>Missing Result</i>	TN <i>Correct absence of result</i>

Figure 9. True Positive, True Negative, False Positive, and False Negative in Confusion Matrix [18]

True Positive is a positive value that is detected correctly. True Negative (TN) is the number of negative data that is detected correctly. False Positive (FP) is negative data but detected positively and False Negative (FN) is negative data detected as negative data [18]. These 4 values also used to generated accuracy, precision, recall, and f1-score. Accuracy is the ratio of correctly predicted observations to all observations [19]. Precision is the ratio of correctly predicted positive observations to the all positive observations [19]. Recall is the ratio of correctly predicted positive observations to all observations in actual class [19]. F1-score is the average value of precision and recall [19]. The performance metrics can be generated by using formula that was shown in Table II.

TABLE II
ACCURACY, PRECISION, RECALL, AND F1-SCORE FORMULA [20]

Metrics	Formula
Accuracy	$\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$
Precision	$\frac{TP}{TP + FN}$
Recall	$\frac{TP}{TP + FP}$
F1-Score	$2 \times \frac{Recall \times Precision}{Recall + Precision}$

III. RESULT AND DISCUSSION

The results of simulation are discussed in this section. The simulation is carried out with 3 CNN model with different face detection method. The results of simulation are shown in the form of performance metrics including confusion matrix, accuracy, precision, recall, and f1-score. Confusion matrix is a method that is usually used to calculate accuracy. The confusion matrix also displays the number of correctly and incorrectly identified face in image for each subject. The confusion matrix for each model is shown in Figure 10.

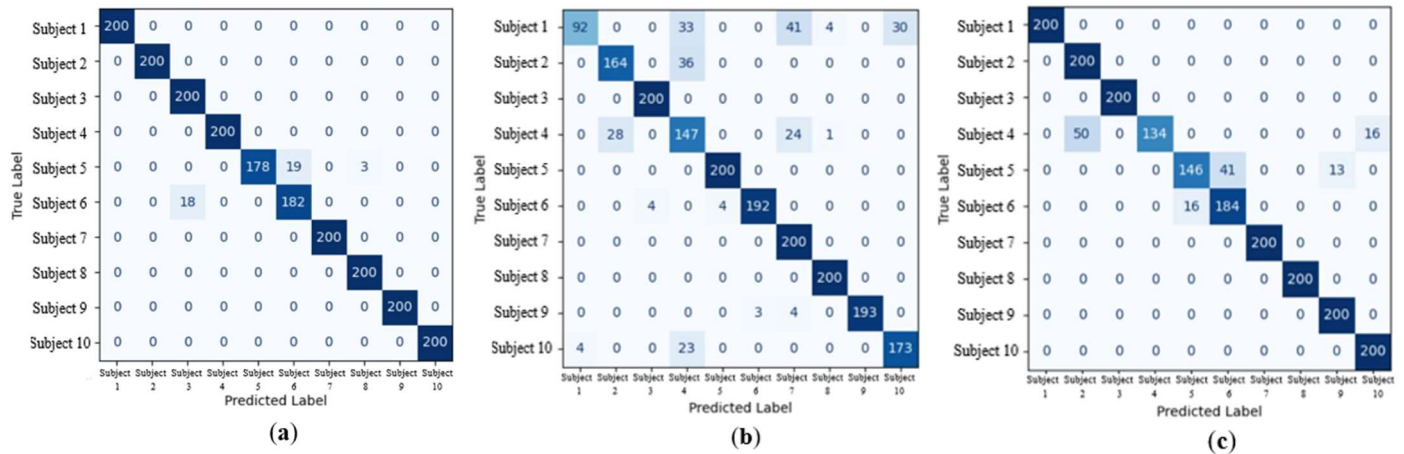


Figure 10. (a) Confusion Matrix CNN Model Using Haar Cascade Classifier, (b) Confusion Matrix CNN Model Using Dlib, (c) Confusion Matrix CNN Model Using Mediapipe

The accuracy, precision, recall, and F1-score were generated based on the performance of each CNN model. There are various value that was obtained with haar cascade classifier, dlib, and mediapipe face detection method. The accuracy, precision, recall, and f1-score value that was obtained using different face detection method is shown in Table III, Table IV, Table V, and Table VI respectively.

TABLE III
ACCURACY VALUE WITH HAAR CASCADE CLASSIFIER, DLIB, AND MEDIAPIPE FACE DETECTION METHOD

Face Detection Method	Accuracy Value
Haar Cascade Classifier	98%
Dlib	88.05%
Mediapipe	93.19%

TABLE IV
PRECISION VALUE WITH HAAR CASCADE CLASSIFIER, DLIB, AND MEDIAPIPE FACE DETECTION METHOD

Face Detection Method	Precision Value
Haar Cascade Classifier	98.08%
Dlib	89.44%
Mediapipe	93.83%

TABLE V
RECALL VALUE WITH HAAR CASCADE CLASSIFIER, DLIB, AND MEDIAPIPE FACE DETECTION METHOD

Face Detection Method	Recall Value
Haar Cascade Classifier	98%
Dlib	88.05%
Mediapipe	93.2%

TABLE VI
F1-SCORE VALUE WITH HAAR CASCADE CLASSIFIER, DLIB, AND MEDIAPIPE FACE DETECTION METHOD

Face Detection Method	F1-Score Value
Haar Cascade Classifier	97.99%
Dlib	87.61%
Mediapipe	92.93%

IV. CONCLUSION

Based on the results of the simulation that has been carried out, it can be concluded that face recognition technology is influenced by the face detection method that being used. The CNN model using haar cascade classifier face detection method has the highest accuracy value of 98%, precision value of 98.08%, recall value of 98%, and f1-score of 97.99%. Haar cascade classifier has the highest value possibly because it tends to produce more consistent bounding boxes that dlib and mediapipe, which tend to focus on facial landmarks. Haar cascade classifier can be developed through real-time application and using databases for large amounts of subject data.

CONFLICT OF INTEREST

The authors state that no potential conflict of interest exists related to this article.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Tarumanagara for the support given.

REFERENCES

- [1] R. N. Pamungkas, D. Wahiddin, and T. Al Mudzakir, "Sistem Presensi Pegawai Menggunakan Face Recognition dengan Algoritma Local Binary Pattern Histogram (LBPH)," *Scientific Student Journal for Information, Technology and Science*, vol. IV, no. 1, pp. 123-128, 2023, [Online]. Available: <https://e-jurnal.lppmunsera.org/>
- [2] H. Riski and D. W. Utomo, "Algoritma Principal Component Analysis (PCA) dan Metode Bounding Box pada Pengenalan Citra Wajah" *Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT*, vol. 9, no. 1, pp. 72-77, 2024, doi: 10.30591/jpit.v9i1.6165.
- [3] Lia Farokhah, "Perbandingan Metode Deteksi Wajah Menggunakan OpenCV Haar Cascade, OpenCV Single Shot Multibox Detector (SSD) dan Dlib CNN," *Jurnal Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi*, vol. 5, no. 3, pp. 609-614, 2021, doi: 10.29207/resti.v5i3.3125.
- [4] Verdy and Ery Hartati, "Klasifikasi Penyakit Mata Menggunakan Convolutional Neural Network Model Resnet-50," *Jurnal Rekayasa Sistem Informasi dan Teknologi*, vol. 1, no. 3, pp. 199-206, 2024, doi: 10.59407/jrsit.v1i3.529.
- [5] A. S. Riyadi, I. P. Wardhani, and S. Widayati, "KLASIFIKASI CITRA ANJING DAN KUCING MENGGUNAKAN METODE CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK (CNN)," in *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Komunikasi STI&K*, 2021, vol. 5, no. 1, pp. 307-311. [Online]. Available: <https://ejournal.jak-stik.ac.id/files/journals/2/articles/sentik2021/2857/submission/proof/2857-13-1919-1-10-20210902.pdf>
- [6] A. Firmansyah, A. F. Itsnan, A. Apip, R. T. Mulliya, and P. Rosyani, "SISTEM ABSENSI MAHASISWA MENGGUNAKAN FACE RECOGNITION DENGAN ALGORITMA CNN," *Jurnal Artificial Intelligent dan Sistem Penunjang Keputusan*, vol. 1, no. 4, pp. 250-258, 2023.
- [7] N. A. Purwitasari and M. Soleh, "IMPLEMENTASI ALGORITMA ARTIFICIAL NEURAL NETWORK DALAM PEMBUATAN CHATBOT MENGGUNAKAN PENDEKATAN NATURAL LANGUAGE PROCESSING," *Jurnal IPTEK*, vol. 6, no. 1, pp. 14-21, 2022, doi: 10.31543/jii.v6i1.192.
- [8] K. R. Wardani and L. Leonardi, "KLASIFIKASI PENYAKIT PADA DAUN ANGGUR MENGGUNAKAN METODE CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK," *Jurnal Tekno Insentif*, vol. 17, no. 2, pp. 112-126, 2023, doi: 10.36787/jti.v17i2.1130.
- [9] S. Yulina, "PENERAPAN HAAR CASCADE CLASSIFIER DALAM MENDETEKSI WAJAH DAN TRANSFORMASI CITRA GRAYSCALE MENGGUNAKAN OPENCV," *Jurnal Komputer Terapan*, vol. 7, no. 1, pp. 100-109, 2021, doi: 10.35143/jkt.v7i1.3411.
- [10] A. R. Doni Karseno, Yuhandri, "PENERAPAN ALGORITMA HAAR CASCADE CLASIFIER DAN COMPUTER NEURAL NETWORK SEBAGAI PRESENSI KARYAWAN," *KomtekInfo*, vol. 11, no. 4, pp. 398-408, 2025, doi: 10.35134/komtekinfo.v12i1.565.
- [11] C. A. Pauzi, A. B. Yahya, F. T. Wildan, and A. Hidayatulloh, "PENERAPAN HAAR CASCADE CLASSIFIER DALAM PENGENALAN POLA BENTUK WAJAH MENGGUNAKAN OPENCV," *Jurnal AI dan SPK : Jurnal artificial Intelligent dan Sistem Penunjang Keputusan*, vol. 2, no. 1, pp. 7-15, 2024.
- [12] R. P. H. Sejati and R. Mardhiyyah, "DETEKSI WAJAH BERBASIS FACIAL LANDMARK MENGGUNAKAN OPENCV DAN DLIB," *Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 5, no. 2, pp. 144-148, 2021, doi: 10.36294/jurti.v5i2.2220.
- [13] M. V. Overbeek, "HISTOGRAM OF ORIENTED GRADIENT UNTUK DETEKSI EKSPRESI WAJAH MANUSIA," *High Education of Organization Archive Quality: Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 10, no. 2, pp. 81-86, 2018, doi: 10.52972/hoaq.vol10no2.p81-86.
- [14] K. A. Putri, F. Utaminigrum, and R. Maulana, "DETEKSI DINI TANGGA TURUN MENGGUNAKAN METODE HOG (HISTOGRAM OF ORIENTED GRADIENTS) DAN SVM (SUPPORT VECTOR MACHINE) BERBASIS RASPBERRY PI," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 2, pp. 717-723, 2021.
- [15] S. Sugeng and T. N. Nizar, "DETEKSI AKTIVITAS MATA, MULUT DAN KEMIRINGAN KEPALA SEBAGAI FITUR UNTUK DETEKSI KANTUK PADA PENGENDARA MOBIL," *Komputika : Jurnal Sistem Komputer*, vol. 12, no. 1, pp. 83-91, 2023, doi: 10.34010/komputika.v12i1.9688.
- [16] F. Badri, S. Umie, R. Sari, S. Anuar, and B. Hamzah, "ANALYSIS OF DRIVER DROWSINESS DETECTION SYSTEM BASED ON LANDMARKS AND MEDIAPIPE," *Inform : Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi Informasi dan Komunikasi*, vol. 10, no. 1, pp. 21-28, 2025.
- [17] D. Normawati and S. A. Prayogi, "IMPLEMENTASI NAIVE BAYES CLASSIFIER DAN CONFUSION MATRIX PADA ANALISIS SENTIMEN BERBASIS TEKS PADA TWITTER," *Jurnal Sains Komputer & Informatika (J-SAKTI)*, vol. 5, no. 2, pp. 697-711, 2021.
- [18] L. Mutawalli, M. T. A. Zaen, and W. Bagye, "KLASIFIKASI TEKS SOSIAL MEDIA TWITTER MENGGUNAKAN SUPPORT VECTOR MACHINE (STUDI KASUS PENUSUKAN WIRANTO)," *Jurnal Informatika dan Rekayasa Elektronik*, vol. 2, no. 2, p. 43, 2019, doi: 10.36595/jire.v2i2.117.



-
- [19] S. Rao, P. Poojary, J. Somaiya, and P. Mahajan, "A COMPARATIVE STUDY BETWEEN VARIOUS PREPROCESSING TECHNIQUES," *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 431-438, 2020.
- [20] D. Atmajaya, A. Febrianti, and H. Darwis, "METODE SVM DAN NAIVE BAYES UNTUK ANALISIS SENTIMEN CHATGPT DI TWITTER," *The Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 12, no. 4, pp. 2173-2181, 2023, doi: 10.33022/ijcs.v12i4.3341.

Sistem PID untuk Pengaturan Aliran Air pada Dua Tangki Penampungan

The PID System for Water Flow Control in Two Storage Tanks

Kartika¹, M. Fathan Naqi¹, Misbahul Jannah¹, Misriana²

¹ Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, Indonesia.

² Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe Indonesia. email: kartika@unimal.ac.id

[Dikirimkan: 28 November 2024, Direvisi: 20 Mei 2025, Diterima: 26 Mei 2025]

Corresponding Author: Kartika

INTISARI — Pengelolaan distribusi air yang stabil dan efisien merupakan tantangan utama dalam sistem penyimpanan air, terutama dalam menghadapi kebutuhan yang bervariasi dan dinamis di berbagai sektor. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali aliran air berbasis Proportional-Integral-Derivative (PID) guna menjaga kestabilan laju aliran serta level air dalam tangki penampungan secara otomatis dan presisi. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan sensor ultrasonik HC-SRF04 untuk memantau ketinggian air dengan akurasi pengukuran mencapai 99,77%, serta sensor aliran YF-S201 untuk mendeteksi laju aliran air dengan tingkat akurasi sangat tinggi, yakni 99,997%. Seluruh sensor diintegrasikan dan dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno sebagai pusat pemrosesan data dan pengendali sistem. Pengaturan kecepatan pompa air dilakukan melalui sinyal Pulse Width Modulation (PWM) yang dihasilkan berdasarkan algoritma PID, dengan setpoint laju aliran sebesar 4 liter per menit (LPM). Penentuan parameter optimal PID dilakukan menggunakan metode tuning Ziegler-Nichols, menghasilkan konstanta kendali $K_p = 12.96$, $T_i = 1.102$ detik, dan $T_d = 0.2755$ detik. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mencapai waktu naik (rise time) sebesar 0,296 detik, dengan overshoot awal sebesar 2,5% dan waktu pemantapan (settling time) selama 10 detik. Dengan performa ini, sistem diharapkan dapat berkontribusi pada peningkatan efisiensi serta mendukung otomatisasi pengelolaan air di berbagai aplikasi, termasuk industri, pertanian, dan rumah tangga, dengan respons yang cepat dan stabil dalam mempertahankan setpoint aliran.

ABSTRACT — The stable and efficient management of water distribution remains a critical challenge in water storage systems, especially in applications requiring precise flow control. This study aims to design and implement a water flow control system based on the Proportional-Integral-Derivative (PID) algorithm to maintain stable flow rates and water levels in a storage tank. The system employs an HC-SRF04 ultrasonic sensor to monitor water level with an accuracy of 99.77%, and a YF-S201 flow sensor to measure water flow rate with an exceptional accuracy of 99.997%. All components are integrated and controlled by an Arduino Uno microcontroller, the system's core processing unit. Flow rate regulation is achieved using Pulse Width Modulation (PWM) to control the water pump, driven by the PID algorithm with a target flow rate (setpoint) of 4 liters per minute (LPM). The optimal PID parameters are obtained using the Ziegler-Nichols tuning method, yielding the constants $K_p = 12.96$, $T_i = 1.102$ seconds, and $T_d = 0.2755$ seconds. Experimental results show that the system achieves a rise time of 0.296 seconds, an initial overshoot of 2.5%, and a settling time of 10 seconds. This system demonstrates strong potential to support water management efficiency and automation across industrial, agricultural, and household applications, offering fast and stable control responses to maintain flow rate setpoints under dynamic conditions.

KATA KUNCI — Sensor ultrasonik hc-srf04, Sensor yf-s201, Kontrol pid, Arduino uno, Laju aliran air, Level ketinggian air, Tangki penampungan air

I. PENDAHULUAN

Air sangat penting dalam kehidupan sehari-hari dan digunakan di berbagai sektor seperti industri, pertanian, dan rumah tangga. Pemantauan kecepatan aliran air diperlukan untuk menjaga efisiensi dan mencegah pemborosan. Penggunaan teknologi, seperti mikrokontroler Arduino Uno yang terintegrasi dengan sensor aliran air, memungkinkan akuisisi data kecepatan aliran air secara real time. Sistem akuisisi data ini sangat penting dalam industri untuk mengumpulkan informasi yang berguna dalam pengendalian proses, terutama untuk memantau parameter aliran air (fluida) [1], [2], [3], [4].

Penelitian ini membahas penggunaan sensor ultrasonik HC-SRF04 untuk mengukur ketinggian cairan dan sensor aliran YF-S201 untuk mengukur kecepatan aliran air dengan Arduino. Sistem ini memungkinkan pengaturan distribusi air secara akurat. Arduino Uno yang terhubung dengan sensor aliran YF-S201 memberikan data real-time tentang laju dan volume aliran air [5], [6]. Sensor HC-SRF04 digunakan untuk mengukur ketinggian cairan, mencegah kelebihan atau kekurangan pengisian air. Data dari kedua sensor dapat dianalisis untuk pengendalian manajemen air [7], [8].

Memastikan stabilitas dan efisiensi aliran air, kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative) dapat digunakan [9]. PID memungkinkan penyesuaian kecepatan aliran agar sesuai dengan setpoint, mengatasi perubahan beban [10]. Dengan PID, Arduino mengatur PWM pada pompa untuk menjaga laju aliran sesuai target, berdasarkan data dari sensor YF-S201, sehingga aliran lebih

stabil dan efisien, mengurangi pemborosan, serta meningkatkan kontrol distribusi air [11]. Integrasi sensor YF-S201, HC-SRF04, dan PID memberikan solusi pengelolaan air yang efisien dan mendukung keberlanjutan sumber daya air.

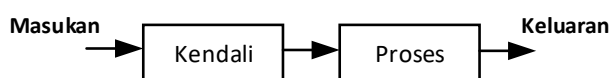
II. LANDASAN TEORI

A. AIR

Air termasuk dalam kategori zat cair karena memiliki sifat fisik yang memungkinkannya mengalir dari satu tempat ke tempat lain. Zat yang dapat mengalir dan dapat memberikan sedikit hambatan terhadap perubahan bentuk ketika ditekan, baik dalam bentuk air atau gas, disebut air [12]. Pembangunan Sektor Air (SDA) pada hakikatnya adalah upaya untuk memenuhi kebutuhan air; oleh karena itu, sangat penting untuk menggunakan air secara bijaksana dan menjaga kelestarian sumber daya air.

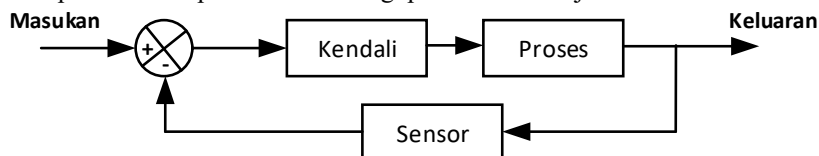
B. SISTEM KENDALI

Sistem kendali adalah sekumpulan komponen yang saling bekerja sama untuk mencapai tujuan tertentu dalam suatu proses [29]. Pada dasarnya, sistem kendali dibagi menjadi dua jenis utama, yaitu sistem kendali loop terbuka dan sistem kendali loop tertutup, yang masing-masing memiliki karakteristik dan cara kerja yang berbeda. Sistem kendali loop terbuka adalah sistem di mana keluaran dari sistem tidak mempengaruhi proses kendali yang berlangsung. Dalam sistem ini, sinyal masukan dan keluaran tidak dapat dibandingkan secara langsung, sehingga kinerja sistem sangat tergantung pada kalibrasi yang dilakukan sebelumnya. Kalibrasi ulang sering diperlukan, karena sistem ini tidak dapat mengantisipasi gangguan atau perubahan kondisi yang terjadi selama proses. Sebagai contoh, sistem kendali yang berfungsi berdasarkan pengaturan waktu, seperti yang terlihat pada Gambar 1 [13], adalah contoh dari sistem kendali loop terbuka. Sistem ini bekerja dengan cara yang sederhana, namun memerlukan pemeliharaan yang teliti agar tetap berfungsi dengan baik.



Gambar 1. Sistem Kendali Loop Terbuka

Sistem kendali loop tertutup merupakan sistem kendali umpan balik yang lebih canggih. Pada sistem ini, hubungan antara keluaran yang diinginkan dan masukan sistem dibandingkan secara langsung. Pengontrol menerima sinyal kesalahan, yang merupakan perbedaan antara masukan dan keluaran, dan berusaha untuk mengurangi kesalahan tersebut. Sinyal kesalahan ini bisa berupa keluaran itu sendiri atau fungsi dari keluaran, seperti turunan atau integralnya. Tujuan utama dari pengontrol pada sistem ini adalah untuk mengurangi kesalahan dan mengatur sistem sehingga mencapai kondisi yang diinginkan, di mana keluaran mempengaruhi kontrol yang diterapkan. Contoh penerapan sistem kendali loop tertutup ini dapat dilihat pada Gambar 2 [14], yang menggambarkan bagaimana umpan balik berperan dalam mengoptimalkan kinerja sistem.



Gambar 2. Sistem Kendali Loop Tertutup

Dengan demikian, meskipun kedua jenis sistem kendali ini memiliki peran yang penting dalam berbagai aplikasi, sistem kendali loop tertutup lebih unggul dalam hal kemampuannya untuk mengoreksi kesalahan dan menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi yang tidak terduga, sehingga lebih banyak digunakan dalam aplikasi yang memerlukan ketepatan dan keandalan yang tinggi.

C. LEVEL AIR

Pengukuran dan pengendalian level air dalam tangki sangat penting untuk berbagai aplikasi, mulai dari industri hingga rumah tangga. Level air dalam tangki adalah istilah yang mengacu pada ketinggian permukaan air di dalam sebuah wadah penampung, seperti tangki air. Pengukuran level air adalah untuk mengukur ketinggian air di tempat tertentu. Ini biasanya digunakan untuk mengetahui apakah ukuran level air di dalam tangki sudah tepat atau tidak, dan saat ini juga banyak digunakan untuk mengukur ketinggian air sungai untuk mendeteksi banjir [15].

Pengukuran level air dalam tangki dapat dilakukan dengan berbagai cara, mulai dari metode manual yang sederhana hingga penggunaan teknologi sensor yang lebih canggih. Salah satu cara yang paling sederhana adalah dengan menggunakan pengukur visual, seperti tongkat pengukur atau pelampung sederhana, yang memberikan indikasi visual langsung tentang ketinggian air dalam tangki. Meskipun metode ini tidak memerlukan teknologi canggih, akurasi pengukurannya sangat bergantung pada ketepatan pengamatan dan kondisi fisik alat yang digunakan. Pengukur visual ini sangat berguna untuk tangki dengan ukuran kecil atau dalam situasi yang membutuhkan pemantauan cepat.

Selain itu, ada metode sensor tekanan, yang bekerja dengan mengukur tekanan hidrostatik yang terjadi di dasar tangki. Tekanan ini meningkat seiring dengan bertambahnya ketinggian air di atas sensor, dan sensor tekanan akan mengonversi tekanan tersebut menjadi level air yang dapat dibaca. Metode ini lebih akurat dan sering digunakan pada tangki besar, terutama yang memiliki kedalaman signifikan. Keunggulannya adalah memberikan hasil yang lebih stabil dan dapat diandalkan, meskipun membutuhkan kalibrasi yang tepat.

Metode lainnya adalah dengan menggunakan sensor ultrasonik, yang mengukur level air tanpa kontak langsung dengan permukaan air. Sensor ini memancarkan gelombang ultrasonik dan mengukur waktu yang dibutuhkan gelombang tersebut untuk memantul kembali setelah mengenai permukaan air. Dengan demikian, sensor ultrasonik dapat memberikan pengukuran yang sangat akurat dan bebas dari kontak fisik, mengurangi risiko kerusakan atau kontaminasi pada sensor. Ini sangat ideal untuk tangki

yang sulit dijangkau atau yang berisi bahan yang bisa merusak sensor. Terakhir, sensor kapasitif bekerja dengan mendeteksi perubahan kapasitansi antara dua elektroda yang terendam dalam air. Ketika level air naik atau turun, kapasitansi antara elektroda tersebut juga berubah, dan sensor akan menggunakan perubahan tersebut untuk menentukan level air. Metode ini sangat sensitif terhadap perubahan kecil dalam level air dan bisa digunakan dalam berbagai kondisi, baik untuk tangki kecil maupun besar. Namun, kelemahan dari metode ini adalah ketergantungannya pada jenis air dan kemungkinan adanya material lain yang dapat mempengaruhi kapasitansi. Setiap metode memiliki keunggulan dan keterbatasannya masing-masing, dan pemilihan metode pengukuran level air harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik, ukuran tangki, serta lingkungan tempat pengukuran dilakukan.

D. ALIRAN AIR

Aliran air merujuk pada volume zat cair yang mengalir melalui pipa atau sungai, dan umumnya diukur dalam liter per menit (L/min). Laju aliran air ini menggambarkan volume zat cair yang melewati suatu penampang dalam satuan waktu tertentu, dan biasa disebut sebagai aliran air. Pengukuran aliran ini penting untuk memahami bagaimana air bergerak dalam sistem pipa atau sungai. Aliran air dapat diukur dalam berbagai satuan, termasuk liter per detik (L/s), meter kubik per detik (m^3/s), galon per menit (GPM), serta liter per menit (L/mnt).

Konversi aliran air adalah proses mengubah satu satuan pengukuran aliran ke satuan lainnya yang setara. Proses ini memungkinkan kita untuk lebih mudah memahami dan membandingkan data aliran air, serta merancang sistem yang lebih efisien. Misalnya, jika kita ingin mengonversi satuan liter per detik ke meter kubik per jam, kita dapat menggunakan rumus konversi yang ada. Konversi ini penting dalam berbagai aplikasi, seperti desain sistem irigasi, distribusi air, atau analisis aliran sungai.

Beberapa konversi aliran air yang sering digunakan antara lain: 1 liter per detik (L/s) setara dengan 3.6 meter kubik per jam (m^3/h), 1 meter kubik per detik (m^3/s) setara dengan 3.600 liter per detik (L/s), 1 galon per menit (GPM) setara dengan 3.785 liter per menit (L/min), dan 1 liter per menit (L/min) setara dengan 0.264 galon per menit (GPM). Dengan konversi-konversi ini, kita dapat lebih mudah melakukan analisis atau perencanaan yang melibatkan aliran air, serta memastikan desain sistem yang tepat guna.

E. ARDUINO UNO

Arduino Uno yaitu board berbasis mikrokontroler ATmega328 yang memiliki 14 pin I/O digital, 6 input analog, osilator kristal 16 MHz, konektor USB, dan tombol reset untuk daya. Untuk mendukung mikrokontroler, pin ini memiliki semua yang diperlukan. Anda dapat menyalakannya dengan adaptor AC-DC atau baterai, atau Anda dapat menggunakan kabel USB untuk menyambungkannya ke komputer [18].

F. SENSOR ULTRASONIK HC-SRF04

Sensor ultrasonik HC-SRF04 merupakan sensor yang menggunakan prinsip pemantulan gelombang suara untuk mengubah besaran fisis (suara) menjadi besaran listrik atau sebaliknya setelah dikonversi menjadi jarak. Ini memungkinkan untuk menghitung jarak benda dengan frekuensi tertentu sesuai dengan sumber osilator [19].

G. WATER FLOW SENSOR YF-S201

Water Flow Sensor merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur aliran zat cair pada aliran tertutup seperti pipa atau tabung. Dalam penelitian ini, sensor aliran air YF-S201 menggunakan rotor dan transducer hall-effect untuk mengukur aliran zat cair pada aliran tertutup seperti pipa atau tabung. Cara kerja sensor ini adalah dengan mendeteksi putaran rotor atau turbin ketika air melewatinya. Pulsa digital dihasilkan sebagai hasil dari putaran yang jumlah darinya sebanding dengan banyaknya fluida yang mengalir melaluinya [20].

H. SELENOID VALVE

Solenoid Valve juga disebut sebagai katup solenoid, memiliki tiga lubang diantaranya lubang masukan, lubang keluaran, dan lubang exhaust. Jenis kumparan ini digerakkan oleh listrik dan menggerakkan piston, yang dapat digerakkan oleh arus AC atau DC. Prinsip kerja dari solenoida valve yaitu katup listrik yang mempunyai koil sebagai penggerakannya di mana ketika koil mendapat supply tegangan maka koil tersebut akan berubah menjadi medan magnet sehingga menggerakkan piston pada bagian dalamnya ketika piston berpindah posisi maka lubang keluaran dari solenoida valve mempunyai tegangan mulai kerja di 12 Vdc [21].

I. POMPA AIR DC

Pompa air merupakan alat mekanis yang menggunakan energi kinetik untuk mengangkut fluida dari satu tempat ke tempat lain. Selain itu, pompa ini sangat praktis dan mudah digunakan karena tidak perlu mengisi air pada awalnya [22]. Salah satu keuntungan lainnya adalah bahwa pompa air membutuhkan sekitar 0,5 hingga 0,7 ampere saat bekerja dan sekitar 0,18 ampere saat tidak bekerja. prinsip kerja pompa yaitu membuat tekanan rendah pada bagian hisap, sehingga fluida akan ter hisap masuk dan mengeluarkannya pada sisi tekan atau sisi keluar dengan tekanan yang lebih tinggi, semua itu dilakukan dengan menggunakan elemen pompa penggerak yaitu impeller, plunger atau piston [23].

J. Proportional Integral Derivative (PID)

Kontroler proporsional integral derivatif, juga dikenal sebagai PID, digunakan untuk mengukur presisi sistem instrumentasi berdasarkan fitur adanya umpan balik pada sistem. Untuk mengontrol sistem dinamis, PID merupakan salah satu metode kontrol yang paling umum dan berhasil. PID adalah algoritma pengendalian yang menggabungkan tiga komponen pengendalian utama: proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D) [24].

K. ARDUINO IDE

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan perangkat lunak dengan menggunakan bahasa pemrograman C untuk membentuk perintah pada mikrokontroler. Software Arduino IDE memiliki pengaturan bernama Bootloader yang bertindak sebagai penghubung compiler Arduino dengan mikrokontroler[25].

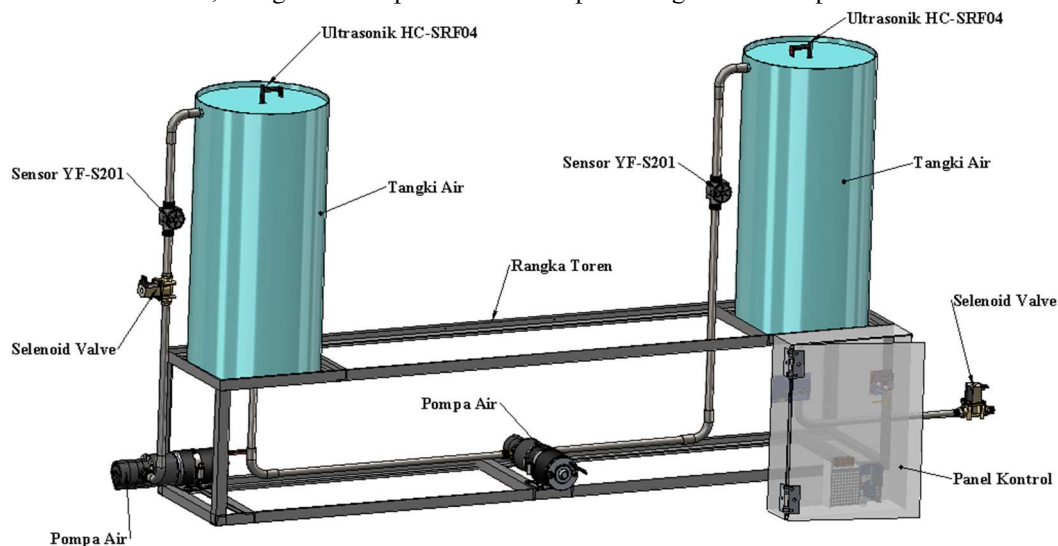
III. METODE PENELITIAN

A. ALAT DAN BAHAN

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan Tangki air, Arduino UNO R3, Module Driver Motor L298N, Sensor Ultrasonik HC-SRF04, Sensor aliran air YF-S201, Pompa air, Relay, Selenoid valve, Matlab, dan Arduino IDE yang merupakan perangkat keras dan perangkat lunak pada penelitian.

B. PERANCANGAN MEKANIK

Perancangan mekanik pada penelitian terdiri dari 3 perancangan yaitu perancangan panel kontrol, Perancangan tangki air, dan Perancangan toren tangki. Untuk panel sendiri dibangun dengan bahan akrilik dengan tebal 2mm dan memiliki ukuran 29x21x10 cm. Tangki air digunakan sebagai plant atau wadah penampungan air. Pada penelitian ini menggunakan 2 tangki menggunakan bahan aluminium dengan ukuran tangki air 1 tingginya 47 cm dengan diameter tangki 28 cm dan tangki air 2 tingginya 47 cm dengan diameter tangki 26 cm. Dan rangka toren pada penelitian ini digunakan untuk tempat peletakan tangki dan panel sistem kendali, dirancang menggunakan besi siku 40x40x4 mm dengan ukuran panjang 1 meter lebar 28 cm dan tinggi 50 cm dibuat menggunakan besi siku 30x30 mm, sebagaimana dapat dilihat untuk perancangan mekanik pada Gambar 3.



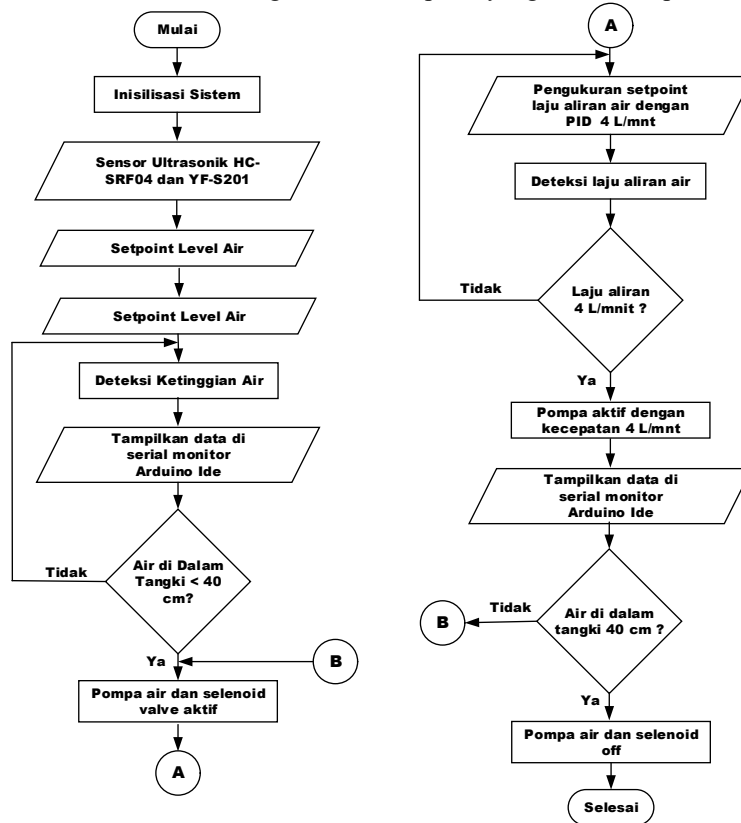
Gambar 3. Desain Perancangan Alat

C. PERANCANGAN SISTEM

Perancangan sistem pada penelitian ini dapat dibedakan menjadi dua, yaitu perancangan perangkat keras dengan pembuatan flowchart penelitian, perancangan alat sistem kendali aliran air, dan perancangan alur kerja sistem. Tujuan dari perancangan ini untuk memastikan bahwa sistem kendali aliran air dapat bekerja secara efektif dan sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan, Perancangan alur kerja sistem difokuskan pada bagaimana data dari sensor dibaca, diproses, dan digunakan untuk mengontrol pompa air secara real-time, memastikan aliran air stabil sesuai dengan setpoint yang ditentukan. Integrasi sistem ini juga mencakup implementasi kontrol PID, yang akan memungkinkan penyesuaian otomatis agar aliran air tetap konsisten meskipun terjadi gangguan atau variasi dalam sistem.

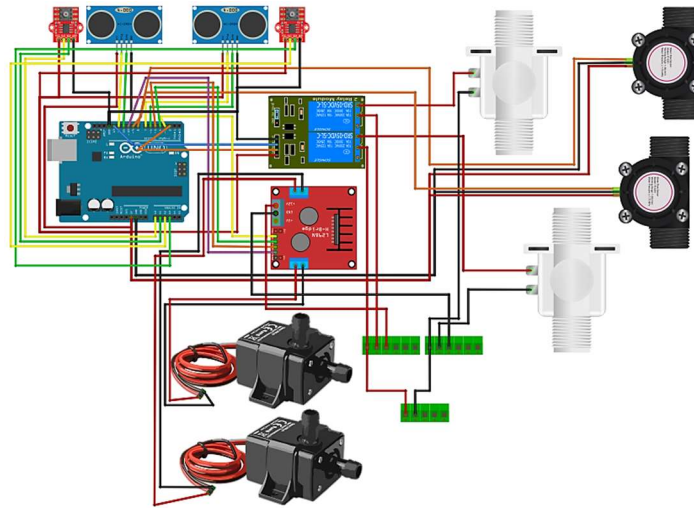
Tahapan penelitian yang dilakukan untuk merancang sistem kendali aliran air dimulai dengan pengumpulan data informasi yang mencakup berbagai aspek, seperti jenis gangguan yang dapat terjadi dalam sistem aliran air, pemilihan sensor yang tepat untuk mendeteksi perubahan atau gangguan, serta pemilihan mikrokontroler dan aktuator yang sesuai untuk mengendalikan sistem. Setelah pengumpulan data, tahap berikutnya adalah perancangan dan penyusunan tata letak alat yang mencakup semua komponen utama, dengan mempertimbangkan efisiensi dan kemudahan integrasi. Proses ini kemudian dilanjutkan dengan pengujian laboratorium untuk memastikan setiap komponen alat berfungsi sebagaimana mestinya. Setelah alat teruji dengan baik, dilakukan uji lapangan untuk menguji kinerja sistem dalam kondisi nyata dan mendalam. Selanjutnya, dilakukan pembuatan program yang akan mengendalikan sistem berdasarkan data dan tujuan yang telah dijelaskan sebelumnya, dan hasil dari proses tersebut. Gambar 4 menunjukkan diagram alir sistem kendali aliran air pada tangki penampungan air dengan PID digital. Sistem ini dimulai dengan inialisasi komponen, di mana Arduino mengaktifkan sensor ultrasonik HC-SRF04 untuk mendeteksi level air dalam tangki dan sensor aliran air YF-S201 untuk memantau laju aliran air. Setelah inialisasi, sistem menetapkan setpoint level air yang diinginkan, kemudian memulai pengukuran ketinggian air dalam tangki menggunakan sensor ultrasonik. Data ketinggian ini ditampilkan pada Serial Monitor Arduino untuk pemantauan lebih lanjut. Selanjutnya, sistem memeriksa apakah ketinggian air berada di bawah 40 cm. Jika air dalam tangki kurang dari 40 cm, pompa air dan selenoid valve akan aktif untuk mulai mengisi tangki. Pada saat yang sama, sistem menggunakan kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative) untuk mengatur laju aliran air agar mencapai setpoint 4 liter per menit (LPM). PID akan membaca data dari sensor aliran air YF-S201 dan menyesuaikan kecepatan pompa dengan

mengatur sinyal PWM yang diberikan ke driver pompa untuk mencapai dan mempertahankan laju aliran yang diinginkan. Sistem secara terus-menerus memantau apakah laju aliran air sudah mencapai 4 LPM. Jika belum, PID akan terus menyesuaikan PWM untuk mencapai setpoint. Setelah tercapai, pompa akan beroperasi secara stabil pada kecepatan 4 LPM, dan data laju aliran air akan ditampilkan di Serial Monitor Arduino. Pada titik ini, sistem juga terus memantau level air dalam tangki. Jika level air mencapai 40 cm, maka pompa air dan selenoid valve akan dimatikan, dan sistem selesai beroperasi. Jika level air masih di bawah 40 cm, pompa akan terus beroperasi sesuai kendali PID hingga tangki mencapai level yang diinginkan. Dengan demikian, sistem ini memungkinkan kontrol otomatis dan pemantauan level air serta laju aliran air dalam tangki secara efisien, menggunakan sensor, Arduino, dan algoritma PID untuk memastikan air mengalir sesuai setpoint yang telah ditetapkan.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

Gambar 5 menunjukkan perancangan alat ini menggunakan input dari sensor ultrasonik HC-SRF04 untuk mendeteksi level air dalam tangki dan sensor aliran air YF-S201 untuk memantau laju aliran air. Arduino digunakan sebagai mikrokontroler utama untuk memproses data dari sensor-sensor tersebut. Sistem ini menggunakan logika PID (Proportional-Integral-Derivative) untuk mengatur laju aliran air agar sesuai dengan setpoint yang telah ditentukan, misalnya 5 LPM (Liter Per Menit). Algoritma PID akan membaca nilai aktual dari sensor YF-S201 dan menghitung selisihnya dengan setpoint. Berdasarkan selisih ini, PID akan mengatur sinyal PWM (Pulse Width Modulation) ke driver L298N yang mengontrol kecepatan pompa air. Dengan menyesuaikan PWM, laju aliran air dapat dikendalikan secara presisi sesuai target. Apabila pembacaan sensor menunjukkan level air di bawah batas yang ditentukan, Arduino akan mengaktifkan pompa air melalui modul driver L298N yang juga terhubung ke power supply. Relay digunakan untuk mengontrol selenoid valve, yang akan membuka atau menutup aliran air sesuai kebutuhan. Selenoid valve akan aktif untuk mengatur aliran air menuju atau dari tangki sesuai kondisi level dan aliran air yang terpantau. Sistem ini dirancang untuk mengotomatiskan kontrol air dalam tangki secara terintegrasi menggunakan sensor-sensor yang telah dipasang pada jalur air, dengan penyesuaian laju aliran secara otomatis melalui pengendalian PID yang memastikan aliran tetap stabil dan sesuai kebutuhan.



Gambar 5. Desain Alat Sistem Pemaantauan dan Kendali

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. HASIL PERANCANGAN ALAT

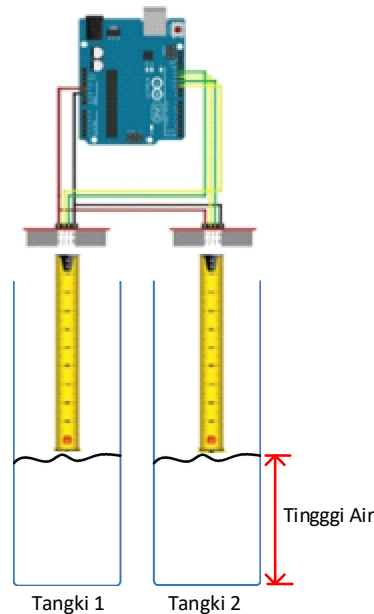
Hasil dari perancangan ini yaitu menciptakan sistem perancangan sistem kendali aliran air pada tangki penampungan air berbasis PID digital. Sistem ini terintegrasi dengan sensor-sensor untuk memantau parameter-parameter penting seperti tingkat air dan aliran, serta menggunakan aktuator seperti pompa dan valve untuk menjaga aliran air sesuai dengan setpoint yang diinginkan. Adapun rancangan alat telah terbuat pada Gambar 6 .



Gambar 6. Hasil Perancangan Alat

B. PENGUJIAN SENSOR ULTRASONIK HC-SRF04

Pengujian sensor ultrasonik HC-SRF04 bertujuan untuk mengetahui jarak air didalam tangki air telah sesuai. Kesesuaian pengujian ini dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor ultrasonik HC-SRF04 dengan alat ukur jarak (Penggaris). Pengujian Kalibrasi Sensor Ultrasonik merupakan pengujian untuk memastikan bahwa sensor ultrasonik HC-SRF04 dapat mendeteksi ketinggian air dalam tangki penampungan secara akurat. Pengujian dilakukan dengan menempatkan sensor pada posisi tetap dan mengatur berbagai tingkat ketinggian air sebagai titik acuan. Hasil pengukuran dari sensor kemudian dicatat dan dibandingkan dengan ketinggian sebenarnya untuk mengetahui tingkat akurasi sensor. Pengujian ini bertujuan untuk mengkalibrasi sensor agar dapat mengurangi kesalahan baca akibat noise atau variasi jarak. Dengan kalibrasi yang tepat, sensor ultrasonik diharapkan menghasilkan data ketinggian air yang stabil dan linier, sehingga mendukung kendali aliran air berbasis PID digital agar bekerja dengan respons optimal. Pada sensor ultrasonik HC-SRF04, output yang perlu dikalibrasi adalah nilai jarak yang diukur, yang dihitung berdasarkan durasi pulsa echo yang dihasilkan oleh sensor. Sensor ultrasonik efektif mendeteksi objek yang memiliki permukaan reflektif atau keras dalam jangkauan tertentu, dengan memanfaatkan pantulan gelombang suara untuk mengukur jarak atau mendeteksi keberadaan objek.



Gambar 7. Skema Pengujian Sensor Ultrasonik HC-SRF04

Gambar 7, memperlihatkan rangkaian pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 pada dua tangki penampungan air, di mana pengukuran dilakukan dengan alat ukur jarak. Sensor ultrasonik dihubungkan ke Arduino, yang berfungsi sebagai pengendali dan pemroses data. Setiap sensor diatur untuk mengukur jarak berdasarkan pantulan gelombang ultrasonik dari permukaan objek pada saat pengujian berlangsung, dan hasil pembacaan jarak tersebut dikonversi menjadi data hasil kalibrasi. Data ini nantinya digunakan sebagai parameter dalam sistem kendali aliran air berbasis PID.

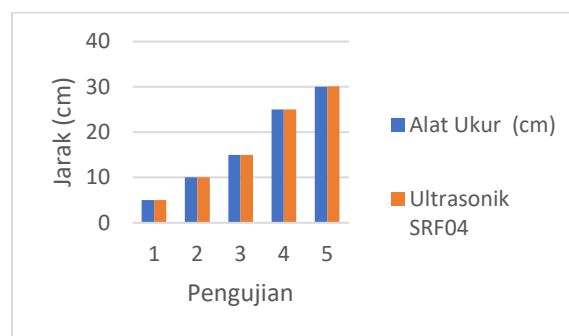
TABEL I
DATA KALIBRASI SENSOR ULTRASONIK HC-SRF04

No	Jarak Ukur (cm)	Durasi (μ s)
1	3	174
2	10	582
3	12	699
4	14	815
5	18	1044
6	20	1164
7	22	1281
8	24	1397
9	26	1518
10	30	1747

Tabel I dan II, menampilkan hasil pengukuran durasi pulsa echo pada sensor ultrasonik HC-SR04 untuk berbagai jarak ukur. Dari 10 kali pengujian, diperoleh durasi pulsa echo yang beragam sesuai dengan jarak objek dari sensor, mulai dari 174 μ s untuk jarak 3 cm hingga 1747 μ s untuk jarak 30 cm. Nilai ini menunjukkan hubungan linier antara jarak objek dan durasi pulsa yang dihasilkan oleh sensor, yang sesuai dengan karakteristik yang dijelaskan dalam datasheet sensor HC-SR04. Hasil pengukuran ini dapat digunakan sebagai referensi dalam kalibrasi sensor untuk memastikan akurasi pembacaan jarak di dalam aplikasi kontrol level air. Dari hasil percobaan kalibrasi sensor ultrasonik yang dilakukan dengan penggaris diperoleh rata-rata persentase error sebesar 0,23%. Sehingga, dapat dicari nilai akurasi pembacaan suhu sensor ultrasonik terhadap alat ukur jarak dengan persentase maksimal 100% dikurangi nilai error pengujian sensor ultrasonik. Jadi, nilai akurasi deteksi jarak yang diperoleh dari sensor ultrasonik sebesar 99,77% dan hasil pengukurannya ditunjukkan pada Gambar 8.

TABEL II
HASIL PENGUJIAN SENSOR ULTRASONIK HCSRFO4

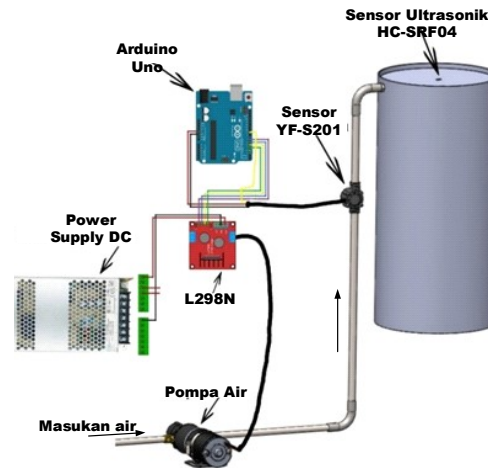
Pengujian Jarak (cm)	Alat Ukur (cm)	Ultrasonik SRF04	Selisih	Error (%)
5	5	4,91	0,09	1,8
	5	4,98	0,02	0,4
	5	4,91	0,09	1,8
	5	4,98	0,02	0,4
	5	4,98	0,02	0,4
Rata-Rata	5	5,11	0,04	0,96
10	10	10,05	0,05	0,5
	10	10,00	0,00	0,0
	10	10,14	0,14	1,4
	10	10,05	0,05	0,5
	10	10,00	0,00	0,0
Rata-Rata	10	10,04	0,04	0,48
15	15	15,11	0,11	0,73
	15	15,01	0,01	0,06
	15	15,00	0,00	0,00
	15	15,18	0,18	1,2
	15	15,20	0,20	1,33
Rata-Rata	15	15,10	0,10	0,66
25	25	25,16	0,16	0,64
	25	25,19	0,19	0,76
	25	25,02	0,02	0,08
	25	25,00	0,00	0,00
	25	25,00	0,00	0,00
Rata-Rata	25	25,07	0,07	0,29
30	30	30,00	0,00	0,00
	30	30,07	0,07	0,23
	30	30,00	0,00	0,00
	30	30,13	0,13	0,43
	30	30,16	0,16	0,53
Rata-Rata	30	30,07	0,07	0,23



Gambar 8. Grafik Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik HC-SRF04

C. KALIBRASI SENSOR ALIRAN AIR YF-S201

Pengujian Kalibrasi Sensor YF-S201 merupakan pengujian untuk memastikan bahwa sensor aliran air YF-S201 dapat mengukur laju aliran air dengan akurat dalam sistem kendali aliran air pada tangki penampungan berbasis PID digital. Pengujian dilakukan dengan menjalankan air melalui sensor pada berbagai tingkat laju aliran sebagai titik acuan, kemudian mencatat frekuensi pulsa yang dihasilkan oleh sensor. Nilai frekuensi ini dibandingkan dengan laju aliran sebenarnya untuk menentukan tingkat akurasi pengukuran sensor. Tujuan dari kalibrasi ini adalah untuk mengurangi kesalahan pengukuran yang mungkin terjadi akibat fluktuasi atau noise dalam pembacaan frekuensi pulsa. Dengan kalibrasi yang tepat, sensor YF-S201 diharapkan menghasilkan pembacaan aliran air yang stabil dan linier, yang sangat penting bagi pengendalian aliran berbasis PID digital agar sistem dapat menjaga laju aliran sesuai setpoint dengan respons yang optimal. Pada sensor YF-S201, output yang perlu dikalibrasi adalah nilai laju aliran air, yang dihitung berdasarkan frekuensi pulsa yang dihasilkan oleh sensor saat air mengalir melalui perangkat.



Gambar 9. Skema Pengujian Sensor Aliran Air YF-S201

Gambar 9, memperlihatkan rangkaian pengujian sensor aliran air YF-S201, di mana pengujian dilakukan dengan mengalirkan air menggunakan pompa air dengan spesifikasi pompa air menghasilkan aliran air sebesar 5 LPM. Sensor YF-S201 dihubungkan ke Arduino, yang berfungsi sebagai pengendali dan pemroses data. Sensor diatur untuk mengukur aliran air berdasarkan nilai frekuensi dari aliran air pada saat pengujian berlangsung, dan hasil pembacaan aliran air tersebut dikonversi menjadi data hasil kalibrasi. Data tabel III ini, nantinya digunakan sebagai parameter dalam sistem kendali aliran air berbasis PID.

TABEL III
DATA KALIBRASI SENSOR ALIRAN AIR YF-S201

No	Tegangan	Nilai Frekuensi
1	2	1
2	3	2
3	4	3
4	5	9
5	6	12
6	7	15
7	8	17
8	9	19
9	10	21
10	11	23

TABEL IV
HASIL PENGUJIAN SENSOR ALIRAN AIR YF-S201

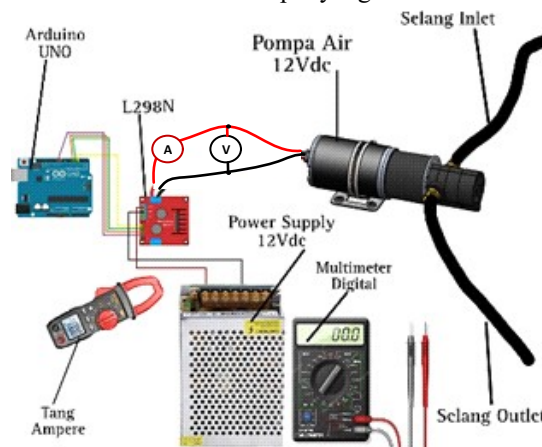
Tegangan (V)	PWM pada Pompa Air			YF-S201	Selisih Liter/menit(L/m)	Error %
	Tegangan (V)	Arus (A)	Liter/menit (L/m)	Liter/menit (L/m)		
4	4,02	1,34	1,82	1,79	0,15	0,037
	4,01	1,33	1,81	1,61	0,2	0,05
	4,03	1,34	1,82	1,74	0,08	0,02
	4,00	1,33	1,81	1,68	0,13	0,032
	4,01	1,33	1,81	1,68	0,13	0,032
6	6,00	2,00	2,72	2,63	0,09	0,015
	6,02	2,00	2,73	2,71	0,02	0,003
	6,02	2,00	2,73	2,68	0,05	0,008
	6,01	2,00	2,72	2,64	0,08	0,013
	6,01	2,00	2,72	2,70	0,02	0,003
8	8,01	2,67	3,64	3,56	0,08	0,01
	8,01	2,67	3,64	3,56	0,08	0,01
	8,00	2,66	3,63	3,34	0,29	0,036
	8,00	2,66	3,63	3,34	0,29	0,036
	8,01	2,67	3,64	3,42	0,22	0,027
10	10,00	3,33	4,54	4,05	0,49	0,049
	10,00	3,33	4,54	4,17	0,37	0,037
	10,01	3,33	4,55	4,41	0,14	0,014
	10,00	3,33	4,54	4,41	0,13	0,013
	10,00	3,33	4,54	4,25	0,29	0,029

11	11,04	3,68	5,00	5,00	0,,00	0,00
	11,01	3,67	5,00	5,00	0,00	0,00
	11,00	3,66	5,00	4,92	0,08	0,007
	11,00	3,66	5,00	4,87	0,13	0,011
	11,01	3,67	5,00	5,00	0,00	0,00
Rata-Rata	11,01	3,66	5,00	4,95	0,04	0,003

Tabel IV, menampilkan hasil pengukuran frekuensi pada sensor YF-S201 untuk berbagai tegangan yang diberikan ke pompa air. Dari 10 kali pengujian, diperoleh frekuensi yang beragam sesuai dengan tegangan input pada pompa air, mulai dari 1 Hz untuk tegangan 2 volt hingga 23 Hz untuk tegangan 11 volt. Nilai ini menunjukkan hubungan linier antara tegangan input pompa air dan frekuensi yang dihasilkan oleh sensor, yang sesuai dengan karakteristik yang dijelaskan dalam datasheet sensor YF-S201. Hasil pengukuran ini dapat digunakan sebagai referensi dalam kalibrasi sensor untuk memastikan akurasi pembacaan jarak di dalam aplikasi kontrol level air. Dari hasil percobaan kalibrasi sensor ultraonik yang dilakukan dengan pompa air dengan spesifikasi pompa menghasilkan aliran air sebesar 5 L/m diperoleh rata-rata persentase error sebesar 0,003%. Sehingga, dapat dicari nilai akurasi pembacaan aliran air terhadap tegangan input pompa air dengan persentase maksimal 100% dikurangi nilai error pengujian sensor YF-S201. Jadi, nilai akurasi deteksi jarak yang diperoleh dari sensor ultraonik sebesar 99,997%.

D. PENGUJIAN MODULE DRIVER L298N DENGAN NILAI PWM

Pengujian Modul Driver L298N dengan Variasi Nilai PWM merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui hubungan antara nilai PWM yang diberikan dan tegangan output yang dihasilkan oleh modul driver L298N. Pengujian dilakukan dengan mengatur berbagai nilai PWM sebagai input ke modul, kemudian mencatat tegangan output yang dihasilkan pada terminal motor. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa modul L298N mampu menghasilkan tegangan output yang bervariasi sesuai dengan nilai PWM yang diberikan, sehingga memungkinkan pengaturan kecepatan motor atau pompa dalam sistem kendali aliran air. Dengan mengetahui karakteristik tegangan output modul terhadap nilai PWM, pengendalian aliran air berbasis PID dapat dilakukan secara lebih akurat, karena modul akan memberikan output yang sesuai untuk mencapai laju aliran sesuai dengan setpoint.



Gambar 6. Skema Pengujian Module Driver L298N

Gambar 10, memperlihatkan rangkaian pengujian module driver L298N, di mana pengujian dilakukan dengan mengubah nilai PWM pada program pengujian. Modul driver L298N dihubungkan ke Arduino, yang berfungsi sebagai pengendali dan pemroses data. Modul diatur untuk mengukur tegangan dan arus output berdasarkan nilai PWM pada saat pengujian berlangsung. Data tabel V, ini nantinya digunakan sebagai parameter dalam sistem kendali aliran air berbasis PID.

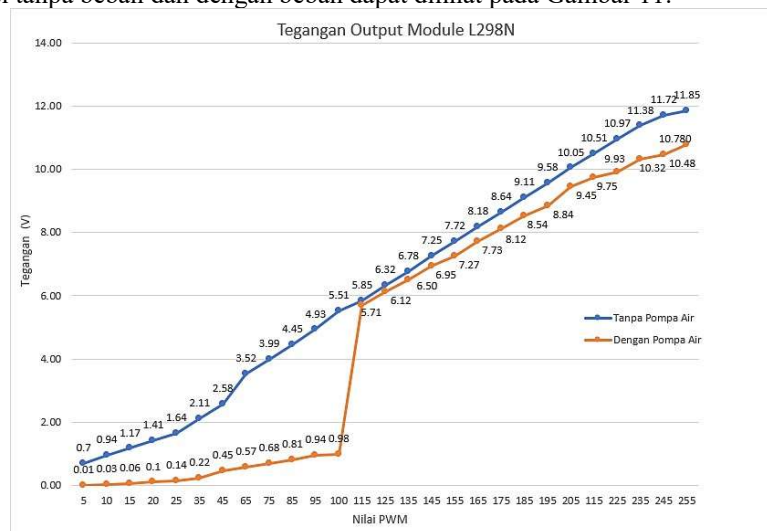
TABEL V

HASIL PENGUJIAN MODULE DRIVE L298N

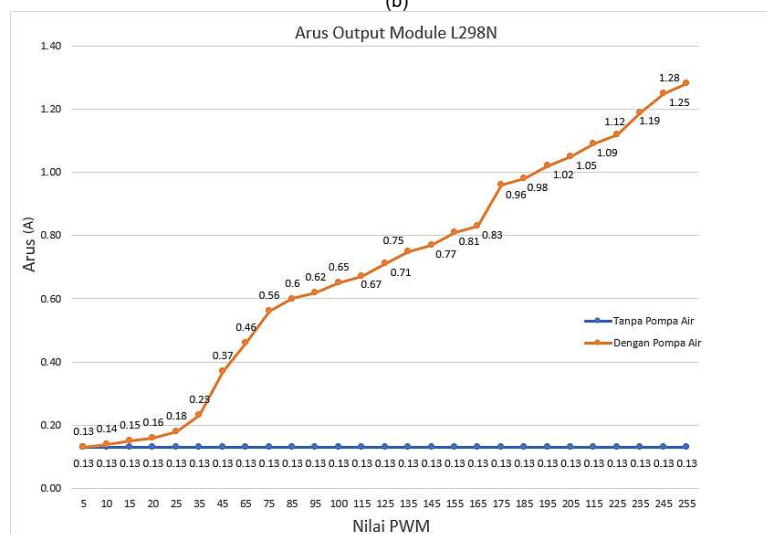
PWM	Tanpa Pompa Air		Dengan Pompa Air		Keterangan Pompa
	Tegangan (V)	Arus (A)	Tegangan (V)	Arus (A)	
5	0,70	0,13	0,01	0,13	Berdengung
10	0,94	0,13	0,03	0,14	Berdengung
15	1,17	0,13	0,06	0,15	Berdengung
20	1,41	0,13	0,1	0,16	Berdengung
25	1,64	0,13	0,14	0,18	Berdengung
35	2,11	0,13	0,22	0,23	Berdengung
45	2,58	0,13	0,45	0,37	Berdengung
65	3,52	0,13	0,57	0,46	Berdengung
75	3,99	0,13	0,68	0,56	Berdengung
85	4,45	0,13	0,81	0,60	Berdengung
95	4,93	0,13	0,94	0,62	Berdengung
100	5,51	0,13	0,98	0,65	Berdengung

115	5,85	0,13	5.71	0,67	Berputar Pelan
125	6,32	0,13	6.12	0,71	Berputar Pelan
135	6,78	0,13	6.50	0,75	Berputar Pelan
145	7,25	0,13	6.95	0,77	Berputar Pelan
155	7,72	0,13	7.27	0,80	Berputar Pelan
165	8,18	0,13	7.73	0,83	Berputar Pelan
175	8,64	0,13	8.12	0,96	Berputar Sedang
185	9,11	0,13	8.54	0,98	Berputar Sedang
195	9,58	0,13	8.84	1,02	Berputar Sedang
205	10,05	0,13	9.45	1,05	Berputar Kencang
115	10,51	0,13	9.75	1,09	Berputar Kencang
225	10,97	0,13	9.93	1,12	Berputar Kencang
235	11,38	0,13	10.32	1,19	Berputar Kencang
245	11,72	0,13	10.48	1,25	Berputar Kencang
255	11,85	0,13	10.78	1,28	Berputar Kencang

Pengujian modul driver motor L298N menunjukkan perbedaan tegangan dan arus pada kondisi tanpa beban dan saat dihubungkan dengan beban berupa pompa air. Dalam pengujian ini, variasi nilai PWM dari 5 hingga 255 diaplikasikan. Pada rentang PWM 5 hingga 100, terjadi penurunan tegangan yang signifikan, menyebabkan pompa air hanya berdengung tanpa berputar. Kondisi ini menunjukkan bahwa nilai PWM rendah tidak cukup untuk menggerakkan pompa secara optimal, bahkan dapat berisiko merusak komponen. Sebaliknya, pada rentang PWM 100 hingga 255, penurunan tegangan yang terukur hanya sekitar 1 volt atau kurang, yang lebih ideal untuk menjaga performa pompa air secara optimal. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai PWM yang lebih tinggi lebih baik dalam mengontrol pompa untuk pengisian dan penyaluran air pada tangki. Perbandingan tegangan dan arus output modul L298N antara kondisi tanpa beban dan dengan beban dapat dilihat pada Gambar 11.



(b)



(b)

Gambar 7. Grafik (a) Tegangan Output Module L298N, (b) Arus Output Module L298N

E. PENGUJIAN TUNNING PID

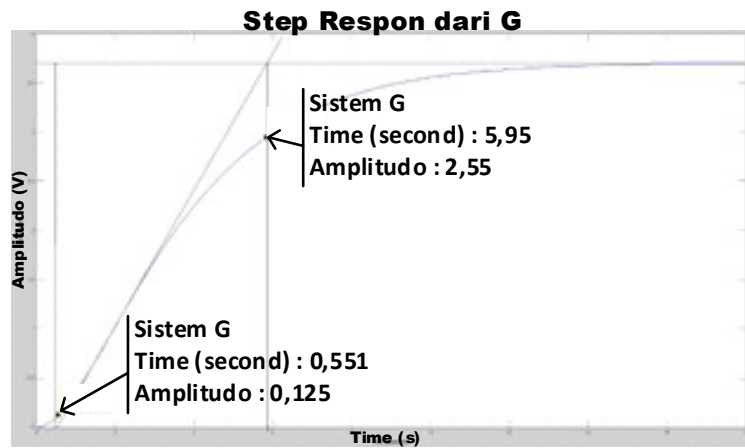
Pada penelitian ini tuning PID dilakukan dengan menguji input level air dan kecepatan aliran air terhadap output berupa waktu

pengisian air pada Tangki penampungan air yang nantinya diatur melalui pengaturan kecepatan pompa air pada module driver L298N. Pada pengujian awal yang telah dilakukan dengan menguji pengaruh kecepatan aliran air terhadap nilai pwm pompa air yang dihasilkan dari pengisian tangki penampungan air. Proses pengujian ini dilakukan dengan menyalakan pompa air untuk mengalirkan air pada tangki penampungan air dan melakukan dokumentasi kecepatan aliran air awal serta mencatat proses perubahan waktu yang terjadi. Berikut ini adalah Tabel VI hasil pengujian respon kecepatan aliran air terhadap nilai pwm untuk pompa air dengan durasinya.

TABEL VI
HASIL PENGUKURAN LAJU ALIRAN AIR SEBELUM MENGGUNAKAN PID

No	Nilai PWM	Kecepatan Aliran Air (Lpm)	Durasi (detikt)
1	255	3.40	1
2	255	3.80	2
3	255	7.00	3
4	255	8.40	4
5	255	11.80	5
6	255	4.00	6
7	255	4.00	7
8	255	9.20	8
9	255	7.00	9
10	255	4.00	10
11	255	4.00	11
12	255	4.20	12
13	255	8.40	13
14	255	11.80	14
15	255	4.00	15
16	255	4.00	16
17	255	4.20	17
18	255	8.40	18
19	255	11.80	19
20	255	4.00	20
21	255	4.00	21
22	255	9.20	22
23	255	7.00	23
24	255	4.00	24
25	255	4.20	25
26	255	8.40	26
27	255	11.80	27
28	255	4.00	28
29	255	4.00	29
30	255	9.20	30

Berdasarkan Tabel 6, hasil pengujian respon kecepatan aliran air terdapat nilai pwm pada pompa air digunakan untuk melakukan perhitungan PID, terlebih dahulu mengidentifikasi sistem yang akan dikendalikan dengan menentukan parameter-parameter yang diperlukan seperti waktu pengendalian, overshoot, dan steady state galat. Setelah itu, dapat menggunakan metode Zigler Nichols untuk menentukan nilai awal dari parameter PID. Data ini menunjukkan waktu (Time), kecepatan aliran air dan nilai pwm pada pompa air. Dari data menunjukkan perubahan kecepatan aliran air terhadap nilai pwm pompa air pada Tangki penampungan air, sehingga dapat menggunakan metode Zigler Nichols untuk menentukan parameter PID. Kemudian yang dikendalikan adalah nilai pwm pompa air terhadap kecepatan aliran air dan level air, sehingga untuk menggunakan metode Zigler Nichols untuk menentukan parameter PID terlebih dahulu. Pada metode Ziegler Nichols menggunakan tahap 1 atau ZN1 berupa kurva reaksi Untuk menemukan nilai L dan T, harus dilakukan uji sistem dengan melihat step respon hingga sistem mulai osilasi secara stabil. Metode ini berdasarkan terhadap reaksi sistem untaian terbuka, Plant sebagai untaian terbuka dikenakan sinyal fungsi tangga satuan dengan menunjukkan kurva berbentuk S seperti terlihat pada Gambar 12.



Gambar 8. Step Respon Nilai L dan T

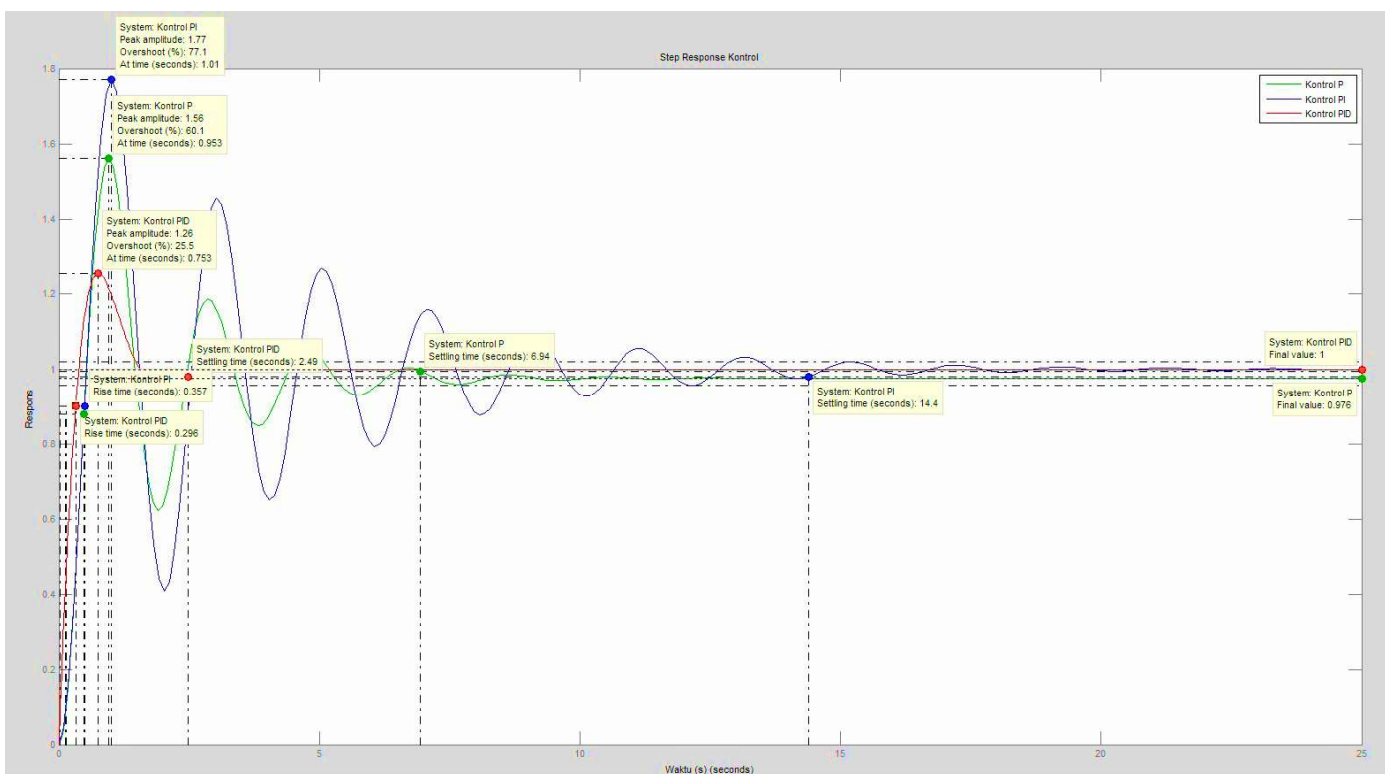
Dapat dilihat untuk nilai waktu mati (L) dan waktu tunda (T) yang dihasilkan dari respon aliran air menunjukkan pada nilai waktu mati (L) yaitu 0.551 sedangkan waktu tunda (T) berada pada 5,95. Pada dasarnya, asumsi tersebut didasarkan pada penggunaan metode ZN1 dalam penyetapan kontroler PID, yang dikenal sebagai metode Ziegler Nichols. Metode ini adalah pendekatan tahap 1 yang digunakan untuk menentukan parameter kontrol PID tanpa memerlukan model matematis berupa transfer function dari sistem yang dikontrol.

Saat sistem tidak menunjukkan osilasi yang jelas atau jika osilasi tidak dapat diamati dengan jelas, metode ini bisa sulit diterapkan. Dalam situasi seperti itu, beberapa tahapan diperlukan untuk memperoleh estimasi awal parameter kontrol. Salah satu asumsi yang mungkin dilakukan dengan melihat step respon berbentuk kurva S mempunyai dua konstanta, waktu mati (dead time) L dan waktu tunda T yaitu untuk nilai L dan nilai T, Berikut perhitungan parameter PID menggunakan metode Ziegler Nichols dengan lebih rinci.

Tuning parameter PID menggunakan metode Ziegler-Nichols adalah teknik yang digunakan untuk mendapatkan nilai optimal dari tiga parameter utama dalam kontrol PID, yaitu K_p (Proportional Gain), T_i (Integral Time), dan T_d (Derivative Time). Setiap parameter ini berperan dalam mengatur respons sistem. K_p (Proportional Gain) menentukan seberapa besar respons sistem terhadap kesalahan yang terjadi. Dalam metode Ziegler-Nichols, nilai K_p dihitung berdasarkan perbandingan antara T (periode osilasi) dan L (panjang waktu gelombang), yang menghasilkan rumus $K_p = T/L$. Dalam contoh ini, dengan nilai T sebesar 5,95 dan L sebesar 0,551, K_p dihitung menjadi 10,80.

T_i (Integral Time) berfungsi untuk mengurangi kesalahan jangka panjang dengan menambahkan komponen integral pada kontrol PID. T_i dihitung sebagai 50% dari T_u , di mana T_u adalah konstanta waktu yang setara dengan nilai T. Dalam perhitungan ini, T_i dihitung sebagai $L/0,3$, menghasilkan T_i sebesar 1,83. T_d (Derivative Time) membantu menghaluskan perubahan sistem dengan menambahkan komponen turunan pada kontrol PID. T_d dihitung sebagai 12,5% dari T_u , yang pada metode ini diwakili dengan 0,5 kali nilai L, menghasilkan T_d sebesar 0,2755. Hasil tuning PID dengan metode Ziegler-Nichols pada sistem ini menghasilkan nilai-nilai berikut. Untuk Proportional (P) Control, K_p dihitung sebagai T/L , yaitu 10,80. Untuk Proportional-Integral (PI) Control, K_p dihitung sebagai 0,9 kali T/L , menghasilkan 9,72. T_i dihitung sebagai $L/0,3$, menghasilkan nilai 1,83. Untuk PID Control, K_p dihitung sebagai 1,2 kali T/L , yang menghasilkan 12,96. T_i dihitung sebagai dua kali L, yaitu 1,102, dan T_d dihitung sebagai 0,5 kali L, menghasilkan 0,2755. Dengan hasil ini, tuning PID dapat digunakan untuk mengoptimalkan kontrol sistem, mengurangi kesalahan, dan meningkatkan respons sistem terhadap perubahan variabel input.

Setelah dilakukan tuning PID dengan metode Ziegler Nichols, maka didapatkan parameter $K_p = 12,96$, $T_i = 1,102$ detik, $T_d = 0,2755$ detik. Selanjutnya nilai PID yang didapat dari hasil tuning menggunakan metode Ziegler Nichols untuk melihat respon sistem melihat step respon kurva S yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 9. Data Hasil Step Respon PID

Dari gambar 13, menunjukkan perubahan step respons terhadap kendali PID kecepatan aliran air. Dari gambar juga didapatkan data berupa Rise Time sebesar 0.296 s, Overshoot sebesar 25,5 %, dan Settling Time 2,49 s. Terlihat pada nilai tersebut menunjukkan nilai turun perlahan dari titik nilai overshoot ini merupakan hasil dari nilai T_d 12.5% dari T_u yang berfungsi membantu menghaluskan perubahan respons sistem.

F. PENGUJIAN KESELURUHAN

Tujuan pengujian kinerja sistem kendali aliran air pada tangki penampungan air berbasis PID digital yaitu untuk melihat tingkat keberhasilan dalam penelitian serta untuk mengendalikan laju aliran air pada tangki penampungan air menggunakan PID, mengendalikan level air pada tangki penampungan air. Pengujian kinerja sistem dilakukan dengan mengatur setpoint level air dan laju aliran air. Pada kendali level air tangki, dilakukan setpoint 40 cm. Sedangkan laju aliran air pada tangki penampungan air digunakan setpoint 4,00 LPM. Parameter yang ditinjau dari percobaan yang dilakukan pada kendali laju aliran air menggunakan PID adalah delay time, rise time, peak time, maximum overshoot, galat steady state, dan settling time. Pengujian yang telah dilakukan ini terdiri dari persiapan bahan pengujian berupa hasil perancangan pada fungsional, lalu mempersiapkan hasil dari tuning PID yang didapatkan sebelumnya. Berikut ini adalah parameter gabungan dari Metode Ziegler Nichols.

TABEL VII

PARAMETER NILAI PID

Parameter		Zigler Nichols
P	K_p	10,80
PI	K_p	9,72
	T_i (s)	1,83
PID	K_p	12,96
	T_i (s)	1,102
	T_d (s)	0,2755

Tabel VII, menunjukkan hasil parameter yang digunakan dalam tuning PID yang dilakukan pada Tangki penampungan air. Hasil parameter ini akan dimasukkan ke dalam program pengujian keseluruhan yang telah dilakukan. Program ini berisikan parameter lengkap dari gabungan sebelumnya. Tentunya terdiri dari program pwm pompa air, Level air, Volume air, Tekanan air, dan lain-lainnya. Kemudian pada bagian implementasi kendali PID dengan setpoint laju aliran air telah dilakukan untuk konfigurasi yang diperlukan serta strategi tuning PID yang efektif untuk mencapai tujuan ini. Kendali dilakukan dengan memasukkan nilai tuning PID menggunakan Ziegler Nichols. Berikut ini adalah hasil pengujian yang dilakukan setelah menggunakan tuning PID dengan setpoint laju aliran air sebesar 4.00 Lpm dapat dilihat pada Table VIII berikut ini.

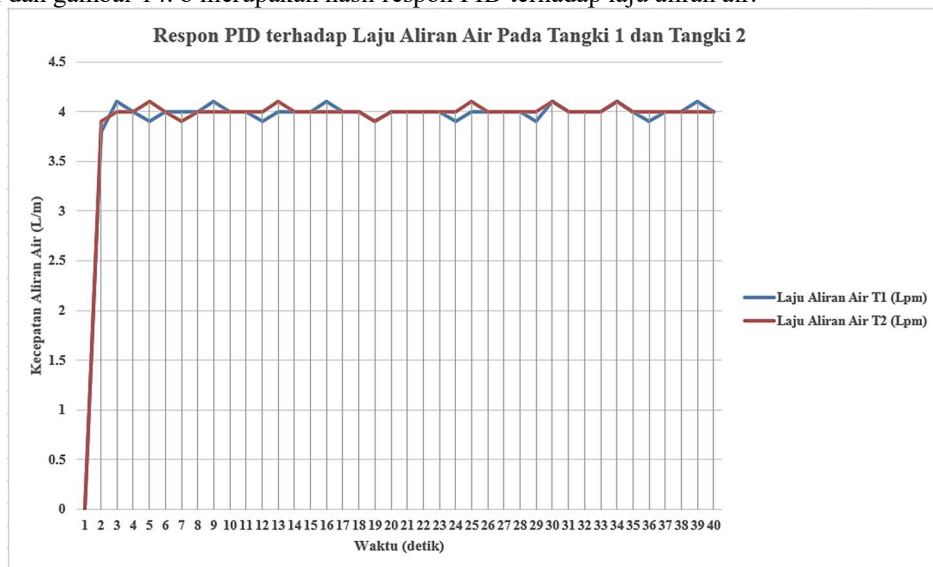
TABEL VIII

HASIL PENGUJIAN LAJU ALIRAN AIR MENGGUNAKAN PID DENGAN SETPOINT 4 L/M

No	Waktu (detik)	Nilai PWM		Laju Aliran Air (YF-S201)		Level Air (HC-SRF04)	
		Pompa 1	Pompa 2	T1 (Lpm)	T2 (Lpm)	T1 (cm)	T2 (cm)
1	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1	210	210	3.8	3.9	0.12	0.13
3	2	220	220	4.1	4.0	0.24	0.26
4	3	215	215	4.0	4.0	0.36	0.39
5	4	208	208	3.9	4.1	0.48	0.52
6	5	212	212	4.0	4.0	0.6	0.65
7	6	210	210	4.0	3.9	0.72	0.78
8	7	211	211	4.0	4.0	0.84	0.91
9	8	213	213	4.1	4.0	0.96	1.04
10	9	210	210	4.0	4.0	1.08	1.17
11	10	209	209	4.0	4.0	1.2	1.3
12	11	208	208	3.9	4.0	1.32	1.43
13	12	211	211	4.0	4.1	1.44	1.56
14	13	210	210	4.0	4.0	1.56	1.69
15	14	212	212	4.0	4.0	1.68	1.82
16	15	213	213	4.1	4.0	1.8	1.95
17	16	210	210	4.0	4.0	1.92	2.08
18	17	209	209	4.0	4.0	2.04	2.21
19	18	208	208	3.9	3.9	2.16	2.34
20	19	211	211	4.0	4.0	2.28	2.47
21	20	210	210	4.0	4.0	2.4	2.6
22	21	210	210	4.0	4.0	2.52	2.73
23	22	209	209	4.0	4.0	2.64	2.86
24	23	208	208	3.9	4.0	2.76	2.99
25	24	211	211	4.0	4.1	2.88	3.12
26	25	210	210	4.0	4.0	3.0	3.25
27	26	210	210	4.0	4.0	3.12	3.38
28	27	209	209	4.0	4.0	3.24	3.51
29	28	208	208	3.9	4.0	3.36	3.64
30	29	211	211	4.1	4.1	3.48	3.77
31	30	210	210	4.0	4.0	3.6	3.9
32	31	210	210	4.0	4.0	3.72	4.03
33	32	209	209	4.0	4.0	3.84	4.16
34	33	211	211	4.1	4.1	3.96	4.29
35	34	210	210	4.0	4.0	4.08	4.42
36	35	208	208	3.9	4.0	4.2	4.55
37	36	210	210	4.0	4.0	4.32	4.68
38	37	210	210	4.0	4.0	4.44	4.81
39	38	211	211	4.1	4.0	4.56	4.94
40	39	210	210	4.0	4.0	4.68	5.07

Dari tabel VIII, hasil pengujian sistem kontrol PID untuk menjaga laju aliran air pada setpoint 4 LPM, dapat dilihat bagaimana respons sistem dalam mencapai stabilitas. Pada awalnya, sistem menunjukkan overshoot, yaitu kondisi di mana laju aliran air melampaui setpoint. Overshoot terbesar terjadi sekitar detik ke 2, dengan laju aliran pada T1 mencapai sekitar 4.1 LPM atau sekitar 102.5% dari setpoint. Ini menunjukkan bahwa pada tahap awal, sistem merespons secara berlebihan terhadap sinyal kontrol sebelum akhirnya mulai menyesuaikan diri dengan target yang diinginkan. Setelah overshoot awal, laju aliran air mulai mendekati setpoint dalam waktu yang disebut rise time, yang dalam sistem ini terjadi antara detik ke 2 hingga ke 5. Dalam periode ini, laju aliran air pertama kali mendekati nilai target 4 LPM. Meskipun masih terlihat fluktuasi kecil, sistem secara bertahap mengurangi penyimpangan dari setpoint. Kemudian, sistem memasuki settling time atau waktu stabilisasi, yaitu waktu yang dibutuhkan agar laju aliran air tetap berada di sekitar setpoint dalam toleransi tertentu. Dalam pengujian ini, settling time berlangsung hingga sekitar detik ke 10, di mana laju aliran air mulai konsisten di sekitar 4 Lpm dengan fluktuasi yang berkurang. Pada titik ini, variasi berada dalam kisaran 0.1 LPM atau sekitar 2.5% dari setpoint, yang dianggap sebagai batas toleransi yang dapat diterima. Setelah detik ke 15, sistem mencapai stabilitas yang diinginkan, dengan laju aliran air berada sangat dekat dengan setpoint 4 LPM dan hanya berfluktuasi dalam toleransi 0.05 Lpm atau sekitar 1.25% dari setpoint. Ini menunjukkan bahwa sistem PID bekerja secara efektif, mengurangi fluktuasi awal dan menjaga laju aliran air sesuai dengan target setelah periode penyesuaian. Secara keseluruhan, respons sistem menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil mengatasi overshoot awal dan menstabilkan aliran air dengan cepat. Hasil ini menunjukkan bahwa PID mampu mempertahankan laju aliran air pada setpoint yang ditetapkan, memberikan respons cepat, dan stabil dalam jangka panjang. Dengan demikian, sistem PID pada pengujian ini mencapai performa yang optimal dan efektif dalam menjaga kestabilan laju aliran air, sebagaimana dapat dilihat pada gambar 14. a merupakan grafik respon PID terhadap laju aliran

air dari kedua tangki dan gambar 14. b merupakan hasil respon PID terhadap laju aliran air.



(a)



(b)

Gambar 10. Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem, (a) Grafik Respon Laju Aliran Air, (b) Hasil PID pada Proses Pengisian Tangki

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai sistem pengendalian aliran air pada tangki penampungan berbasis PID digital, beberapa kesimpulan utama dapat disarikan. Sistem pengendalian yang dikembangkan berhasil dirancang dan dibangun dengan memanfaatkan sensor ultrasonik HC-SRF04 untuk mendeteksi ketinggian air dengan akurasi 99,77%, serta sensor YF-S201 untuk mengukur laju aliran air dengan akurasi 99,997%. Kedua sensor ini berfungsi secara optimal dalam memantau kondisi sistem dan dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno.

Pengendalian laju aliran air dilakukan dengan mengatur Pulse Width Modulation (PWM) pada pompa air, yang dikendalikan melalui algoritma PID. Algoritma PID ini dituning menggunakan metode Ziegler-Nichols, menghasilkan parameter PID dengan nilai $K_p = 12,96$, $T_i = 1,102$ detik, dan $T_d = 0,2755$ detik. Dengan parameter ini, sistem mampu mengatur laju aliran air secara optimal, yang terbukti efektif dalam mengontrol aliran air menuju tangki penampungan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pengendalian ini menunjukkan kinerja yang baik, dengan rise time sebesar 0,296 detik, overshoot sebesar 2,5% di atas setpoint, dan settling time selama 10 detik untuk mencapai kestabilan aliran pada setpoint 4 liter per menit (LPM). Dengan demikian, sistem pengendalian aliran air ini terbukti efektif dan efisien dalam mempertahankan kestabilan laju aliran air pada tingkat yang diinginkan.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan terkait dengan publikasi makalah ini.

REFERENSI

- [1] H. Fair and B. Mulyati, "Rancang Bangun Alat Pengukur Kecepatan Aliran Air Menggunakan Water Flow Sensor Berbasis Arduino Uno," *Jurnal Informatika, Teknologi dan Sains (Formateks)*, vol. 2, no. 1, pp. 1-11, 2023, doi: 10.56244/formateks.v2i1.721.

- [2] I. Z. J. M. Fahd, M. F. Hasan, A. F. Andoko, and A. Sumarahinsih, "Rancang Bangun Alat Ukur Kualitas Air pada Penampungan Air Hujan dengan Sensor TDS Berbasis Mikrokontroler ESP8266," *JASIEK (Jurnal Aplikasi Sains, Informasi, Elektronika dan Komputer)*, vol. 5, no. 1, pp. 1–8, Jun. 2023, doi: 10.26905/jasiek.v5i1.10015.
- [3] A. dian sukowati Sukowati and E. S. Budi, "Sistem Kendali PID Aplikasi Mini Plant Water Flow Berbasis Arduino," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 10, no. 3, Nov. 2023, doi: 10.33795/elkolind.v10i3.3677.
- [4] S. Rokhmanila and Vandiansyah, "Rancang Bangun Sistem Kendali Laju Alir Fluida Pada Dual Reservoir Berbasis Arduino-Labview," *Journal Of Electrical Power, Instrumentation and Control (EPIC)*, vol. 1, no. 1, pp. 1–16, 2019, doi: 10.32493/epic.v1i1.1034.
- [5] A. D. Putri, F. Politeknik, and N. Malang, "Sistem Pengendalian Aliran Air Laut Pada Alat Pembuat Garam Menggunakan Kontrol Pid," *JURNAL REKAYASA ENERGI (JRE)*, vol. 3, no. 1, pp. 24–32, 2024, doi: 10.31884/jre.v3i1.52.
- [6] A. Ainurrohman, M. Rivai, and Tasripan, "Kontrol Laju Alir Pompa Air Berpenggerak Brushless DC Motor," *JURNAL TEKNIK ITS*, vol. 7, no. 2, pp. 269–274, 2019, doi: 10.12962/j23373539.v7i2.31133.
- [7] H. Steven, A. R. Nabihah, T. Sherina, M. Dwiyaniti, S. Indriyani, and D. Widjajanto, "Implementasi PLC-VSD dan SCADA pada Sistem Pengisian Air Otomatis," *ELECTRICES*, vol. 4, no. 2, pp. 43–49, 2022, doi: 10.32722/ees.v4i2.4679.
- [8] E. Saputra, M. Kabib, and B. Satya Nugraha, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Debit Air Pada Pompa Paralel Berbasis Arduino," *Jurnal CRANKSHAFT*, vol. 2, no. 1, pp. 2623–0755, 2019, doi: 10.24176/crankshaft.v2i1.3089.
- [9] A. Rahman Hidayat, A. Dwi Risdhayanti, Fitri, D. Ayu Permatasari, and W. Tri Wahono, "Pemodelan Identifikasi Sistem untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC dengan Kontrol PID," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 11, no. 1, pp. 253–262, May 2024, doi: 10.33795/elkolind.v11i1.5409.
- [10] A. D. Putri and Fitri, "Sistem Pengendalian Aliran Air Laut Pada Alat Pembuat Garam Menggunakan Kontrol Pid," *JURNAL REKAYASA ENERGI (JRE)*, vol. 03, no. 01, pp. 24–32, 2024, doi: 10.31961/jre.v6i2.570.
- [11] P. Pangestu, D. Aribowo, and M. A. Hamid, "Sistem Auto Filling Machine Berbasis Mikrokontroler Human Machine Interface Dengan Water Flow Sensor Auto Filling Machine System Based On Human Machine Interface Microcontroller With Water Flow Sensor," *Journal of Information Technology and Computer Science (INTECOMS)*, vol. 7, no. 3, pp. 663–675, 2024, doi: 10.31539/intecom.v7i3.9742.
- [12] S. Rokhmanila, "Rancang Bangun Sistem Kendali Laju Alir Fluida Pada Dual Reservoir Berbasis Arduino-Labview." *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control*, vol. 1, no. 1, pp. 62–80, 2018, doi: 10.32493/epic.v1i1.1034.
- [13] R. Eko Cahyono *et al.*, "Rancang Bangun Prototipe Smart Control System Sebagai Pengendali Debit Air Berbasis Computer Control," *JRSIT (Jurnal Rekayasa Sistem Informasi dan Teknologi)*, vol. 1, no. 3, pp. 166–174, Feb. 2024. doi: 10.59407/jrsit.v1i3.515
- [14] S. Trivijaya, A. P. E. Wibowo, A. Pradipta, D. A. Feriando, and A. Fikria, "Penyuluhan Penerapan Sistem Kontrol dan Monitoring Ketinggian Level Air Menggunakan LabVIEW Berbasis Arduino Selama Pandemi COVID-19," *JPP IPTEK (Jurnal Pengabdian dan Penerapan IPTEK)*, vol. 6, no. 2, pp. 135–144, Nov. 2022, doi: 10.31284/j.jpp-iptek.2022.v6i2.3407.
- [15] K. Kartika, A. Asran, and M. Yanis, "Rancang bangun alat pengisian cairan berbasis sensor berat," *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: 10.29103/jee.v12i1.14341.
- [16] A. Agung Ridowi, R. Fatkhur Rizal, F. Yumono, and I. Kadiri, "Prototype Kontrol Tekanan Air Menggunakan Sensor Pressure Transduser Untuk Kerja Pompa Air Berbasis Arduino," *Zetroem*, vol. 5, no. 1, 2023, doi: 10.36526/ztr.v5i1.2561.
- [17] A. Naufal and Nurfiana, "Rancang Bangun Alat Monitoring Aliran Dan Jumlah Air Pada Greenhouse Berbasis Esp 32," *Jurnal Sistem Komputer Musirawas Andrian Naufal (Jusikom)*, vol. 7, no. 1, pp. 43–59, 2022, doi: 10.32767/jusikom.v7i1.1531
- [18] K. Kartika and Y. Fauzan, "Moringa Leaf Dryer Oven System Using Fuzzy Logic Method," *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, no. Vol 3, No 1 (2023), pp. 15–21, 2023, doi : 10.52088/ijesty.v3i1.405
- [19] H. Suryantoro and A. Budiyanto, "Prototype Sistem Monitoring Level Air Berbasis Labview & Arduino Sebagai Sarana Pendukung Praktikum Instrumentasi Sistem Kendali," *Indonesian Journal Of Laboratory*, vol. 1, no. 3, pp. 20–32, 2019, doi: 10.22146/ijl.v1i3.48718
- [20] A. Naufal and Nurfiana, "Rancang Bangun Alat Monitoring Aliran Dan Jumlah Air Pada Greenhouse Berbasis Esp 32," *Jurnal Sistem Komputer Musirawas Andrian Naufal (Jusikom)*, vol. 7, no. 1, pp. 41–52, Jun. 2022, doi: 10.32767/jusikom.v7i1.1531
- [21] K. Kartika and A. R. Setiawan, "Gas electric valve design," *International Journal of Social Science, Educational, Economics, Agriculture Research and Technology*, vol. 1, no. 8, pp. 397–404, 2022, doi: 10.54443/ijset.v1i8.46.
- [22] W. Apriyunike and J. Sardi, "Perancangan Sistem Kontrol Ketinggian Air Sawah Berdasarkan Usia Tanaman Padi Menggunakan Arduino Mega 2560," *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, vol. 1, no. 2, pp. 26–31, 2020, doi: 10.24036/jtein.v1i2.13.
- [23] O. A. Saputra and U. Ramelan, "Analisis Efektivitas Konversi Pompa Air Model Motor Penggerak Ac Dengan Pompa Air Model Motor Penggerak Dc." *Electron : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 56–68, 2023, doi: 10.33018/electron.v4i1.128.
- [24] M. Irwandy, A. Asran, K. Munir, and Salahuddin, "Pid-Based Bottle Shark Heart Heater Design and Development," *International Journal of Engineering, Science and Information Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 63–70, 2023, doi: 10.52088/ijesty.v3i1.426.
- [25] S. Rifai, S. Ratna Sulistiyanti, A. Yudamson, and E. Nasrullah, "Rancang Bangun Sistem Deteksi Binatang Penyebab Gangguan Distribusi SUTM Berbasis IoT," *Electron : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 77–88, 2024, doi: 10.33019/electron.v5i1.128.

Rancang Bangun Prototype Sistem Deteksi Kebakaran Menggunakan Board EY1703 Berbasis Mikrokontroler STC15F2K32S2

Design and Development of Fire Detection System Using STC15F2K32S2 Microcontroller

Dwi Abrar Fatrunadi¹, Dwi Purwanti²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang; email: fatrunadi@students.unnes.ac.id

[Dikirimkan: 5 Desember 2025, Direvisi: 21 Mei 2025, Diterima: 26 Mei 2025]

Corresponding Author: Dwi Abrar Fatrunadi

INTISARI — Kebakaran merupakan bencana yang sering terjadi di Indonesia, dengan penyebab utama korsleting listrik dan ledakan kompor gas, sehingga diperlukan sistem deteksi dini yang efektif. Meski teknologi deteksi kebakaran telah berkembang, penelitian terkait kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dalam sistem deteksi kebakaran berbasis board EY1703, menggunakan sensor api dan gas sebagai input serta buzzer dan LED running sebagai output. Pengujian dilakukan pada jarak 5 cm hingga 20 cm dengan sudut kemiringan sensor 0°, 5°, dan 10°. Hasilnya, pada sudut 0°, waktu baca sensor api meningkat dari 26,2 ms (5 cm) menjadi 38,4 ms (20 cm), buzzer dari 44 ms menjadi 61,8 ms, dan LED running dari 48 ms (10 cm) ke 29,2 ms (20 cm). Pada sudut 5°, waktu baca sensor api dan buzzer naik dari 45,6 ms menjadi 55,6 ms dan dari 49 ms menjadi 63,8 ms, sedangkan LED running stabil antara 43,6–52,8 ms. Pada sudut 10°, waktu baca sensor api meningkat dari 52,8 ms ke 62,2 ms, buzzer stabil di 48,2–56 ms, dan LED running dari 32,8 ms ke 61,2 ms. Untuk deteksi gas, rata-rata waktu respon karbon monoksida, metana, LPG, dan hidrogen adalah 53,4 ms, 47 ms, 47,6 ms, dan 56,6 ms. Penelitian selanjutnya disarankan mengeksplorasi penggunaan sensor tambahan atau integrasi dengan IoT untuk meningkatkan kecepatan dan jangkauan deteksi.

KATA KUNCI — Board EY1703, Mikrokontroler STC15F2K32S2, Sensor Api, Sensor Gas, Buzzer, LED Running

ABSTRACT — Fires are common disasters in Indonesia, mainly caused by electrical short circuits and gas stove explosions, requiring an effective early detection system. While fire detection technology has improved, research on the reading speed of the STC15F2K32S2 microcontroller remains limited. This study evaluates the reading speed of the STC15F2K32S2 microcontroller in a fire detection system based on the EY1703 board, using flame and gas sensors as inputs and a buzzer and running LEDs as outputs. Tests were performed at distances from 5 cm to 20 cm with sensor tilt angles of 0°, 5°, and 10°. At a 0° tilt angle, the flame sensor reading time increased from 26.2 ms (5 cm) to 38.4 ms (20 cm), the buzzer from 44 ms to 61.8 ms, and the running LEDs from 48 ms (10 cm) to 29.2 ms (20 cm). At a 5° tilt angle, the flame sensor and buzzer reading times increased from 45.6 ms to 55.6 ms and from 49 ms to 63.8 ms, respectively, while the running LEDs remained stable at 43.6–52.8 ms. At a 10° tilt angle, the flame sensor time increased from 52.8 ms to 62.2 ms, the buzzer stayed between 48.2–56 ms, and the running LEDs increased from 32.8 ms to 61.2 ms. For gas detection, the average response times for CO, methane, LPG, and hydrogen were 53.4 ms, 47 ms, 47.6 ms, and 56.6 ms, respectively. Future research should explore additional sensors or IoT integration to improve detection speed and range.

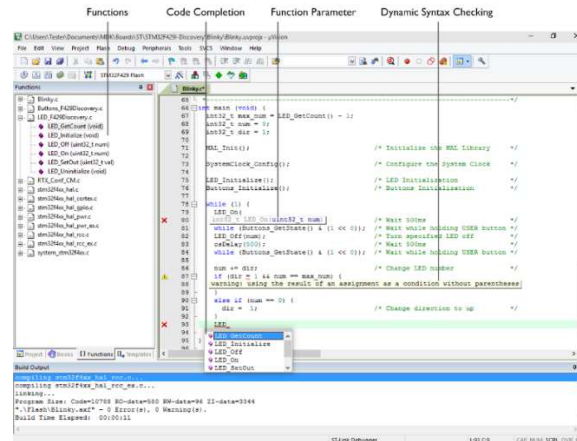
KEYWORD — Board EY1703, STC15F2K32S2 Microcontroller, Flame Sensor, Gas Sensor, Buzzer, Running LED

I. PENDAHULUAN

Setiap tahunnya, ancaman kebakaran adalah bencana yang dapat menyebabkan banyak kerugian bagi masyarakat, termasuk kerugian harta benda dan bahkan nyawa manusia [1]. Di Indonesia, kebakaran seringkali terjadi di berbagai lingkungan, mulai dari pemukiman padat hingga gedung perkantoran dan industri. Kasus kebakaran adalah salah satu jenis kejadian yang perlu perhatian khusus dan memerlukan langkah-langkah pencegahan untuk mengurangi risiko atau bahkan mencegah terjadinya kebakaran [2].

Beberapa faktor dapat menyebabkan terjadinya kebakaran, seperti gangguan pendek pada instalasi listrik, ledakan kompor gas, penyulut rokok, dan lain-lain [3]. Ini merupakan sejumlah potensi pemicu kebakaran yang penting untuk diwaspadai dan ditangani dengan serius, mengingat dampak serius yang dapat ditimbulkannya bagi keamanan dan keberlangsungan hidup masyarakat serta properti. Perkembangan yang cepat dalam pembangunan menyebabkan meningkatnya potensi terjadinya kebakaran [4].

Seiring berkembangnya zaman, tidak hanya perkembangan dalam pembangunan saja yang berkembang pesat, teknologi juga turut serta mengalami perkembangan pesat. Termasuk dalam segi aspek keselamatan kecelakaan, dalam hal ini merupakan kecelakaan kebakaran. Salah satu bentuk penanganan kebakaran adalah deteksi dini kebakaran [5]. Potensi teknologi yang dapat



Gambar 2. Build µVision Editor

C. SENSOR API (SEN-0004)

Sensor api (SEN-0004) adalah perangkat yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan nyala api berdasarkan panjang gelombang antara 760nm hingga 1100nm [14]. Dengan sudut deteksi sebesar 60°, sensor dapat memantau area yang cukup luas, sehingga meningkatkan efektivitas deteksi. Rentang suhu operasional 25°C - 85°C memastikan bahwa sensor dapat berfungsi dengan baik dalam berbagai kondisi lingkungan, baik di dalam maupun di luar ruangan [15]. Penempatan sensor harus mempertimbangkan jarak aman dari sumber panas atau api untuk menjaga umur panjang dan keandalan sensor. Sehingga untuk mencegah kerusakan sensor, jarak antara sensor dan objek yang dideteksi sebaiknya tidak terlalu dekat.

Cara kerja dari sensor ini dengan mendeteksi nyala api menggunakan metode optik. Sensor ini memanfaatkan transduser inframerah sebagai elemen pengindera [16]. Transduser ini mendeteksi penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu, sehingga memungkinkan alat ini untuk membedakan antara spektrum cahaya dari api dan spektrum cahaya lainnya, seperti spektrum cahaya lampu [17].



Gambar 3. Sensor Api (SEN-0004)

D. SENSOR ASAP (MQ-2)

Sensor asap yang digunakan adalah sensor MQ-2, yang ideal untuk mendeteksi gas-gas yang mudah terbakar. Sensor ini mampu mendeteksi gas H₂, LPG, CH₄, CO, alkohol, dan asap [18]. Sensor MQ-2 umumnya digunakan dalam berbagai aplikasi keamanan dan keselamatan untuk mendeteksi potensi kebakaran atau gas berbahaya. Keunggulan utama dari sensor ini adalah kemampuannya untuk mendeteksi berbagai jenis gas dalam satu unit sensor, membuatnya sangat berguna dalam aplikasi yang membutuhkan pemantauan gas yang luas. Sensor ini digunakan karena waktu respons yang cepat, sensitivitas yang tinggi, stabilitas, dan umur yang panjang [19].



Gambar 4. Sensor Asap (MQ-2)

III. METODOLOGI PENELITIAN

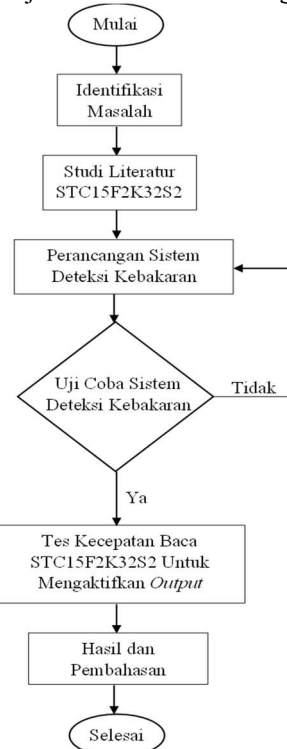
A. ALUR PENELITIAN

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh belum adanya studi mengenai kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 terhadap respon *output*, sehingga mendorong penulis untuk mengeksplorasi penerapan mikrokontroler ini dalam sistem deteksi kebakaran. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi dari *datasheet* dan artikel jurnal. Sistem deteksi kebakaran dirancang menggunakan sensor api (SEN-0004) dan sensor asap (MQ2) sebagai *input*, serta buzzer sebagai alarm dan LED *running* sebagai jalur evakuasi.

Pengujian awal dilakukan untuk memastikan sistem berjalan dengan baik, dan jika terdapat kesalahan, perancangan akan dievaluasi ulang. Setelah sistem berhasil, data kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dalam mengaktifkan *output*

dikumpulkan berdasarkan jarak baca, sudut kemiringan sensor api, dan jenis gas pada sensor MQ2. Hal ini penting karena kebakaran membutuhkan respon cepat dan tanggap.

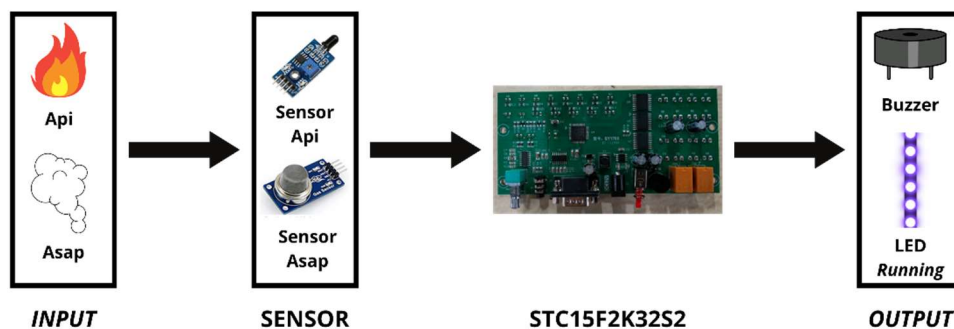
Hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel untuk menganalisis performa mikrokontroler STC15F2K32S2 dalam memproses *input* dan mengaktifkan *output* pada berbagai kondisi jarak dan sudut kemiringan sensor.



Gambar 5. Flowchart Alur Penelitian

B. DIAGRAM BLOK

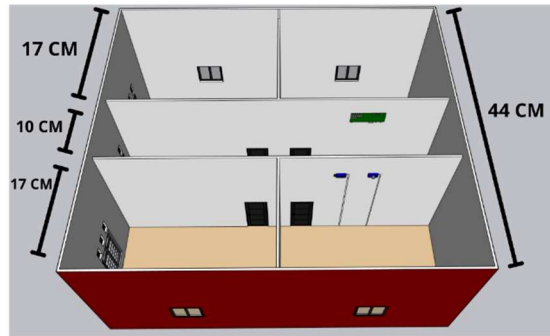
Sistem pendeteksi kebakaran ini mendapatkan masukan dari sensor api (SEN-0004) dan sensor asap (MQ2). Ketika kedua sensor tersebut mendeteksi adanya asap dan api atau salah satu dari keduanya, maka akan mengirimkan sinyal ke mikrokontroler STC15F2K32S2. Kemudian dengan adanya sinyal tersebut, mikrokontroler STC15F2K32S2 memberikan perintah agar buzzer bunyi dan LED *running* menyala. Informasi buzzer yang berbunyi ini akan memberikan informasi dan perhatian terhadap orang-orang sekitar bahwa adanya indikasi terjadinya kebakaran. Selain itu, LED *running* juga akan menyala jika mendeteksi adanya api dan atau asap. LED *running* ini berguna untuk memberikan visualisasi jalur evakuasi menuju jalan keluar. Hal tersebut tentu saja akan membuat orang-orang sekitar bisa bersiap untuk cepat melakukan evakuasi jika terjadi kebakaran.



Gambar 6. Diagram Blok Sistem Deteksi Kebakaran

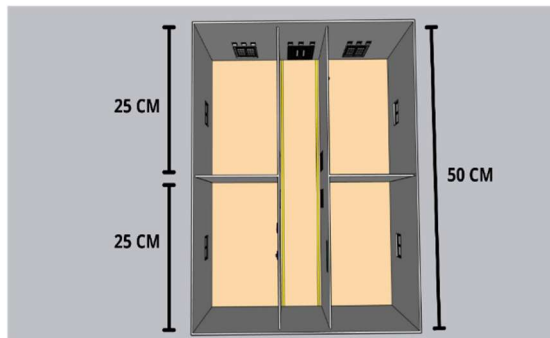
C. DESAIN PENERAPAN PROTOTYPE SISTEM DETEKSI KEBAKARAN

Pada bagian ini, dibuat ilustrasi desain penerapan alat yang sudah dibuat, yang akan diletakkan pada sebuah ruangan di suatu rumah. Desain ini bertujuan untuk memberikan gambaran visual mengenai penempatan komponen-komponen utama sistem deteksi kebakaran, diantaranya sensor api, sensor asap, buzzer, dan LED *running*, serta bagaimana sistem ini berfungsi secara keseluruhan dalam mendeteksi potensi kebakaran dan memberikan peringatan dini.



Gambar 7. Desain Ilustrasi Tampak Samping

Dapat dilihat pada Gambar 7 mengenai penempatan sensor dan mikrokontroler STC15F2K32S2. Sensor api dan sensor asap diletakkan pada sudut atas ruangan agar memudahkan untuk mendeteksi adanya api dan atau asap. Board EY1703 yang berbasis mikrokontroler STC15F2K32S2 diletakkan pada lorong jalan ruangan untuk memudahkan jalur konfigurasi antara sensor api dan sensor asap dengan LED *running*.



Gambar 8. Desain Ilustrasi Tampak Atas

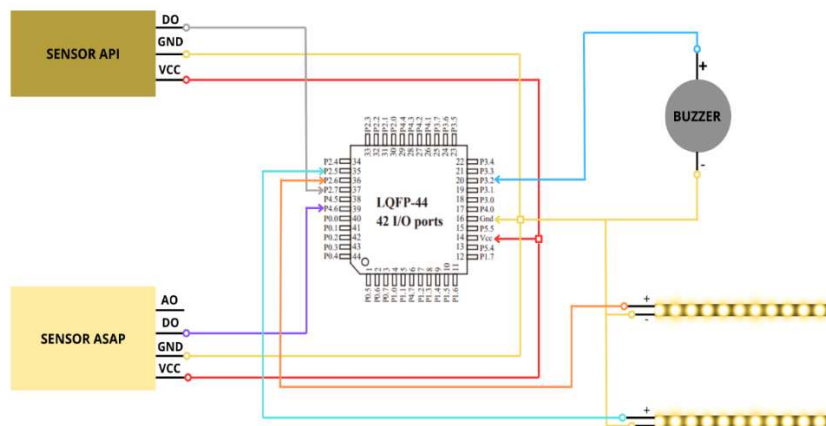
Pada Gambar 8 terdapat jalur memanjang berwarna hijau dibagian lantai merupakan LED *running* yang akan diterapkan sebagai visualisasi jalur evakuasi yang mengarah keluar ruangan. Pemasangan LED *running* di bagian lantai memiliki alasan tersendiri karena asap mengumpul ke bagian atas, sehingga diupayakan untuk merangkak dan bernapas pendek [20]. Oleh karena itu, LED *running* akan dipasang dibagian lantai sebagai visualisasi jalur evakuasi, agar memudahkan pengguna untuk mengetahui jalan keluar dengan cepat.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. PERANCANGAN SISTEM DETEKSI KEBAKARAN

1) WIRING DIAGRAM SISTEM DETEKSI KEBAKARAN

Diagram ini menggambarkan hubungan antara komponen-komponen utama dalam sistem, diantaranya mikrokontroler STC15F2K32S2, sensor api, sensor MQ2, buzzer (alarm), serta LED *running* (jalur evakuasi). *Wiring* diagram ini berperan penting dalam memastikan bahwa setiap komponen dapat berfungsi secara optimal sesuai dengan fungsinya masing-masing dalam mendeteksi kebakaran dan memberikan respon melalui alarm dan indikasi visual berupa jalur evakuasi. Penjelasan detail mengenai komponen dan koneksinya dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Wiring Diagram Sistem Deteksi Kebakaran

Gambar 9 menunjukkan sistem yang terdiri dari sensor api dan sensor asap sebagai penerima *input*, serta buzzer dan LED *running* sebagai *output*. Sensor api terhubung ke pin P2⁷ mikrokontroler STC15F2K32S2 untuk mengirim informasi, dengan pin VCC dan GND terhubung sesuai spesifikasi. Sensor asap menggunakan pin P4⁶ untuk mengirimkan data *Digital Output* (DO) ke

mikrokontroler. Sementara itu, buzzer dan LED *running* memiliki dua pin, yaitu katoda dan anoda. Katoda buzzer terhubung ke pin P3², sedangkan LED *running* terhubung ke pin P2⁶ dan P2⁵. Semua komponen dirancang sesuai dengan pin yang telah ditentukan agar sistem dapat berfungsi dengan baik. Untuk lebih singkatnya, pin masing-masing komponen dapat dilihat pada Tabel I, Tabel II, Tabel III, dan Tabel IV.

TABEL I
PIN SENSOR API

Sensor Api	STC15F2K32S2
DO	P2 ⁷
VCC	VCC
GND	GND

TABEL II
PIN SENSOR ASAP

Sensor Asap	STC15F2K32S2
DO	P4 ⁶
VCC	VCC
GND	GND

TABEL III
PIN BUZZER

Buzzer	STC15F2K32S2
Katoda	P3 ²
Anoda	GND

TABEL IV
PIN LED *RUNNING*

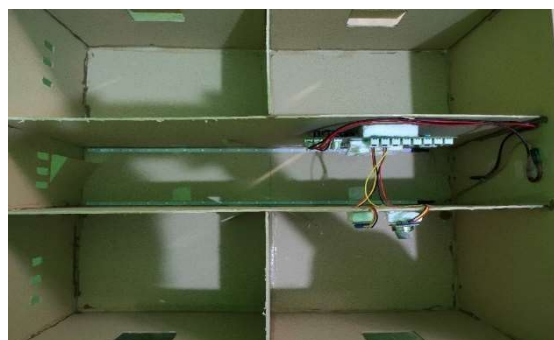
LED <i>Running</i>	STC15F2K32S2
Katoda	P2 ⁶ dan P2 ⁵
Anoda	GND

2) IMPLEMENTASI PROTOTYPE SISTEM DETEKSI KEBAKARAN

Peletakkan sensor api, sensor asap, *board* EY1703 yang berbasis mikrokontroler STC15F2K32S2, dan LED *running* telah disesuaikan dengan desain penerapan sistem deteksi kebakaran yang telah dibuat pada Metodologi Penelitian. Lebih detailnya dapat dilihat pada Gambar 10, Gambar 11, Gambar 12, Gambar 13, dan Gambar 14.



Gambar 10. Penerapan Tampak Samping



Gambar 11. Penerapan Tampak Atas

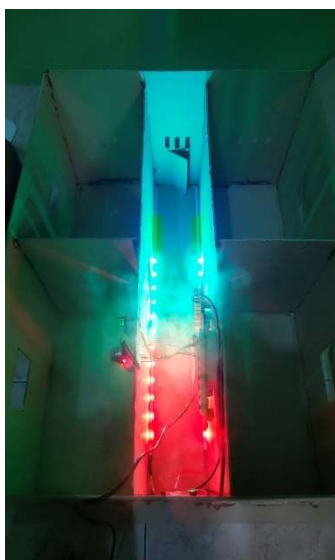
Peletakkan sensor api dan sensor asap di atas bertujuan untuk memudahkan sensor agar dapat dengan mudah mendeteksi adanya indikasi api dan atau asap dari bawah. Selanjutnya, peletakkan LED *running* dibawah, tepatnya di jalan bertujuan untuk memudahkan orang-orang untuk melakukan evakuasi secara cepat. Lebih detailnya, dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 12. Penerapan Tampak Samping Kondisi Menyala



Gambar 13. Penerapan Tampak Atas Kondisi Uji Coba Sensor Api



Gambar 14. Penerapan Tampak Atas Kondisi Uji Coba Sensor Asap

Pengujian perangkat juga perlu dilakukan untuk mengetahui keberhasilan suatu sistem yang telah dibuat. Dapat dilihat pada Gambar 12, Gambar 13, dan Gambar 14, dilakukan pengujian perangkat agar mengetahui keberhasilan sistem deteksi kebakaran menggunakan *board* EY1703 yang berbasis mikrokontroler STC15F2K32S2. Pertama dilakukan pengujian sensor api, dan sistem deteksi berjalan dengan baik ketika sensor api mendeteksi adanya api, maka LED *running* akan menyala sebagai jalur evakuasi. Begitupun dengan sensor asap yang terdapat pada Gambar 14, sistem berjalan dengan baik ketika mendeteksi adanya asap, maka LED *running* menyala sebagai jalur evakuasi.

B. UJI COBA KECEPATAN BACA MIKROKONTROLER STC15F2K32S2

Penelitian ini menguji performa kecepatan baca *board* EY1703 berbasis mikrokontroler STC15F2K32S2 dalam menanggapi *input* dari sensor api dan asap untuk mengaktifkan *output* berupa buzzer dan LED *running*. Uji coba dilakukan lima kali pada setiap

pengukuran, dengan pengambilan nilai rata-rata. Untuk sensor api, pengujian mencakup variasi jarak (5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm) dan sudut kemiringan (0°, 5°, 10°), sementara sensor asap diuji dengan variabel asap karbon monoksida (CO), metana (CH₄), LPG, dan hidrogen (H₂). Pengambilan data dilakukan secara terpisah antara sensor api dan asap, menghasilkan waktu respon dalam *millisecond* (ms). *Timer* pada mikrokontroler akan mereset setelah *output* berjalan untuk memastikan pembacaan waktu yang akurat.

1) DATA KECEPATAN BACA DALAM SUDUT 0 DERAJAT

Uji coba pertama dimulai dari jarak terdekat terlebih dahulu, yaitu pada jarak 5 cm, kemudian disusul jarak 10 cm, lalu jarak 15 cm, dan yang terakhir jarak 20 cm. Uji coba dilakukan sebanyak 5 kali pembacaan, dan diambil rata-ratanya agar data bisa lebih valid.

TABEL V
DATA KECEPATAN BACA SENSOR API DALAM SUDUT 0 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	26 ms	52 ms	38 ms	15 ms
2	36 ms	22 ms	46 ms	35 ms
3	20 ms	30 ms	25 ms	72 ms
4	22 ms	31 ms	42 ms	5 ms
5	27 ms	22 ms	4 ms	65 ms
Rata-Rata	26,2 ms	31,4 ms	31 ms	38,4 ms

Tabel V menunjukkan waktu respon sensor api pada jarak 5 cm hingga 20 cm dalam lima kali percobaan, dengan rata-rata waktu respon meningkat seiring bertambahnya jarak. Pada jarak 5 cm, waktu respon rata-rata tercepat adalah 26,2 ms, menunjukkan deteksi yang cepat dan konsisten. Pada jarak 10 cm dan 15 cm, rata-rata waktu respon masing-masing adalah 31,4 ms dan 31 ms, dengan variasi yang lebih lebar pada jarak 15 cm, menunjukkan konsistensi yang menurun. Pada jarak 20 cm, waktu respon rata-rata tertinggi adalah 38,4 ms, dengan variasi signifikan, mengindikasikan kesulitan sensor dalam mendeteksi api secara akurat pada jarak yang lebih jauh. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor api bekerja lebih optimal pada jarak dekat.

TABEL VI
DATA KECEPATAN BACA RESPON BUZZER DALAM SUDUT 0 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	44 ms	54 ms	70 ms	97 ms
2	34 ms	14 ms	34 ms	91 ms
3	64 ms	27 ms	77 ms	20 ms
4	47 ms	29 ms	90 ms	48 ms
5	31 ms	60 ms	82 ms	53 ms
Rata-Rata	44 ms	36,8 ms	70,6 ms	61,8 ms

Tabel VI menunjukkan waktu respon buzzer terhadap sinyal dari sensor api pada jarak 5 cm hingga 20 cm. Pada jarak 5 cm, waktu respon rata-rata adalah 44 ms, menunjukkan respon yang cepat. Pada 10 cm, rata-rata waktu respon sedikit lebih rendah, yaitu 36,8 ms, menandakan sistem masih bekerja baik. Namun, pada 15 cm, rata-rata waktu respon meningkat signifikan menjadi 70,6 ms, menunjukkan penurunan kinerja. Pada jarak 20 cm, rata-rata waktu respon adalah 61,8 ms, dengan variasi yang besar, menunjukkan ketidakkonsistenan. Secara keseluruhan, waktu respon buzzer cenderung meningkat dengan bertambahnya jarak, meskipun terdapat fluktuasi pada jarak yang lebih jauh.

TABEL VII
DATA KECEPATAN BACA RESPON LED *RUNNING* DALAM SUDUT 0 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	19 ms	49 ms	15 ms	12 ms
2	9 ms	45 ms	9 ms	32 ms
3	39 ms	98 ms	48 ms	51 ms
4	77 ms	13 ms	65 ms	23 ms
5	6 ms	35 ms	53 ms	28 ms
Rata-Rata	30 ms	48 ms	38 ms	29,2 ms

Tabel VII menunjukkan waktu respon LED *running* sebagai jalur evakuasi pada jarak 5 cm hingga 20 cm. Pada jarak 5 cm, rata-rata waktu respon cepat, yaitu 30 ms. Pada jarak 10 cm, rata-rata waktu respon meningkat menjadi 48 ms, dengan variasi yang lebih besar akibat sinyal yang kurang stabil. Pada jarak 15 cm, rata-rata waktu respon adalah 38 ms, sedikit lebih cepat dibandingkan 10 cm, namun tetap menunjukkan variasi yang lebar. Pada jarak 20 cm, rata-rata waktu respon kembali lebih rendah, yaitu 29,2 ms,

dengan konsistensi yang lebih baik. Secara keseluruhan, waktu respon LED *running* tidak menunjukkan pola linear terhadap jarak, dengan rata-rata respon tertinggi pada jarak 10 cm (48 ms) dan terendah pada 5 cm (30 ms), mengindikasikan faktor lain seperti fluktuasi sinyal memengaruhi hasil.

2) DATA KECEPATAN BACA DALAM SUDUT 5 DERAJAT

Sama dengan uji coba pertama, uji coba kedua dimulai dari jarak terdekat terlebih dahulu, yaitu pada jarak 5 cm, kemudian disusul jarak 10 cm, lalu jarak 15 cm, dan yang terakhir jarak 20 cm. Uji coba dilakukan sebanyak 5 kali pembacaan, dan diambil rata-ratanya agar data bisa lebih valid.

TABEL VIII
DATA KECEPATAN BACA SENSOR API DALAM SUDUT 5 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	61 ms	70 ms	49 ms	75 ms
2	63 ms	39 ms	88 ms	51 ms
3	57 ms	22 ms	19 ms	40 ms
4	24 ms	85 ms	26 ms	65 ms
5	23 ms	50 ms	90 ms	47 ms
Rata-Rata	45,6 ms	53,2 ms	54,4 ms	55,6 ms

Tabel VIII menunjukkan waktu respon sensor api pada sudut kemiringan 5 derajat untuk jarak 5 cm hingga 20 cm. Pada jarak 5 cm, rata-rata waktu respon adalah 45,6 ms dengan variasi besar akibat kemiringan yang memengaruhi sensitivitas. Pada jarak 10 cm dan 15 cm, rata-rata waktu respon meningkat menjadi 53,2 ms dan 54,4 ms, dengan fluktuasi yang signifikan akibat jarak dan sudut kemiringan. Pada jarak 20 cm, rata-rata waktu respon mencapai 55,6 ms, menjadi yang paling lambat, meskipun perbedaannya tidak signifikan dibandingkan jarak 10 cm dan 15 cm. Secara keseluruhan, sudut kemiringan 5 derajat memperlambat waktu respon dibandingkan sudut 0 derajat, namun sensor tetap mampu mendeteksi api dalam rata-rata waktu di bawah 60 ms. Variasi hasil ini menekankan pentingnya mempertimbangkan kemiringan dalam desain dan penempatan sensor.

TABEL IX
DATA KECEPATAN BACA RESPON BUZZER DALAM SUDUT 5 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	38 ms	87 ms	82 ms	91 ms
2	36 ms	31 ms	14 ms	99 ms
3	74 ms	14 ms	66 ms	2 ms
4	67 ms	42 ms	97 ms	93 ms
5	30 ms	91 ms	24 ms	34 ms
Rata-Rata	49 ms	53 ms	56,6 ms	63,8 ms

Tabel IX menunjukkan waktu respon buzzer pada berbagai jarak dengan sensor api dimiringkan 5 derajat. Pada jarak 5 cm, rata-rata waktu respon adalah 49 ms, dengan variasi kecil yang menunjukkan respon cukup cepat. Pada jarak 10 cm, rata-rata meningkat menjadi 53 ms, dengan variasi lebih besar akibat pengaruh kemiringan dan jarak. Jarak 15 cm memiliki rata-rata waktu respon 56,6 ms, sedikit lebih lama dengan variasi yang signifikan, sedangkan pada jarak 20 cm, waktu respon rata-rata menjadi yang paling lambat, yaitu 63,8 ms, dengan rentang waktu respon yang sangat bervariasi. Secara keseluruhan, waktu respon buzzer cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak, terutama pada jarak 20 cm, dengan sudut kemiringan 5 derajat memberikan efek pada kestabilan respon. Hal ini menunjukkan pentingnya mempertimbangkan jarak dan kemiringan sensor dalam desain sistem deteksi kebakaran untuk memastikan respon yang optimal.

TABEL X
DATA KECEPATAN BACA RESPON LED *RUNNING* DALAM SUDUT 5 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	69 ms	67 ms	57 ms	72 ms
2	11 ms	32 ms	85 ms	70 ms
3	55 ms	45 ms	16 ms	37 ms
4	62 ms	73 ms	63 ms	68 ms
5	21 ms	47 ms	32 ms	9 ms
Rata-Rata	43,6 ms	52,8 ms	50,6 ms	51,2 ms

Tabel X menunjukkan waktu respon LED *running* pada berbagai jarak dengan sudut kemiringan sensor 5 derajat. Pada jarak 5 cm, rata-rata waktu respon adalah 43,6 ms, menunjukkan efisiensi aktivasi LED meskipun ada variasi antar percobaan. Jarak 10 cm memiliki rata-rata waktu respon 52,8 ms, sedikit meningkat dibandingkan 5 cm, sementara jarak 15 cm dan 20 cm masing-masing

mencatat rata-rata 50,6 ms dan 51,2 ms, menunjukkan kestabilan waktu respon meskipun jarak bertambah. Secara keseluruhan, waktu respon LED cukup stabil di berbagai jarak, dengan rata-rata berkisar antara 43,6 ms hingga 52,8 ms. Meskipun variasi antar percobaan menunjukkan pengaruh kemiringan dan jarak terhadap kestabilan deteksi, LED tetap dapat diaktifkan dengan cepat dan konsisten dalam sistem deteksi kebakaran.

3) DATA KECEPATAN BACA DALAM SUDUT 10 DERAJAT

Uji coba ketiga dimulai dari jarak terdekat terlebih dahulu, yaitu pada jarak 5 cm, kemudian disusul jarak 10 cm, lalu jarak 15 cm, dan yang terakhir jarak 20 cm. Uji coba dilakukan sebanyak lima kali pembacaan, dan diambil rata-ratanya agar data bisa lebih valid.

TABEL XI
DATA KECEPATAN BACA SENSOR API DALAM SUDUT 10 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	67 ms	57 ms	40 ms	49 ms
2	21 ms	23 ms	62 ms	45 ms
3	54 ms	63 ms	47 ms	66 ms
4	89 ms	25 ms	41 ms	69 ms
5	33 ms	65 ms	54 ms	82 ms
Rata-Rata	52,8 ms	46,6 ms	48,8 ms	62,2 ms

Tabel XI menunjukkan waktu respon sensor api pada sudut kemiringan 10 derajat untuk berbagai jarak. Pada jarak 5 cm, rata-rata waktu respon adalah 52,8 ms dengan fluktuasi yang cukup besar, mencerminkan sensitivitas sensor terhadap posisi api. Jarak 10 cm mencatat waktu respon rata-rata 46,6 ms, lebih cepat dan stabil dibandingkan 5 cm. Pada jarak 15 cm, rata-rata waktu respon meningkat menjadi 48,8 ms, sedangkan jarak 20 cm mencatat waktu respon tertinggi, yaitu 62,2 ms, menunjukkan pengaruh jarak terhadap penurunan intensitas sinyal. Secara keseluruhan, waktu respon cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak, dan sudut kemiringan 10 derajat terlihat memengaruhi sensitivitas sensor, terutama pada jarak yang lebih jauh.

TABEL XII
DATA KECEPATAN BACA RESPON BUZZER DALAM SUDUT 10 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	69 ms	90 ms	46 ms	42 ms
2	7 ms	31 ms	45 ms	38 ms
3	67 ms	84 ms	48 ms	94 ms
4	32 ms	36 ms	65 ms	67 ms
5	66 ms	42 ms	68 ms	39 ms
Rata-Rata	48,2 ms	56,6 ms	54,4 ms	56 ms

Tabel XII menunjukkan waktu respon buzzer pada sudut kemiringan 10 derajat untuk berbagai jarak. Pada jarak 5 cm, rata-rata waktu respon adalah 48,2 ms dengan variasi yang cukup besar, sedangkan jarak 10 cm mencatat rata-rata 56,6 ms, menunjukkan peningkatan waktu respon pada jarak menengah. Pada jarak 15 cm, rata-rata waktu respon sedikit menurun menjadi 54,4 ms, menunjukkan konsistensi deteksi, sementara jarak 20 cm mencatat rata-rata 56 ms dengan variasi yang lebih besar, menunjukkan deteksi lebih lambat pada beberapa percobaan. Secara keseluruhan, rata-rata waktu respon cenderung meningkat seiring bertambahnya jarak, dengan sudut kemiringan 10 derajat memengaruhi responsivitas, terutama pada jarak yang lebih jauh.

TABEL XIII
DATA KECEPATAN BACA RESPON LED RUNNING DALAM SUDUT 10 DERAJAT

No.	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
1	0 ms	65 ms	47 ms	73 ms
2	18 ms	62 ms	64 ms	25 ms
3	98 ms	60 ms	44 ms	69 ms
4	7 ms	11 ms	61 ms	64 ms
5	41 ms	73 ms	63 ms	75 ms
Rata-Rata	32,8 ms	54,2 ms	55,8 ms	61,2 ms

Tabel XIII menunjukkan waktu respon LED *running* pada sudut kemiringan 10 derajat untuk berbagai jarak setelah deteksi api. Pada jarak 5 cm, rata-rata waktu respon adalah 32,8 ms dengan variasi besar (0 – 98 ms), sedangkan pada jarak 10 cm meningkat menjadi 54,2 ms dengan variasi yang lebih stabil. Jarak 15 cm mencatat rata-rata 55,8 ms dengan variasi kecil, menunjukkan konsistensi deteksi, sementara jarak 20 cm mencatat rata-rata 61,2 ms dengan variasi lebih besar (25 – 75 ms), menunjukkan waktu

respon lebih lambat pada jarak jauh. Secara keseluruhan, rata-rata waktu respon LED meningkat seiring bertambahnya jarak, meskipun sudut kemiringan 10 derajat tidak terlalu memengaruhi stabilitas respon, kecuali pada jarak dekat yang menunjukkan variasi signifikan.

4) DATA KECEPATAN BACA DALAM MENDETEKSI KARBON MONOKSIDA (CO)

Uji coba pertama kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dari sensor asap terhadap buzzer dan LED *running*, yaitu dalam mendeteksi karbon monoksida. Percobaan dilakukan sebanyak lima kali agar data lebih valid. Data kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dari sensor asap terhadap buzzer dan LED *running* dalam mendeteksi karbon monoksida dapat dilihat pada Tabel XIV.

TABEL XIV
DATA KECEPATAN BACA DALAM MENDETEKSI KARBON MONOKSIDA (CO)

No.	Sensor Asap	Buzzer	LED Running
1	71 ms	17 ms	38 ms
2	40 ms	15 ms	24 ms
3	67 ms	55 ms	62 ms
4	59 ms	68 ms	70 ms
5	30 ms	44 ms	51 ms
Rata-Rata	53,4 ms	39,8 ms	49 ms

Sensor asap memiliki waktu rata-rata deteksi karbon monoksida (CO) sebesar 53,4 ms, dengan variasi antara 30 ms hingga 71 ms, yang dipengaruhi oleh fluktuasi konsentrasi gas dan sensitivitas sensor. Buzzer, yang memberikan alarm peringatan, membutuhkan waktu rata-rata 39,8 ms untuk diaktifkan, dengan rentang antara 15 ms hingga 68 ms, dipengaruhi oleh pengolahan sinyal mikrokontroler. LED *running*, sebagai panduan jalur evakuasi, memerlukan waktu rata-rata 49 ms untuk memulai pola, dengan variasi antara 24 ms hingga 70 ms, yang terkait dengan kompleksitas pengendalian pola LED oleh mikrokontroler. Secara keseluruhan, waktu respon sistem cukup cepat, memungkinkan deteksi dan peringatan yang efektif dalam situasi darurat.

5) DATA KECEPATAN BACA DALAM MENDETEKSI METANA (CH₄)

Uji coba kedua kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dari sensor asap terhadap buzzer dan LED *running*, yaitu dalam mendeteksi metana. Percobaan dilakukan sebanyak lima kali agar data lebih valid. Data kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dari sensor asap terhadap buzzer dan LED *running* dalam mendeteksi metana dapat dilihat pada Tabel XV.

TABEL XV
DATA KECEPATAN BACA DALAM MENDETEKSI METANA (CH₄)

No.	Sensor Asap	Buzzer	LED Running
1	76 ms	25 ms	28 ms
2	32 ms	11 ms	16 ms
3	47 ms	45 ms	50 ms
4	38 ms	38 ms	41 ms
5	42 ms	64 ms	69 ms
Rata-Rata	47 ms	36,6 ms	40,8 ms

Sensor asap mendeteksi gas metana (CH₄) dengan waktu rata-rata 47 ms, dengan rentang waktu antara 32 ms hingga 76 ms, yang menunjukkan variasi dipengaruhi oleh fluktuasi konsentrasi gas dan faktor lingkungan. Mikrokontroler STC15F2K32S2 memproses data dengan efisien untuk deteksi yang cepat. Waktu rata-rata untuk mengaktifkan buzzer setelah deteksi gas metana adalah 36,6 ms, dengan rentang antara 11 ms hingga 64 ms, menunjukkan respons cepat meskipun ada sedikit variasi akibat pengolahan sinyal. Waktu rata-rata untuk mengaktifkan pola LED *running* adalah 40,8 ms, dengan variasi antara 16 ms hingga 69 ms, yang dipengaruhi oleh pengendalian sinyal ke beberapa LED. Secara keseluruhan, sistem ini responsif dalam memberikan peringatan suara dan arahan visual pada situasi darurat.

6) DATA KECEPATAN BACA DALAM MENDETEKSI GAS LPG

Uji coba ketiga kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dari sensor asap terhadap buzzer dan LED *running*, yaitu dalam mendeteksi gas LPG. Percobaan dilakukan sebanyak lima kali agar data lebih valid. Data kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dari sensor asap terhadap buzzer dan LED *running* dalam mendeteksi gas LPG dapat dilihat pada Tabel XVI.

TABEL XVI
DATA KECEPATAN BACA DALAM MENDETEKSI GAS LPG

No.	Sensor Asap	Buzzer	LED Running
1	66 ms	13 ms	28 ms
2	26 ms	20 ms	32 ms

3	47 ms	43 ms	48 ms
4	67 ms	38 ms	36 ms
5	32 ms	54 ms	41 ms
Rata-Rata	47,6 ms	33,6 ms	37 ms

Sensor asap pada sistem ini mendeteksi gas LPG dengan waktu deteksi yang bervariasi antara 26 ms hingga 67 ms, dengan rata-rata 47,6 ms, menunjukkan respon cepat yang penting untuk aplikasi deteksi kebakaran. Waktu pengaktifan buzzer berkisar antara 13 ms hingga 54 ms, dengan rata-rata 33,6 ms, menunjukkan bahwa buzzer memberikan peringatan suara yang cepat setelah deteksi gas LPG. LED *running* diaktifkan dalam rentang waktu 28 ms hingga 48 ms, dengan rata-rata 37 ms, sedikit lebih lambat dibandingkan buzzer karena pola pengendalian LED yang lebih kompleks. Secara keseluruhan, sistem ini memberikan respon yang cepat baik dalam peringatan suara maupun visual setelah deteksi gas LPG.

7) DATA KECEPATAN BACA DALAM MENDETEKSI HIDROGEN (H₂)

Uji coba keempat kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dari sensor asap terhadap buzzer dan LED *running*, yaitu dalam mendeteksi hidrogen (H₂). Percobaan dilakukan sebanyak lima kali agar data lebih valid. Data kecepatan baca mikrokontroler STC15F2K32S2 dari sensor asap terhadap buzzer dan LED *running* dalam mendeteksi hidrogen dapat dilihat pada Tabel XVII.

TABEL XVII
DATA KECEPATAN BACA DALAM MENDETEKSI HIDROGEN (H₂)

No.	Sensor Asap	Buzzer	LED Running
1	28 ms	27 ms	31 ms
2	69 ms	36 ms	40 ms
3	43 ms	28 ms	29 ms
4	57 ms	69 ms	70 ms
5	86 ms	44 ms	50 ms
Rata-Rata	56,6 ms	40,8 ms	44 ms

Pada pengujian dengan gas hidrogen (H₂), sensor asap mendeteksi gas dengan waktu deteksi bervariasi antara 28 ms hingga 86 ms, dengan rata-rata 56,6 ms, menunjukkan respon yang cukup cepat meskipun ada variasi antar pengujian. Waktu pengaktifan buzzer berkisar antara 27 ms hingga 69 ms, dengan rata-rata 40,8 ms, menunjukkan peringatan suara yang cepat setelah deteksi gas hidrogen, meskipun ada sedikit perbedaan waktu aktivasi. LED *running* diaktifkan dalam rentang 29 ms hingga 70 ms, dengan rata-rata 44 ms, memberikan indikasi visual yang cukup cepat setelah deteksi gas. Variasi dalam waktu deteksi dan aktivasi *output* dapat dipengaruhi oleh faktor sensor atau kondisi lingkungan.

C. PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh rata-rata waktu deteksi yang berbeda untuk sensor api (SEN-0004) dan sensor asap (MQ2), dengan masing-masing sensor mengukur variabel yang berbeda. Sensor api menunjukkan peningkatan waktu deteksi seiring bertambahnya jarak dan sudut kemiringan, dengan rata-rata waktu pembacaan pada sudut 0° berkisar antara 26,2 ms pada 5 cm hingga 38,4 ms pada 20 cm. Waktu pengaktifan buzzer juga meningkat dari 44 ms pada 5 cm menjadi 61,8 ms pada 20 cm, sementara LED *running* menunjukkan pola berbeda dengan waktu rata-rata tertinggi pada 10 cm (48 ms) dan terendah pada 20 cm (29,2 ms). Pada sudut kemiringan 5° dan 10°, waktu deteksi sensor api dan buzzer meningkat, dengan variasi lebih signifikan pada LED *running*. Waktu respon sensor dan *output* dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan kemiringan sensor.

Pada pengujian deteksi gas lainnya, mikrokontroler STC15F2K32S2 menunjukkan performa yang baik dalam mendeteksi gas karbon monoksida, metana, LPG, dan hidrogen. Rata-rata waktu respon untuk karbon monoksida adalah 53,4 ms untuk sensor asap, 39,8 ms untuk buzzer, dan 49 ms untuk LED *running*, mencerminkan sistem yang responsif untuk peringatan dini. Deteksi gas metana menunjukkan waktu rata-rata pembacaan sensor asap 47 ms, dengan buzzer dan LED *running* masing-masing merespon dalam 36,6 ms dan 40,8 ms. Untuk gas LPG, waktu deteksi sensor asap adalah 47,6 ms, buzzer 33,6 ms, dan LED *running* 37 ms, menunjukkan kecepatan respon yang efektif. Pada gas hidrogen, mikrokontroler mampu mendeteksi dengan waktu deteksi rata-rata 56,6 ms, dan pengaktifan buzzer serta LED berjalan dalam 40,8 ms dan 44 ms, dengan variasi yang disebabkan oleh faktor lingkungan dan kondisi sensor. Secara keseluruhan, sistem ini menunjukkan respon yang cukup cepat dan andal untuk aplikasi deteksi kebakaran dan bahaya gas.

Dari hasil pengujian, penelitian ini memiliki perbedaan dibandingkan dengan penelitian lain. Dimana, penelitian kali ini memanfaatkan mikrokontroler STC15F2K32S2. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, prototype sistem deteksi kebakaran yang menggunakan mikrokontroler STC15F2K32S2 dapat berjalan dengan baik. Hal ini mencerminkan kemampuan mikrokontroler STC15F2K32S2 dalam memproses sinyal dari sensor api (SEN-0004) dan sensor asap (MQ2) dengan baik untuk mengaktifkan buzzer dan LED *running*.

V. KESIMPULAN

Telah dirancang sistem deteksi kebakaran menggunakan board EY1703 yang berbasis mikrokontroler STC15F2K32S2. Hasilnya sistem tersebut berjalan dengan baik dan benar.



Pada sudut kemiringan 0° , waktu pembacaan sensor api meningkat seiring bertambahnya jarak, dengan rata-rata waktu 26,2 ms (5 cm) hingga 38,4 ms (20 cm). Waktu buzzer juga meningkat dari 44 ms menjadi 61,8 ms pada jarak yang lebih jauh, sementara LED running menunjukkan pola berbeda, dengan waktu tertinggi pada 10 cm (48 ms) dan terendah pada 20 cm (29,2 ms). Pada sudut 5° , waktu sensor api dan buzzer meningkat dari 45,6 ms (5 cm) menjadi 55,6 ms (20 cm), dan 49 ms (5 cm) menjadi 63,8 ms (20 cm), sedangkan LED running stabil antara 43,6 ms (5 cm) hingga 52,8 ms (10 cm). Pada sudut 10° , waktu sensor api dari 52,8 ms (5 cm) menjadi 62,2 ms (20 cm), buzzer konsisten antara 48,2 ms (5 cm) hingga 56 ms (20 cm), dan LED running meningkat signifikan dari 32,8 ms (5 cm) menjadi 61,2 ms (20 cm). Pada deteksi gas, rata-rata waktu respon sensor asap, buzzer, dan LED running masing-masing untuk karbon monoksida adalah 53,4 ms, 39,8 ms, dan 49 ms. Untuk metana adalah 47 ms, 36,6 ms, dan 40,8 ms. Untuk LPG adalah 47,6 ms, 33,6 ms, dan 37 ms. Dan untuk hidrogen adalah 56,6 ms, 40,8 ms, dan 44 ms.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT. Norxel Teknologi Indonesia yang telah memberikan dukungannya berupa diizinkannya meminjamkan mikrokontroler kepada penulis untuk dilakukan penelitian.

REFERENSI

- [1] Y. Darnita, A. Discrise, and R. Toyib, "Prototype Alat Pendeksi Kebakaran Menggunakan Arduino," *J. Inform. Upgris*, vol. 7, no. 1, 2021.
- [2] N. A. Putri, M. Martono, M. Mawardi, K. J. Setyono, and S. Sukoyo, "Analisis Sistem Proteksi Kebakaran Sebagai Upaya Pencegahan Kebakaran," *Bangun Rekaprima*, vol. 5, no. 2, pp. 59-69, 2019.
- [3] T. Taryana, C. Kuntadi, Y. Suprihartini, and R. Sadiatmi, "Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Keandalan Instalasi Listrik," *J. Manaj. Pendidik. DAN ILMU Sos.*, vol. 4, no. 1, pp. 531-537, 2022.
- [4] H. Isyanto, D. Almada, and H. Fahmiansyah, "Perancangan IoT Deteksi Dini Kebakaran dengan Notifikasi Panggilan Telepon dan Share Location," *Jetri J. Ilm. Tek. Elektro*, pp. 1-16, 2020.
- [5] D. Zidifaldi, A. Abdullah, K. Sari, and I. Fakhruzi, "Pemanfaatan iot sebagai sistem deteksi dini kebakaran dengan sensor api dan sensor suhu berbasis arduino," *J. Digit. Teknol. Inf.*, vol. 5, no. 2, p. 66, 2022.
- [6] Hongli, "Design and Implementation of Crossing Rotating LED Display Based on Bluetooth Transmission," *Beijing Inst. Fash. Technol.*, 2019.
- [7] Z. Mu, W. Li, C. Lou, and M. Liu, "Investigation and application of smart door locks based on Bluetooth control technology," in *2020 Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC)*, IEEE, 2020, pp. 68-72.
- [8] X. Ding and P. Jia, "Corridor Lamp Control System Based on Solar and LED Lighting," in *2015 International Conference on Information Science and Computer Applications (ISCA 2015)*, Atlantis Press, 2015, pp. 8-13.
- [9] Sasmita, "8051 Microcontroller Architecture and Application," *Electronics Post*. [Online]. Available: <https://electronicspost.com/8051-microcontroller-architecture-and-application/>, 2016.
- [10] S. M. Limited, "STC15series MCU Data Sheet." [Online]. Available: <https://www.stmicro.com/datasheet/STC15F2K60S2-en.pdf>
- [11] Y. Dwivedi, S. Singh, S. Nikam, and J. Khot, "STUDY OF MICROCONTROLLER 8051," *IJRAR-International J. Res. Anal. Rev.*, vol. 7, no. 2, pp. 58-65, 2020.
- [12] ARM Developer, "µVision GUI." [Online]. Available: <https://developer.arm.com/documentation/101407/0540/User-Interface/uVision-GUI?lang=en>
- [13] ARM, "Getting Started with MDK: Create Applications with µVision 5." Keil. [Online]. Available: <https://www2.keil.com/docs/default-source/default-document-library/mdk5-getting-started.pdf>, 2016.
- [14] M. A. Najib, A. Syuhada, W. D. Irfianton, and S. Sulartopo, "Sistem Deteksi Kebakaran Menggunakan Esp32 Dan Arduino," in *Seminar Nasional Teknologi Dan Multidisiplin Ilmu (SEMNASTEKMU)*, 2023, pp. 211-218.
- [15] P. Sokibi and R. A. Nugraha, "Perancangan Prototype Sistem Peringatan Indikasi Kebakaran Di Dapur Rumah Tangga Berbasis Arduino Uno," *J. Digit Digit. Inf. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 11-22, 2020.
- [16] J. Mulyono and E. Apriaskar, "S Simulasi Alarm Kebakaran Menggunakan Sensor Mq-2, Falme Sensor Berbasis Mikrokontroler Arduino," *Elkom J. Elektron. dan Komput.*, vol. 14, no. 1, pp. 16-25, 2021.
- [17] M. A. Wijaya, R. N. Ikhsan, and E. Sugianto, "Analisis Perbandingan Kinerja Antara Sensor Api Flame 5 Channel Dengan Sensor Asap MQ2," *Bull. Inf. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 231-238, 2022.
- [18] A. W. Biantoro, R. Anggraini, and S. Subekti, "Pengembangan Alat Deteksi Dini Asap Dan Kebocoran Gas Pada Tabung Lpg, Pencegah Kebakaran Skala Rumah Tangga," *Fakt. Exacta*, vol. 13, no. 2, pp. 113-124, 2020.
- [19] A. Gautam, G. Verma, S. Qamar, and S. Shekhar, "Vehicle pollution monitoring, control and challan system using MQ2 sensor based on internet of things," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 116, pp. 1071-1085, 2021.
- [20] Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Jawa Barat, "Prosedur Peringatan Dini dan Prosedur Evakuasi Keadaan Darurat." [Online]. Available: <https://esdm.jabarprov.go.id/prosedur-peringatan-dini-dan-prosedur-evakuasi-keadaan-darurat/>, 2020.

Innovative Automatic Winding for Transformers: An Efficient Solution for Modern Transformer Production

Inovasi Winding Otomatis pada Transformator: Solusi Efisien untuk Produksi Transformator Modern

Mardiansyah¹, Heri Kusnadi², Firman Amir³

¹ Universitas Pamulang; email: dosen10094@unpam.ac.id

^{2,3,4,5} Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Pamulang; email: ²dosen00931@unpam.ac.id, ³dosen10095@unpam.ac.id

[Dikirimkan: 6 January 2025, Direvisi: 23 May 2025, Diterima: 26 May 2025]

Corresponding Author: Mardiansyah

ABSTRACT — *The advancement of electronic technology has significantly impacted human lifestyles, including the development of transformers. Although transformer winding machines have existed previously, the process remains manual and prone to errors. To address this issue, this study focuses on developing an automated copper wire winding system for transformers. The research employs a research and development method, resulting in the design and construction of an automatic transformer winding system. The device utilizes an Arduino microcontroller as its processor and a proximity sensor to detect the number of wire turns. During testing, voltage and current measurements were conducted on transformers produced by the automatic winding machine. The results indicate that the voltage error ranges from approximately 0.16% to 0.9%, while the current error is around 1.5%. By using this automated transformer winding machine, the transformer production process becomes more efficient, accurate, and time-saving. Thus, this tool has the potential to serve as an effective solution for the production of power and distribution transformers for electrical networks.*

KEYWORDS — Teknologi Elektronika, Winding Transformator, Sistem Automasi, Mikrokontroler, Sensor

INTISARI — Perkembangan teknologi elektronik telah membawa dampak besar pada gaya hidup manusia, termasuk dalam pembuatan transformator. Meskipun telah ada alat penggulung transformator sebelumnya, prosesnya masih manual dan rentan kesalahan. Untuk mengatasi masalah ini, penelitian ini fokus pada pengembangan sistem otomatis alat penggulung kawat tembaga untuk transformator. Penelitian ini menggunakan metode research and development dengan menghasilkan rancang bangun winding otomatis pada transformator. Alat ini menggunakan mikrokontroler Arduino sebagai pemrosesnya dan sensor proximity untuk mendeteksi jumlah gulungan kawat. Dalam pengujian alat, dilakukan pengukuran tegangan dan arus pada transformator yang dihasilkan oleh alat penggulung otomatis. Hasilnya menunjukkan bahwa kesalahan tegangan adalah sekitar 0,16% hingga 0,9%, dan kesalahan arus adalah sekitar 1,5%. Dengan menggunakan alat penggulung transformator otomatis ini, proses pembuatan transformator menjadi lebih efisien, akurat, dan menghemat waktu. Sehingga, alat ini berpotensi menjadi solusi yang efektif dalam produksi transformator daya dan distribusi untuk jaringan listrik.

KATA KUNCI — Electronic Technology, Transformer Winding, Automated System, Microcontroller, Sensor

I. INTRODUCTION

Technology has evolved gradually along with the advancement of culture and civilization [1]. The development of technology and science has led to innovations in various areas of human life [2]. Today, technological progress is rapidly advancing across almost all fields [3]. In the realm of electronics and communications, this advancement provides numerous benefits that are widely felt by society [4]. Electrical engineering plays a crucial role in designing control systems, load regulation algorithms, and communication infrastructure necessary to optimize the operation of smart grids [5].

Transformers are vital and costly assets in electrical grids [6]. Maintaining transformers, particularly power transformers, is an ongoing process that must be carried out continuously [7]. Overvoltage or voltage surges are critical phenomena for transformers [8]. Power transmission from solar panels to the grid is achieved using step-up transformers [9].

The objective of feature selection in transformer design problems is to reduce computational complexity and improve the manufacturing process [10]. Voltage and current measurements are conducted on the primary winding of the transformer, the voltage source, and capacitors [11]. The design of power and distribution transformers is a tedious and time-consuming task that requires solving numerous equations while considering technical constraints [12].

One example of the application of this technology is in automatic copper wire winding machines, used to wind transformers, dynamos, and electric motors. While there were already machines for winding transformers, the process was still manual, relying on hand-powered rotation and an analog counter to count the desired number of turns. To overcome this limitation, an automated system needs to be developed to simplify the process. This automated copper wire winding system aims to reduce the errors commonly encountered in conventional or manual winding. Furthermore, using an automated system will save time in the manufacturing process.

The coil winding machine is a tool used to assist human workers in winding wire during transformer manufacturing. Wire winding technology, in electrical engineering, refers to the process of creating electromagnetic coils. These coils are used as circuit components to generate magnetic fields in electrical machines such as motors and generators, as well as in the manufacturing of sound equipment like microphones. The shape and dimensions of the coil are designed to meet specific objectives.

Wire winding can be made more efficient by minimizing the material and volume required for the coil winding process. This can be achieved by considering the conductor area ratio, a winding space known as the filling factor. Several types of coils have been proposed for dynamic wireless power transfer [13]. For triangular coils, they exhibit adequate mechanical strength under cyclotron core conditions with air [14]. The quality factor of high-temperature superconducting (HTS) coils is maximized when the radial gap between turns is nearly equal to the width of the HTS wire, and it increases as the coil length extends in the longitudinal direction [15]. Mathematical analysis of the electromagnetic processes in the proposed devices is used to describe work efficiency [16].

To design an efficient transformer, it is necessary to consider environmental conditions, site-specific factors, weight, load curves, energy transients, and cable connections [17]. A hybrid wind-solar transformer is used to step up the voltage generated by solar and wind sources to match the grid voltage [18]. The transformers covered in this document meet the relevant requirements specified in the IEC 60076 standards or IEEE C57 standards [19]. Repeated transients can cause high voltage spikes in wind turbine step-up transformers, which can degrade the transformer's paper-oil insulation system [20].

Microcontrollers are characterized by high performance and low cost [21]. Arduino-based microcontrollers offer an energy efficiency of 95.88%, while the 8051 microcontroller has an energy efficiency of only 81.42% [22]. Wireless microcontroller-based power meters have been widely developed [23]. A microcontroller is a small computer encapsulated in the form of an Integrated Circuit (IC) chip, designed to perform specific tasks or operations [24]. Mikrokontroler biasanya juga mencakup komponen pendukung sistem minimal yang terdiri dari mikroprosesor, memori, dan antarmuka I/O, sedangkan mikroprosesor biasanya hanya menyertakan CPU [25].

II. METHODOLOGY

The research design to be implemented will utilize the research and development (R&D) method. This method was chosen as it aligns with the objective of the study, which is to produce a specific product. The product to be developed is an automated winding prototype for transformers. The design and development of this automatic transformer winding tool will begin with a preparatory phase, involving a literature review on the components and programming required. This will be followed by the design phase, which integrates an electric motor as the main driver, a stepper motor for coil shifting, an LCD for display purposes, a proximity sensor to detect the number of coils, and a microcontroller serving as the processing unit.

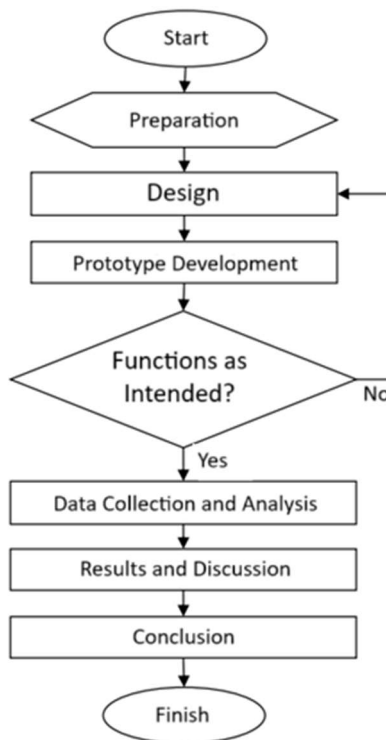


Figure 1. Flowchart of Research

The design phase is divided into two key aspects: hardware design and software design. Before delving into the theoretical concepts, it is essential to first understand the overall schematic of the circuit used in the automatic transformer winding machine. This schematic serves as the foundation for both hardware and software integration. To provide a clearer understanding of the system's operation, the schematic diagram of the automatic transformer winding machine is presented below, which illustrates how both design elements come together to ensure the machine's functionality.

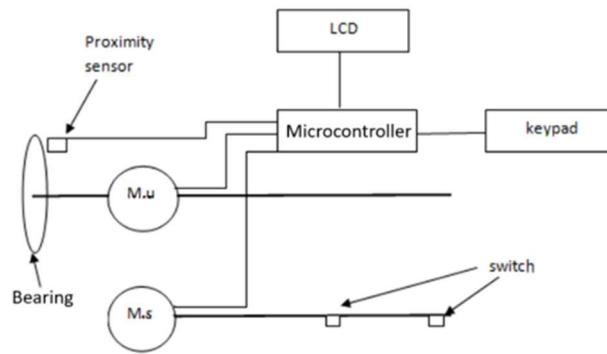


Figure 2. Wiring Diagram

In hardware design, the process begins with the development of a block diagram that outlines the system's structure and interactions. Following this, the design of the device proceeds by selecting and integrating various components, such as sensors, controllers, and actuators. These components are carefully chosen and assembled to ensure seamless operation and coordination. Ultimately, this design allows the automatic transformer winding machine to function mechanically, enabling it to perform its tasks efficiently and accurately. The entire process is crucial for ensuring that all hardware components work together in harmony to support the machine's intended functions.

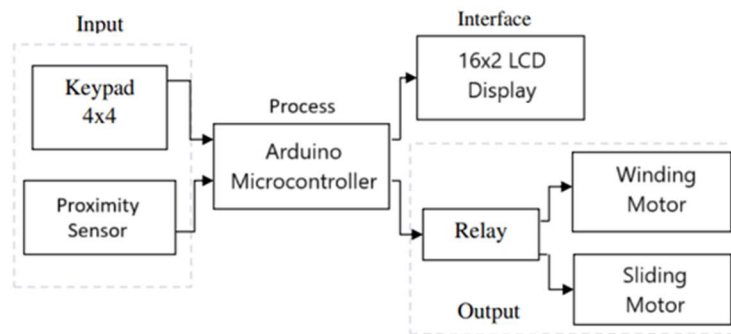


Figure 3. Circuit Working Diagram

In the software design process, the program is embedded into the microcontroller to ensure the proper functionality of the machine. This step is crucial as it allows the microcontroller to execute the necessary instructions that control the system's operations. To better illustrate the design, a block diagram will be presented, which outlines the various components and their interactions within the system. This diagram serves as a visual representation of how the software is structured and how different modules communicate with each other to achieve the desired outcome. Through this explanation, the goal is to provide a clear understanding of the software design and its role in the overall system functionality.

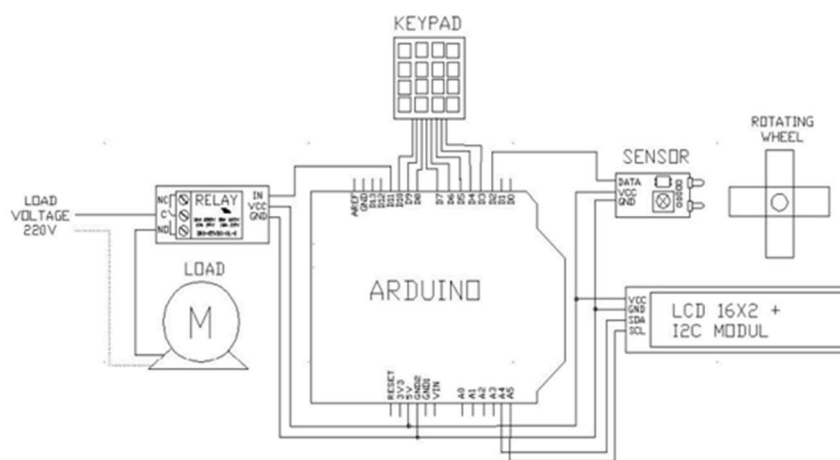


Figure 4. Design of Automatic Transformer Winding Machine

The Figure 4 illustrates the circuit design of an automatic winding control system based on Arduino. The system utilizes a keypad as an input interface for entering the desired number of coil turns, a sensor to detect the rotation of the wheel, and a 16x2 LCD module with an I2C interface to display information such as the number of turns and system status. The Arduino acts as the central controller, processing inputs from both the keypad and the sensor, and controlling the motor operation via a relay module

connected to a 220V AC load. The motor drives the rotating wheel to perform the winding process, while the sensor continuously monitors the actual number of turns to ensure they match the inputted value. This integrated system enables precise, efficient, and user-friendly control of the winding process, contributing to improved production quality and automation in transformer manufacturing.

The system requires an AC voltage of 220 volts and several DC voltages of 12 volts and 5 volts. The power supply circuit starts with a transformer that steps down the 220V AC to 12V AC. This 12V AC is then rectified using four diodes (D1, D2, D3, and D4, each with the code 1N4001) configured in a bridge rectifier arrangement. After rectification, the voltage is filtered by an electrolytic capacitor rated at 2200 μ F/25V, producing a smooth 12V DC output. The 12V DC output serves two purposes, it powers the relay module, which controls the AC motor for the winding machine, and it activates the sliding mechanism for wire placement. To obtain a stable 5V DC for low-voltage components, a 7805 voltage regulator IC is used to step down the 12V DC to 5V DC. The 5V supply powers the Arduino microcontroller (the main controller), the proximity sensor, the LCD (16x2 I2C), and the relay control circuitry. The relay coil also uses the 5V control voltage but switches 220V AC to drive the motor.

The research was carried out by four lecturers from the Electrical Engineering Study Program at Pamulang University, aiming to explore advancements in the field of electronics. The study took place in the Electronics Laboratory of Pamulang University, a facility equipped with various instruments and technologies that supported the research activities. Conducted over a six-month period, from November 2023 to April 2024, the research involved systematic experiments, data collection, and analysis to ensure comprehensive and reliable results. Throughout the project, the team collaborated closely, combining their expertise to address challenges and refine their methodologies, contributing valuable insights to the development of electrical engineering studies.

In the research data analysis was conducted through several structured stages, starting with data collection using direct observation and performance testing of the automatic winding prototype. Data were collected by recording the number of coil turns, winding speed, and accuracy under various operational conditions. Each experimental condition was tested five times to ensure consistency and reliability. To analyze the data, descriptive statistical techniques such as mean, standard deviation, and percentage error calculations were applied, allowing the researchers to measure the system's precision and efficiency. Furthermore, inferential statistics, specifically ANOVA (Analysis of Variance), were employed to determine whether differences between experimental conditions were statistically significant. Experiments were repeated at different times and under slightly varied conditions to verify the reproducibility of results, ensuring that the automatic winding innovation consistently met production quality standards for modern transformers.

III. RESULTS

The design results for this research demonstrate notable advancements compared to existing automatic transformer winding systems. This innovation focuses on enhancing the precision, consistency, and operational efficiency of coil production beyond the capabilities of conventional automated machines, which often face limitations in adaptability and real-time process control. By integrating a programmable controller (Arduino-based) with sensor feedback (proximity sensor and rotational tracking), the system ensures dynamic adjustment and monitoring during the winding process, reducing production errors and improving coil uniformity. Compared to other automated winding systems that typically rely on pre-set mechanical settings without feedback loops, the proposed design offers superior flexibility and responsiveness. This advancement not only increases productivity but also aligns with the evolving industrial demands for smarter, more cost-effective, and higher-quality transformer manufacturing solutions.

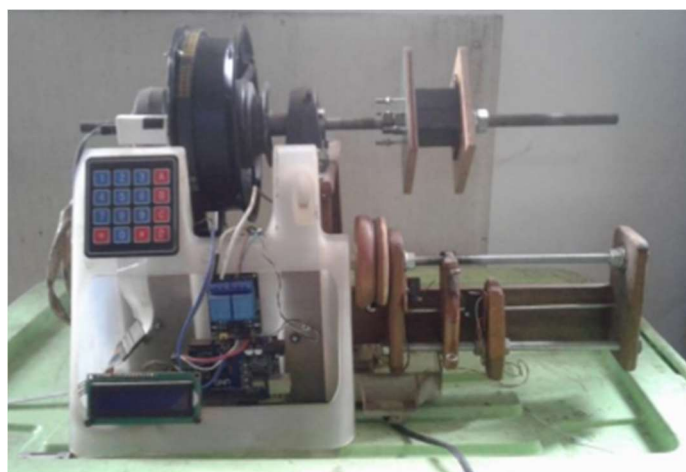


Figure 5. Automatic Winding

The next stage is the manual calibration of the tool using measuring instruments to check voltage, rotation speed, and other parameters. This step aims to prepare benchmark points for data collection. The aspects analyzed during data collection include testing the precision and functionality of the tool after its completion. These aspects involve analyzing the accuracy of the number of windings in the automatic transformer winder by comparing the set rotations with the actual rotations, the thickness of the wire

used, the rotation speed, the time required for winding, and the impact of the cross-sectional size of the transformer core on the performance of the automatic transformer winder. The collected data is then analyzed using descriptive statistical analysis.

The results of this study directly validate the methodology used in the design of the automatic winding system for transformers. Voltage testing at various values showed that the error in voltage measurement remained within an acceptable range, with an average error of 2.7% at 5V and 4.9% at 12V. This indicates that the automatic winding system effectively maintained voltage stability in accordance with the desired parameters. Furthermore, RPM measurements on the main motor and sliding motor also demonstrated consistency in rotational speed, with the average RPM closely matching the desired value. These steps demonstrate that the manual calibration method and the use of precise measuring instruments ensured the system functioned according to the specifications.

When compared with similar research in the field of transformer manufacturing, the results obtained show slightly higher errors, particularly in the measurement of winding count. For instance, a study by Deng et al. (2021) on a PLC-based automatic winding system reported winding errors of only 3-5%, which is lower than the 9.14% error observed in this study. Nevertheless, these results are still acceptable within the context of automatic transformer production, which prioritizes efficiency and consistency over absolute accuracy. Performance metrics such as winding duration and the number of turns also show better efficiency compared to manual methods.

According to research by Ewert et al. (2021), while the manual winding system required an average of 58 minutes with a 4.8% error rate for 500 turns using 0.2 mm wire, and the semi-automatic system completed the same task in 9.5 minutes with a 1.2% error rate, the automatic winding system in this study was able to complete 836 turns (with a thinner wire, 0.15 mm) in just 1.7 minutes. This demonstrates a significant improvement in time efficiency, although the winding error rate (9.14%) is higher, which may be attributed to factors such as more complex windings and sensor resolution limitations, highlighting the need for further optimization to balance speed and accuracy.

Further analysis of the causes of discrepancies, such as deviations in winding count and voltage inaccuracies, can be linked to several technical factors, such as the resolution of the sensors used, motor precision in speed control, and inaccuracies in the motor's stopping mechanism. These inaccuracies could be due to friction in mechanical components or position drift of the motor after several rotations. When compared to manual winding systems, this design offers significant improvements in consistency and production time. Although there are still some deviations, the innovation in utilizing automation technology demonstrates great potential for enhancing the overall efficiency of transformer production.

IV. DISCUSSION

The calibration of the device is performed manually using measurement tools to check voltage, rotational speed, and other parameters, establishing reference points for data collection. The analysis involves evaluating the device's precision and functionality after assembly, including assessing the accuracy of the coil count on the automatic transformer winder by comparing the set rotation count with the actual count. Additional factors analyzed include the thickness of the wire used, rotational speed, winding time, and the effect of the transformer core's cross-sectional size on performance. Furthermore, samples are created to test the winder's capability to produce functional transformers that meet specific current and voltage requirements.

TABLE I
 TESTING AT 5V VOLTAGE

Trial Number	Measured Voltage Result	Error Percentage
1	5.14 V	2.7 %
2	5.13 V	2.5 %
3	5.12 V	2.3 %
4	5.14 V	2.7 %
5	5.15 V	2.9 %
Average Value	5.14 V	2.7 %

TABLE II
 TESTING AT 12V VOLTAGE

Trial Number	Measured Voltage Result	Error Percentage
1	11.44 V	4.9 %
2	11.43 V	5.0 %
3	11.44 V	4.9 %
4	11.45 V	4.8 %
5	11.45 V	4.8 %
Average Value	11.44 V	4.9 %

Before proceeding with further testing, initial measurements were carried out on both the main motor and the sliding motor to ensure their proper functioning and reliability. A tachometer was used to measure the rotational speed of the motors, providing precise data to assess their performance. This step is crucial to identify any potential issues and ensure that the motors operate within the required specifications. By obtaining accurate measurements at this stage, the testing process can be conducted more effectively, minimizing errors and ensuring reliable results in subsequent testing phases.

TABLE III
 RPM MEASUREMENT WITH TACHOMETER ON MOTOR

Motor Type	Trial Number	RPM	Average
Main Motor	1	500.7	500.2
	2	500.1	
	3	499.0	
Sliding Motor	1	376.0	372.0
	2	378.0	
	3	362.0	

The next comparison examines the results derived from both datasets, which include the measurements of the rotation readings on the device and the actual number of coils wrapped around the transformer core. This comparison is crucial for assessing the accuracy and consistency of the data obtained from the device readings in relation to the real-world number of coils, which ultimately helps in understanding the performance and efficiency of the transformer during operation. By analyzing these two sets of data, a more comprehensive evaluation of the system’s functionality can be made, ensuring the alignment between theoretical and practical outcomes.

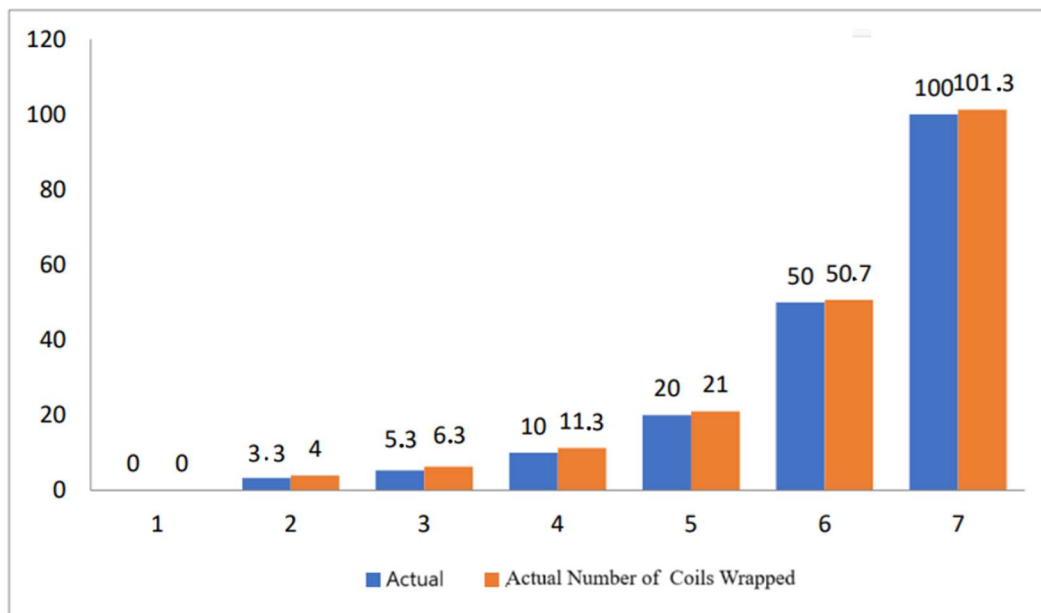


Figure 6. Graph Comparing the Values Between Actual and Total Coils Wrapped

From Figure 6, it can be observed that there is a discrepancy between the winding measured by the sensor and the actual number of windings. The discrepancy ranges from 0.7 to 1.3 turns, with an average difference of 0.8 turns and an error rate of 9.14%. This discrepancy may be attributed to several factors, such as slippage of the spool during winding, inaccuracies in the motor's stopping position, or other related issues.

The next stage of testing focuses on the Winding Duration of the Device. This test aims to evaluate the time required for the device to complete a single winding cycle under various operational conditions. The results are critical for assessing the device's efficiency and consistency, particularly in maintaining precision over multiple cycles. Factors such as motor speed, sensor accuracy, and potential delays caused by mechanical components are carefully analyzed. Any deviations or inefficiencies identified during this phase will provide valuable insights for further optimization of the device’s performance.

TABLE IV
 WINDING DURATION OF THE DEVICE

Voltage	Wire Size	Set	Actual	Duration	RPM
Primary 220 V	0,15	836	836	1 minute 42.20 second	498
Secondary 6 V	0,7	23	23	4.24 second	497.5
9 V		12	12	3.43 second	497.2
12 V		12	12	3.47 second	497.4

From Table 4, it is evident that to wind the primary coil of 220 V, the winding tool is set to an input of 836 turns. The tool successfully completes the winding process precisely at 836 turns, with a total duration of 1 minute and 42.20 seconds. For the secondary coil of 6 V, which is set to an input of 23 turns, the actual winding process achieves exactly 23 turns within a duration of 4.24 seconds. Similarly, the winding processes for 9 V and 12 V are carried out as shown in the table above. For the 9 V coil, 35 turns are required, while the 12 V coil requires 46 turns. However, as indicated in Table 4, the number of turns for 9 V and 12 V is listed as 12 turns because, to achieve the desired voltage, only additional turns are needed to build upon the previous winding.

V. CONCLUSION

This study presents notable advancements in transformer manufacturing optimization through the development of a fully automated winding system designed to improve precision, operational efficiency, and production consistency. By employing programmable microcontrollers and integrated sensor systems, the design effectively addresses persistent issues in manual winding processes, including time inefficiency, human error, and variability in coil quality. The research methodology included initial calibration and systematic data collection by measuring key parameters such as voltage, rotational speed, and winding count accuracy, establishing a robust baseline for performance evaluation. Experimental results revealed an average winding error rate of 9.14%, primarily attributed to minor spool slippage and motor deceleration inconsistencies. Performance assessments confirmed the system's capability to achieve target winding specifications across varying voltage conditions with minimal deviation between programmed and actual coil counts. Reliability evaluations through RPM monitoring and cycle time measurements further validated the system's operational stability and efficiency. Despite minor deviations, the prototype demonstrated strong reliability and scalability, presenting a cost-effective solution aligned with the increasing demand for automation in modern transformer production. Future developments may include the integration of Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) technologies to enable real-time system monitoring, predictive fault detection, and autonomous adjustment, thereby enhancing adaptive manufacturing capabilities. Commercialization opportunities also exist by adapting the system for various transformer specifications and production volumes. Distinct from previous research primarily centered on manual or semi-automated solutions, this innovation uniquely integrates full automation with real-time feedback and modular scalability, establishing a new standard for smart transformer manufacturing systems.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this paper.

REFERENCE

- [1] F. Tamimi and S. Munawaroh, "Teknologi Sebagai Kegiatan Manusia Dalam Era Modern Kehidupan Masyarakat," *Saturnus: Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi*, vol. 2, no. 3, pp. 66–74, Jul. 2024, doi: 10.61132/saturnus.v2i3.157.
- [2] R. Wulandari, "Dampak Perkembangan Teknologi dalam Pendidikan," *Jurnal PGSD Indonesia*, vol. 9, no. 2, pp. 66–72, Dec. 2023.
- [3] M. Rizky, S. A. Fadillah, J. Juniwan, M. Y. Habibi, and D. Aribowo, "Perkembangan Teknologi Jaringan 5G di Indonesia," *Jupiter*, vol. 2, no. 3, pp. 58–68, Apr. 2024.
- [4] E. Fuad, M. Unik, and H. A. Suseno, "Penerapan Internet of Things pada Sistem Pengendalian Barang Elektronik Rumah dan Suhu Ruang," *Jurnal Fasilkom*, vol. 9, no. 2, pp. 381–386, Aug. 2019.
- [5] D. Purwoko, "Peran Teknik Elektro dalam Pengembangan Sistem Konversi Energi Terbarukan Otonom di Lingkungan Dinamis," *Jurnal Repoteknologi*, vol. 2, no. 4, 2022.
- [6] M. H. Hashemi, U. Kiliç and S. Dikmen, "Applications of Novel Heuristic Algorithms in Design Optimization of Energy-Efficient Distribution Transformer," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 15968-15980, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3245327.
- [7] P. Junfithrana, L. Hakim, R. Nopiyanti and M. Muslih, "Improving TDGC on Oil Dissolved Transformer Gas Using Fuzzy Logic," *2020 6th International Conference on Computing Engineering and Design (ICCED), Sukabumi, Indonesia, 2020*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCED51276.2020.9415819.
- [8] E. Yükselen and I. Iskender, "Analysis of Lightning Impulse Effects on Three Winding Transformer Used in Solar System Based ANSYS Maxwell," *2022 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), Alanya, Turkey, 2022*, pp. 71-75, doi: 10.1109/ICEEE55327.2022.9772563.
- [9] A. Jahi and I. Iskender, "Analysis of Short Circuit Electromagnetic Force in a Three Winding Transformer Used in Solar System," *2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 2021*, pp. 393-397, doi: 10.23919/ELECO54474.2021.9677775.
- [10] M. H. Hashemi, U. Kiliç and S. Dikmen, "Application of Feature Selection in Distribution Transformer Design and Manufacturing Using Feed Forward Artificial Neural Network and Equilibrium Optimizer Algorithm," *2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Nevsehir, Turkiye, 2023*, pp. 163-167, doi: 10.1109/GPECOM58364.2023.10175790.
- [11] I. G. Ngurah Satriyadi Hernanda, I. Made Yulistya Negara, D. A. Asfani, D. Fahmi, N. I. Rifma and M. Wahyudi, "Experiment Based on Analysis of Series and Shunt Capacitance to Ferroresonance Response on Low Voltage Transformer," *2018 Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), Solo, Indonesia, 2018*, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPERE.2018.8739675.
- [12] M. H. Hashemi, U. Kiliç and S. Dikmen, "Hybrid Heuristic and Pattern Search Optimization Algorithm for Design Optimization of Energy Efficient Distribution Transformer," *2022 Global Energy Conference (GEC), Batman, Turkey, 2022*, pp. 329-334, doi: 10.1109/GEC55014.2022.9987023.
- [13] K. Hanawa, T. Imura, Y. Hori and N. Abe, "Comparison of Circular Coil, Double-D Coil, and 85 kHz Self-Resonant Coil in Road Embedment for Dynamic Wireless Power Transfer," *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Brussels, Belgium, 2022*, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON49645.2022.9968375.
- [14] T. Watanabe, S. Nagaya, A. Ishiyama, S. Noguchi, H. Ueda and G. Nishijima, "Mechanical Strength Evaluation of a Yoroi-Coil Structured Non-Circular REBCO Pancake Coil in High Magnetic Field," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 6, pp. 1-5, Sept. 2022, Art no. 4600605, doi: 10.1109/TASC.2022.3149232.
- [15] R. Inoue, Y. Inoue, H. Ueda and S. Kim, "Investigation of HTS Coil Structure Robustness Against Misalignment Between Coils in a Wireless Power Transmission System for Railway Vehicles," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 33, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2023, Art no. 3600705, doi: 10.1109/TASC.2023.3252490.

- [16] V. V. Kokh, M. I. Petrov and D. V. Mostovoy, "Thyristors Balancing Voltage Regulator with Boost Voltage," *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, Magnitogorsk, Russian Federation, 2021, pp. 386-391, doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559603.
- [17] M. M. Ronderos, J. A. G. Segura and J. I. Mayayo, "Power Transformers for Wind Applications. Requirements and Challenges," *2019 6th International Advanced Research Workshop on Transformers (ARWtr)*, Cordoba, Spain, 2019, pp. 48-53, doi: 10.23919/ARWtr.2019.8930194.
- [18] B. C. Sujatha, T. V. Ramaswamy, R. R. Prabhu, N. Sumana, D. M. U and S. Z. Ismail, "Design of 100kVA energy efficient three phase hybrid transformer for combined application of solar and wind," *2018 4th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Mangalore, India, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/I2CT42659.2018.9058194.
- [19] IEC/IEEE International Standard - Power transformers - Part 16: Transformers for Wind Turbine Applications," *IEC/IEEE 60076-16 Edition 2.0 2018-09*, vol., no., pp.1-26, 28 Sept. 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8476640.
- [20] A. A. Devadiga and S. H. Jayaram, "The Influence of Repetitive Transient Parameters on the Distribution of Transients along the Transformer Winding," *2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Knoxville, TN, USA, 2020, pp. 309-312, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158685.
- [21] A. Conte et al., "An 18nm ePCM with BJT selector NVM design for advanced microcontroller applications," *2023 IEEE International Memory Workshop (IMW)*, Monterey, CA, USA, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/IMW56887.2023.10145983.
- [22] G. C. Sekhar and K. Vijayalakshmi, "Energy Efficient Street Light Controlling System on Detecting Vehicle Movement using Arduino Microcontroller in Comparison with 8051 Microcontroller," *2022 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES)*, Chennai, India, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSES55317.2022.9914314.
- [23] S. Soeharwinto, S. Agrath, Z. Pane and T. H. Nasution, "Benchmarking of Wireless Microcontroller-based Three Phase Multi Meter With Industrial Standard Instrument," *2019 3rd International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM)*, Medan, Indonesia, 2019, pp. 98-101, doi: 10.1109/ELTICOM47379.2019.8943844.
- [24] A. Junaedi, M. D. M. Puspitasari, and M. Maulidina, "Pengaruh (Intensor) Induktor Heater Menggunakan Thermal Sensor Berbasis Mikrokontroler Arduino Nano Dalam Mengolah Logam," *Jurnal NOE*, vol. 4, no. 2, pp. 169, Oct. 2021.
- [25] F. Zulfikar and A. Anas, "Perancangan sistem keamanan sepeda motor dengan RFID di Jurusan TSM SMKN 1 TirtaJaya," *Jurnal Informatika dan Teknologi Komputer*, vol. 2, no. 3, pp. 266-272, Nov. 2022.
- [26] L. Deng, H. Suo, and H. Ren, "Design of Insulation Tape Tension Control System of Transformer Winding Machine Based on Fuzzy PID," *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6512, 2021, doi: 10.3390/s21196512.
- [27] P. Ewert, T. Orłowska-Kowalska, and K. Jankowska, "Effectiveness Analysis of PMSM Motor Rolling Bearing Fault Detectors Based on Vibration Analysis and Shallow Neural Networks," *Energies*, vol. 14, no. 3, p. 712, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14030712.

Tinjauan Komprehensif: Simulasi Sistem *Disk Scheduling* dengan Berbagai Algoritma Menggunakan OS Sim

Comprehensive Review: Disk Scheduling System Simulation with Various Algorithms Using OS Sim

Fidel Lusiana Putri¹, Djuniadi², Febry Putra Rochim³

^{1,2,3} Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang;
email: ¹fidellusiana@students.unnes.ac.id, ²djuniadi@mail.unnes.ac.id, ³febry.putra@mail.unnes.ac.id

[Dikirimkan: hh Bulan 20xx, Direvisi: hh Bulan 20xx, Diterima: hh Bulan 20xx]
Corresponding Author: Fidel Lusiana Putri

INTISARI — Penjadwalan disk merupakan salah satu komponen penting dalam manajemen sumber daya sistem operasi untuk mengoptimalkan akses data pada perangkat penyimpanan. Sistem operasi menggunakan berbagai algoritma untuk mengatur permintaan input/output (I/O) agar lebih efisien, termasuk Shortest Seek Time First (SSTF), LOOK, dan Circular LOOK (C-LOOK). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja algoritma-algoritma tersebut dalam mengelola permintaan disk melalui simulasi menggunakan OS-SIM. Metodologi yang diterapkan mencakup simulasi antrian permintaan I/O acak pada disk dengan konfigurasi spesifik. Data yang dianalisis meliputi Total Head Movement (THM) dan Average Seek Time (AST) untuk setiap algoritma. Simulasi dilakukan dengan posisi awal kepala disk yang telah ditentukan, dan setiap algoritma diuji berdasarkan cara masing-masing mengatur urutan akses disk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma SSTF adalah yang paling efisien dengan nilai THM dan AST terendah, yaitu sebesar 208 track dan AST 29,71 ms, dibandingkan dengan algoritma LOOK dan C-LOOK. Algoritma LOOK memberikan keseimbangan antara efisiensi dan keadilan, karena mampu meminimalkan pergerakan kepala tanpa mengabaikan permintaan yang jauh. Sementara itu, C-LOOK lebih efektif dalam mengurangi kemungkinan starvation pada permintaan di ujung disk, namun dengan konsekuensi meningkatnya jumlah pergerakan kepala. Penelitian ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kelebihan dan kekurangan masing-masing algoritma, yang dapat dijadikan acuan dalam pemilihan algoritma penjadwalan disk pada sistem yang membutuhkan efisiensi dan keandalan tinggi dalam pengelolaan I/O.

KATA KUNCI — Penjadwalan Disk, OS Sim, SSTF, LOOK, C-LOOK

ABSTRACT — *Disk scheduling is one of the important components in operating system resource management to optimize data access on storage devices. Operating systems use various algorithms to manage input/output (I/O) requests more efficiently, including Shortest Seek Time First (SSTF), LOOK, and Circular LOOK (C-LOOK). This research aims to evaluate and compare the performance of these algorithms in managing disk requests through simulations using OS-SIM. The applied methodology includes simulating a queue of random I/O requests on disks with specific configurations. The data analyzed includes Total Head Movement (THM) and Average Seek Time (AST) for each algorithm. The simulation is performed with a predefined initial position of the disk head, and each algorithm is tested based on how each of them manages the disk access sequence. The results show that the SSTF algorithm is the most efficient with the lowest THM and AST values of 208 tracks and 29.71 ms AST, compared to the LOOK and C-LOOK algorithms. The LOOK algorithm provides a balance between efficiency and fairness, as it is able to minimize head movement without ignoring distant requests. Meanwhile, C-LOOK is more effective in reducing the possibility of starvation on requests at the end of the disk, but at the cost of increasing the number of head movements. This research provides a clearer picture of the advantages and disadvantages of each algorithm, which can be used as a reference in the selection of disk scheduling algorithms in systems that require high efficiency and reliability in I/O management.*

KEYWORDS — *Disk Scheduling, OS Sim, SSTF, LOOK, C-LOOK*

I. PENDAHULUAN

Sistem operasi adalah perangkat lunak terintegrasi yang sangat canggih, dirancang untuk menyediakan layanan manajemen sistem seperti manajemen proses, perangkat dan *file*, dengan mengelola semua sumber daya perangkat keras dan perangkat lunak [1], [2], [3]. Dalam upayanya mengelola berbagai tugas dan memastikan pemanfaatan sumber daya secara efisien, sistem operasi menerapkan berbagai algoritma penjadwalan, seperti penjadwalan CPU, penjadwalan *disk*, dan penggantian halaman [1], [2], [3], [4]. Algoritma-algoritma ini dirancang untuk mengatur dan mengoptimalkan kinerja sistem operasi dalam menangani berbagai jenis tugas.

Salah satu komponen penting dalam manajemen sumber daya komputer adalah sistem penjadwalan *disk*. Penjadwalan *disk* dilakukan oleh sistem operasi untuk menangani permintaan *input* dan *output* (I/O) yang tertunda pada *disk* [5], [6], [7]. Proses ini



melibatkan pengaturan semua permintaan memori berdasarkan indeks memori, yang merupakan kombinasi nomor trek, sektor, dan *platter*, agar dapat diselesaikan dengan lebih cepat [1], [8], [9]. Kinerja algoritma penjadwalan disk diukur berdasarkan waktu respons *disk*, yang mencakup berbagai komponen seperti waktu pencarian (*seek time*), latensi rotasi, waktu pemilihan *platter*, dan waktu transfer data [1], [7], [8], [9], [10].

Manajemen kinerja *disk* penting dalam sistem operasi karena perbedaan signifikan antara kecepatan prosesor dan memori utama dengan kecepatan *disk*. Kecepatan *disk* yang lebih lambat menjadi hambatan utama, terutama pada sistem dengan kepala baca/tulis yang bergerak, di mana waktu pencarian antar silinder memakan waktu signifikan, sehingga efisiensi penjadwalan *disk* sangat diperlukan [8], [10]. Penjadwalan *disk* yang baik dapat mengurangi waktu tunggu, meningkatkan *throughput*, dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya, sehingga memberikan pengalaman yang lebih responsif bagi pengguna [8], [9], [11]. *Disk scheduling* bertujuan untuk mengatur urutan akses permintaan data yang diterima oleh *disk*. Dalam prakteknya, sistem operasi harus memprioritaskan dan menentukan urutan permintaan *disk* untuk meningkatkan efisiensi [6], [7]. Berbagai algoritma telah dikembangkan untuk menyelesaikan masalah ini, dengan masing-masing memiliki keunggulan dan kekurangan dalam situasi yang berbeda.

Algoritma penjadwalan *disk* yang paling umum digunakan antara lain *First-In-First-Out* (FIFO), LIFO, *Shortest Seek Time First* (SSTF), SCAN, C-SCAN, LOOK, dan C-LOOK [1], [5], [7], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]. Setiap algoritma memiliki cara yang berbeda dalam memilih permintaan *disk* mana yang akan diproses terlebih dahulu. Algoritma LIFO (*Last-In-First-Out*) selalu memprioritaskan permintaan terakhir untuk diproses terlebih dahulu. Sementara itu, FIFO memproses permintaan berdasarkan urutan kedatangan tanpa memperhatikan jarak fisik kepala baca/tulis *disk*, yang bisa menyebabkan keterlambatan yang signifikan [1], [5], [9], [10], [11], [12], [13], [14]. SSTF memilih permintaan yang memiliki jarak terdekat dari posisi kepala, namun dapat menyebabkan *starvation* bagi permintaan yang lebih jauh [1], [5], [9], [10], [11], [12], [13]. SCAN dan C-SCAN lebih efisien dengan bergerak secara linier ke arah tertentu, kemudian membalik arah jika sudah mencapai ujung [1], [5], [9], [10], [11], [12], [13]. Algoritma LOOK adalah varian SCAN yang memeriksa apakah ada permintaan di arah pergerakan kepala *disk*, jika tidak ada, kepala *disk* dibalik ke arah sebaliknya. Sedangkan C-LOOK, mirip dengan C-SCAN, hanya bergerak sejauh yang diperlukan untuk melayani permintaan terakhir sebelum memulai putaran baru [1], [5], [9], [10], [11], [12], [13].

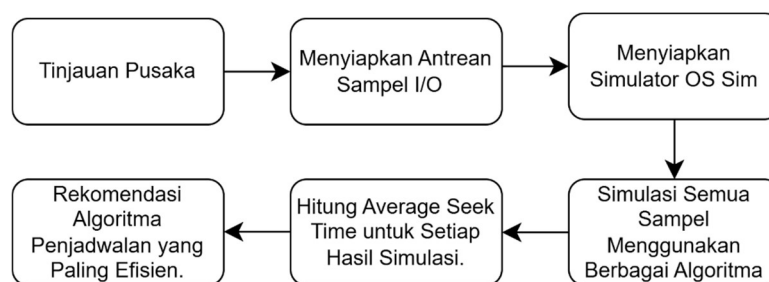
Simulasi sistem penjadwalan *disk* menggunakan berbagai algoritma penjadwalan ini dapat memberikan wawasan tentang kinerja masing-masing algoritma dalam kondisi yang berbeda [13], [17]. Melalui simulasi, kita dapat membandingkan efektivitas dan efisiensi masing-masing algoritma dalam mengelola permintaan akses *disk* pada sistem operasi. Penggunaan alat simulasi seperti OS Sim memungkinkan pengujian yang lebih mendalam dan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana berbagai algoritma bekerja dalam berbagai skenario.

Dalam simulasi ini, *disk* terdiri dari satu *platter*, 16 silinder, dan 12 sektor per silinder, yang totalnya mencapai 192 sektor. Setiap sektor diindeks mulai dari 0 di silinder terluar dan kepala *disk* bergerak untuk membaca atau menulis data pada sektor-sektor tersebut. Pengguna dapat menentukan posisi awal kepala *disk* dalam rentang 0 hingga 192 sektor.

Melalui penelitian ini, akan dilakukan simulasi untuk membandingkan kinerja algoritma penjadwalan *disk* menggunakan OS Sim. Algoritma yang akan diuji mencakup SSTF, LOOK, dan C-LOOK. Kinerja algoritma akan diuji berdasarkan berbagai metrik seperti waktu tunggu, waktu perputaran, dan kecepatan transfer data. Diharapkan, hasil simulasi ini dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai algoritma mana yang paling sesuai digunakan untuk berbagai jenis aplikasi dan kondisi operasional pada sistem operasi.

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini adalah eksperimen simulasi berbagai algoritma penjadwalan *disk*. Ada berbagai simulator sistem komputer yang tersedia dalam bidang sistem operasi, salah satunya adalah OS-SIM. OS-SIM dapat mensimulasikan berbagai perilaku dalam desain sistem operasi yang terdiri dari empat domain yaitu *Process Scheduling*, *Memory Management*, *File System*, dan *Disk Management* [18], [19], [20]. Sistem secara otomatis menghitung dan menunjukkan *Total Head Movement (THM)* dan *Average Seek Time (AST)* untuk setiap permintaan yang dilayani. OS-SIM dipilih sebagai simulator untuk menguji berbagai algoritma penjadwalan *disk* yang relevan. Selanjutnya, akan disiapkan antrean permintaan I/O yang disusun secara acak sebagai sampel. Semua sampel akan diuji menggunakan simulasi, dengan mencatat Total Pergerakan Kepala dan Waktu Pencarian Rata-rata, yang selanjutnya akan dianalisis lebih lanjut. Berdasarkan hasil pengujian berbagai algoritma, dilakukan perbandingan dan analisis mendalam terhadap data yang diperoleh, yang akhirnya akan menghasilkan rekomendasi berdasarkan temuan tersebut. Tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Analisis Metode

A. TINJAUAN PUSTAKA

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengkaji teori dan konsep dasar terkait algoritma penjadwalan disk. Fokus kajian meliputi prinsip kerja algoritma Shortest Seek Time First (SSTF), LOOK, dan Circular LOOK (C-LOOK), serta analisis kelebihan dan kekurangan masing-masing algoritma berdasarkan studi literatur yang relevan.

B. MENYIAPKAN ANTREAN SAMPEL I/O

Setelah melakukan kajian teori, disusun data antrean permintaan I/O yang bersifat acak, mencakup sektor dan silinder pada disk. Sampel ini disiapkan untuk dijadikan input yang konsisten dalam pengujian semua algoritma.

C. MENYIAPKAN SIMULATOR OS SIM

Simulator OS-SIM dipilih untuk melakukan simulasi penjadwalan disk. OS-SIM memungkinkan input data antrean I/O, pengaturan posisi awal kepala disk, dan pemilihan algoritma penjadwalan. Sebelum simulasi, dilakukan konfigurasi awal sesuai kebutuhan penelitian.

D. SIMULASI SEMUA SAMPEL MENGGUNAKAN BERBAGAI ALGORITMA

Antrean I/O yang telah disiapkan kemudian disimulasikan menggunakan tiga algoritma berbeda untuk membandingkan, yaitu SSTF, LOOK, dan C-LOOK. Proses ini bertujuan mengukur kinerja masing-masing algoritma berdasarkan antrean yang sama. Sebelum simulasi dilakukan, berikut adalah penjelasan cara kerja masing-masing algoritma yang akan diuji:

1) SHORTEST SEEK TIME FIRST (SSTF)

Algoritma SSTF memilih permintaan I/O yang jaraknya paling dekat dengan posisi kepala disk saat ini. Dengan memprioritaskan permintaan terdekat, SSTF dapat mempercepat waktu rata-rata pencarian (seek time) dan mengurangi total pergerakan kepala disk (Total Head Movement). Namun, kekurangannya adalah potensi terjadinya starvation pada permintaan yang jauh dari posisi kepala disk.

2) LOOK

Algoritma LOOK menggerakkan kepala disk hanya sejauh permintaan I/O yang ada di satu arah. Ketika tidak ada lagi permintaan di arah tersebut, kepala disk akan membalik arah untuk melayani permintaan di sisi lain. LOOK lebih efisien dibandingkan algoritma SCAN karena tidak memaksa kepala disk untuk bergerak sampai batas ujung disk yang kosong. Algoritma ini menyeimbangkan antara efisiensi pergerakan dan keadilan pelayanan permintaan.

3) CIRCULAR LOOK (C-LOOK)

Algoritma C-LOOK mirip dengan LOOK, tetapi kepala disk hanya bergerak dalam satu arah hingga mencapai permintaan terjauh, lalu kembali ke permintaan terdekat berikutnya tanpa melayani permintaan di jalur balik. C-LOOK bertujuan untuk mengurangi kondisi starvation dengan mengutamakan pelayanan yang lebih merata, meskipun total pergerakan kepala disk bisa lebih tinggi dibandingkan SSTF.

E. MENGHITUNG AST DAN THM

Setelah simulasi, dilakukan penghitungan Total Head Movement (THM) dan Average Seek Time (AST) untuk masing-masing algoritma. Perhitungan ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi pergerakan kepala disk dalam melayani permintaan.

F. MEMBERIKAN REKOMENDASI ALGORITMA PENJADWALAN DISK

Berdasarkan hasil analisis THM dan AST, ditentukan algoritma yang paling efisien. Rekomendasi ini diberikan berdasarkan kinerja terbaik dalam mengoptimalkan pergerakan kepala disk dan mempercepat waktu pelayanan permintaan I/O.

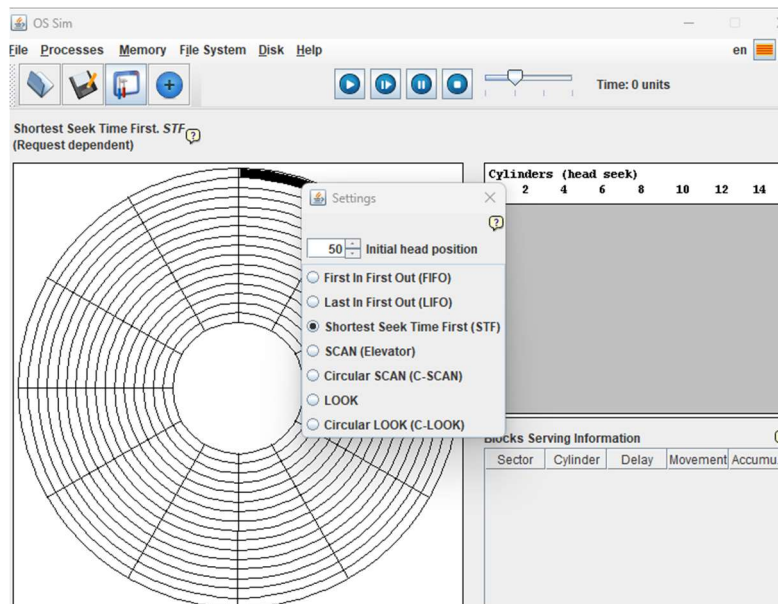
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam sistem operasi, penjadwalan *disk* memainkan peran penting dalam mengelola akses ke *disk* dan menentukan urutan eksekusi permintaan I/O. Salah satu tantangan utama dalam manajemen *disk* adalah meminimalkan pergerakan kepala *disk*, yang mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada simulasi sistem *disk scheduling* menggunakan berbagai algoritma penjadwalan yang diimplementasikan dalam OS-SIM. Berikut adalah data sampel antrean permintaan I/O yang akan digunakan untuk simulasi, perhatikan tabel I.

TABEL I
SAMPLE ANTRIAN I/O

Sector	Cylinder	Delay
82	6	0
170	14	0
43	3	0
140	11	0
24	2	0
16	1	0
190	15	0

Berdasarkan tabel I, data dimasukkan ke dalam simulasi untuk menguji berbagai algoritma penjadwalan *disk*. Setiap algoritma, seperti *Shortest Seek Time First* (SSTF), LOOK dan C-LOOK akan memproses antrian ini dengan cara yang berbeda, mengutamakan permintaan-permintaan yang dipilih sesuai dengan kriteria algoritma. Simulasi ini untuk mengukur *Total Head Movement* (THM) dan *Average Seek Time* (AST) yang dihasilkan oleh setiap algoritma berdasarkan antrian permintaan ini.

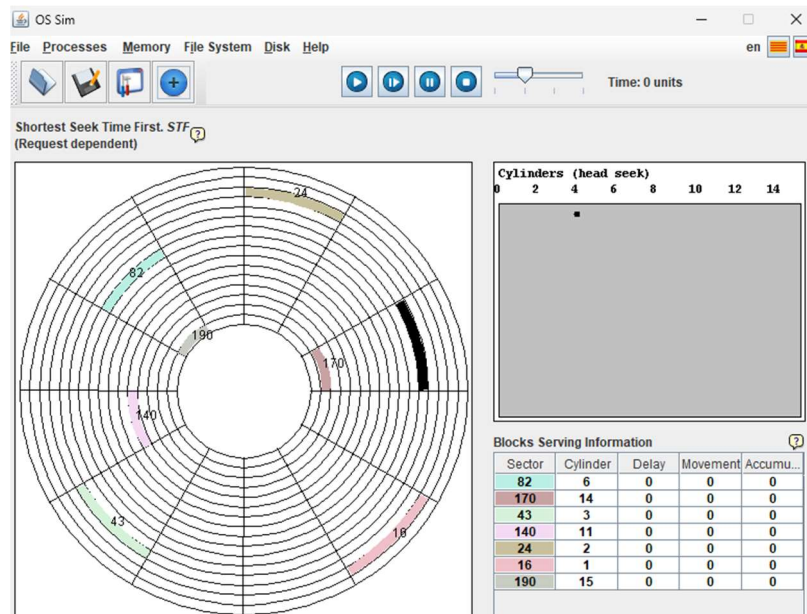


Gambar 2. Menentukan *Initial Head Position*

Dalam setiap simulasi yang dilakukan menggunakan OS-SIM, posisi awal kepala disk atau *initial head position* diatur pada sektor ke-50. Posisi awal ini berarti kepala *disk* mulai bergerak dari sektor 50 pada silinder yang sesuai, dalam hal ini sektor 50 terletak pada silinder yang sesuai dengan posisi sektor tersebut di *disk*, perhatikan gambar 2.

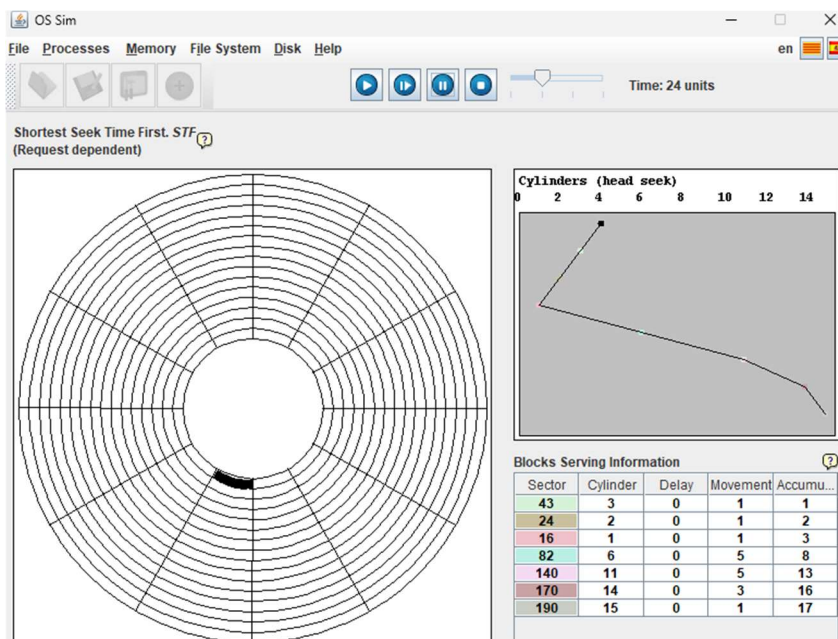
A. SHORTEST SEEK TIME FIRST (SSTF)

Algoritma SSTF mulai dengan mengurutkan seluruh permintaan I/O berdasarkan urutan yang meningkat, kemudian menghitung waktu pencarian kepala *disk* untuk setiap permintaan, dan memilih permintaan dengan waktu pencarian paling singkat. Dengan demikian, SSTF dapat mempercepat waktu respons rata-rata, yang pada gilirannya meningkatkan tingkat *throughput* [8]. Namun, kelemahan utama dari SSTF adalah kecenderungannya untuk selalu memilih permintaan dengan waktu pencarian terpendek, yang bisa menyebabkan permintaan dengan waktu pencarian lebih lama tidak terlayani tepat waktu, atau yang dikenal dengan istilah *starvation* [10]. Dalam simulasi ini kepala *disk* memulai pergerakan dari sektor 50 dan kemudian bergerak sesuai dengan algoritma SSTF, yang memilih permintaan dengan waktu pencarian terpendek dari posisi kepala *disk* saat ini.



Gambar 3. Mengisi Request

Pada grafik *disk* yang ditampilkan, setiap sektor yang terlibat dalam simulasi ditandai dengan warna yang berbeda. Posisi sektor-sektor ini terlihat pada lingkaran-lingkaran yang mewakili silinder di *disk*, perhatikan gambar 3.



Gambar 4. Hasil Simulasi SSTF

Hasil simulasi *Shortest Seek Time First* (SSTF) yang ditampilkan menunjukkan bagaimana algoritma ini melayani permintaan I/O dengan memilih permintaan yang memiliki waktu pencarian terpendek dari posisi kepala *disk* saat ini, perhatikan gambar 4.

TABEL II
 HASIL SIMULASI SSTF

Shortest Seek Time First		
Served Sector	Movement	Accumulated Movement
43	1	1
24	1	2
16	1	3
82	5	8
140	5	13
170	3	16
190	1	17

Berdasarkan pergerakan sektor yang ditunjukkan pada tabel II, dapat dihitung THM dengan menjumlahkan jarak yang ditempuh untuk setiap permintaan:

$$THM = (43 - 50) + (24 - 43) + (16 - 24) + (82 - 16) + (140 - 82) + (170 - 140) + (190 - 170)$$

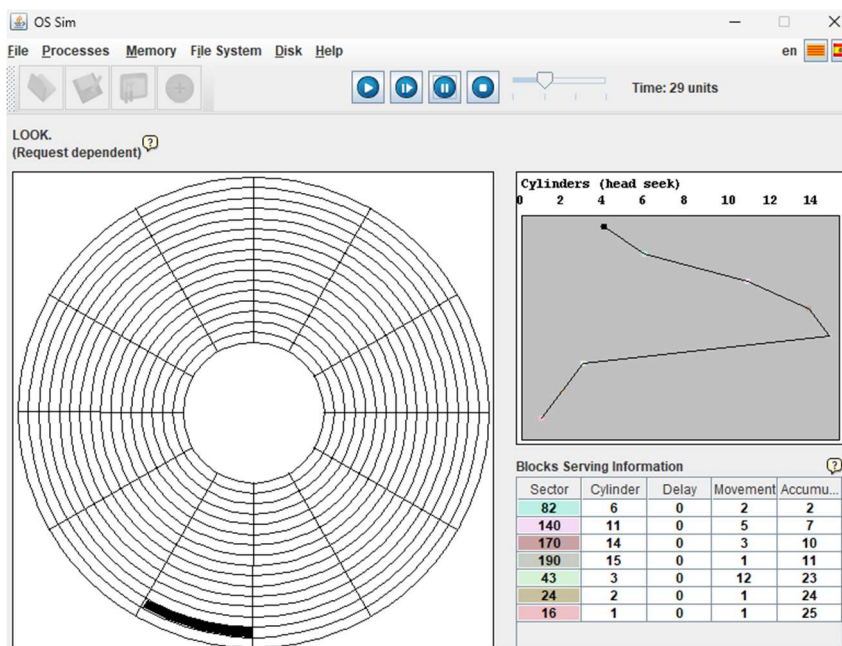
$$THM = 7 + 19 + 8 + 66 + 58 + 30 + 20 = 208 \text{ track}$$

Dalam hal ini, ada 7 permintaan yang dilayani. Jadi, AST dapat dihitung sebagai berikut:

$$AST = 208 / 7 \approx 29.71 \text{ ms}$$

B. LOOK

LOOK merupakan pengembangan dari algoritma SCAN yang menawarkan waktu pencarian lebih efisien, di mana kepala *disk* hanya bergerak sejauh permintaan I/O yang ada tanpa melampaui batas tersebut. Algoritma ini mampu mengurangi kondisi *starvation*, mengoptimalkan waktu tunggu, dan memberikan respons yang lebih konsisten [8], [10].



Gambar 5. Hasil Simulasi LOOK

Hasil simulasi menggunakan algoritma LOOK yang ditampilkan pada gambar di atas menunjukkan bagaimana algoritma ini mengelola pergerakan kepala *disk* dengan cara melayani permintaan I/O berdasarkan arah pergerakan kepala *disk* tanpa melampaui permintaan yang ada dalam antrean, perhatikan gambar 5.

TABEL III
HASIL SIMULASI LOOK

LOOK		
Served sector	Movement	Accumulated Movement
82	2	2
140	5	7
170	3	10
190	1	11
43	12	23
24	1	24
16	1	25

Berdasarkan pergerakan sektor yang ditunjukkan pada tabel III, dapat dihitung THM dengan menjumlahkan jarak yang ditempuh untuk setiap permintaan:

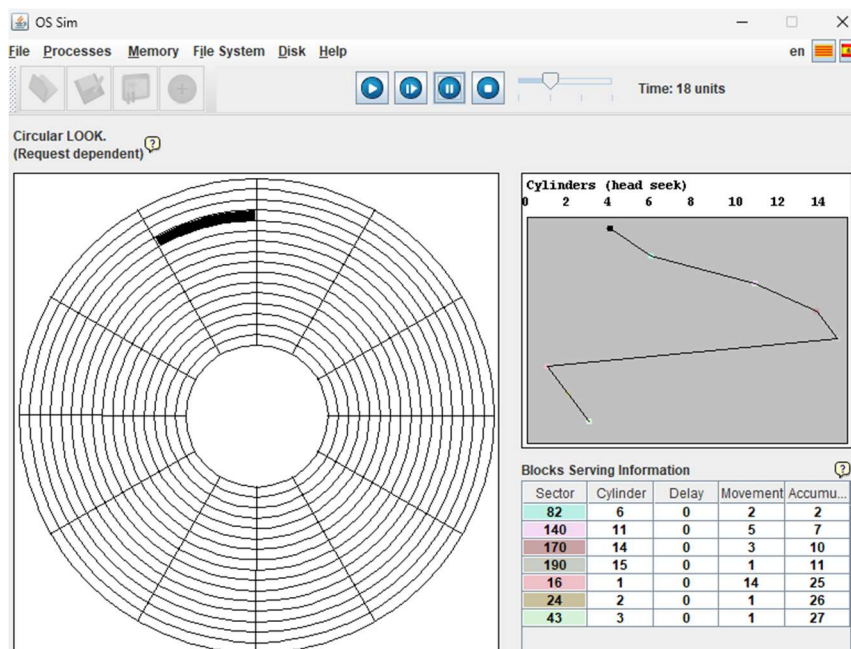
$$THM = (82 - 50) + (140 - 82) + (170 - 140) + (190 - 170) + (1900 - 43) + (43 - 24) + (24 - 16)$$

$$THM = 32 + 58 + 30 + 20 + 147 + 19 + 8 = 314 \text{ track}$$

Dalam hal ini, ada 7 permintaan yang dilayani. Jadi, AST dapat dihitung sebagai berikut:
 $AST = 314 / 7 \approx 44.85 \text{ ms}$

C. CIRCULAR LOOK

C-LOOK adalah penyempurnaan dari algoritma C-SCAN yang menawarkan waktu pencarian sedikit lebih efisien. Meskipun cara kerjanya mirip dengan C-SCAN, di mana kepala *disk* tidak melayani permintaan saat bergerak kembali dari ujung, C-LOOK berhenti hanya setelah mencapai permintaan terakhir dalam antrean [8].



Gambar 6. Hasil Simulasi C-LOOK

Hasil simulasi menggunakan algoritma *Circular LOOK* (C-LOOK) yang ditampilkan pada gambar di atas menggambarkan bagaimana algoritma ini mengelola pergerakan kepala *disk* dengan cara yang lebih efisien dibandingkan algoritma SCAN dan LOOK. Berikut penjelasan mengenai hasil simulasi, termasuk *Total Head Movement* (THM) dan *Average Seek Time* (AST), perhatikan gambar 6.

TABEL IV
HASIL SIMULASI C-LOOK

C-LOOK		
Served sector	Movement	Accumulated Movement
82	2	2
140	5	7
170	3	10
190	1	11
16	14	25
24	1	26
43	1	27

Berdasarkan pergerakan sektor yang ditunjukkan pada tabel IV, dapat dihitung THM dengan menjumlahkan jarak yang ditempuh untuk setiap permintaan:

$$THM = (82 - 50) + (140 - 82) + (170 - 140) + (190 - 170) + (190 - 16) + (24 - 16) + (43 - 24)$$

$$THM = 32 + 58 + 30 + 20 + 174 + 8 + 19 = 341 \text{ track}$$

Dalam hal ini, ada 7 permintaan yang dilayani. Jadi, AST dapat dihitung sebagai berikut:
 $AST = 341 / 7 \approx 48.71 \text{ ms}$

Setelah dilakukan simulasi diatas, berikut akan dilakukan perbandingan efisiensi kinerja algoritma diatas berdasarkan dua parameter utama, yaitu *Total Head Movement* (THM) dan *Average Seek Time* (AST). Algoritma-algoritma ini digunakan untuk mengelola permintaan I/O pada disk dengan cara yang berbeda, yang mempengaruhi jumlah waktu yang dibutuhkan kepala *disk* untuk melayani permintaan.

TABEL V
PERBANDINGAN ALGORITMA

Comparison of Disk Scheduling Algorithms		
Algorithm	THM	AST
SSTF	208	29.71
LOOK	314	44.85
C-LOOK	341	48.71

Berdasarkan tabel V, perbandingan antara algoritma SSTF, LOOK, dan C-LOOK berdasarkan efisiensi, SSTF muncul sebagai yang paling efisien. Algoritma ini memiliki THM terendah, yaitu 208 *track*, dan AST yang paling cepat, yaitu 29.71 unit waktu. SSTF mencapai efisiensi maksimal dengan selalu memilih permintaan terdekat dari posisi kepala *disk*, yang mengurangi pergerakan kepala *disk* secara signifikan. Namun, kelemahannya adalah kemungkinan terjadinya kondisi *starvation* bagi permintaan yang lebih jauh, karena permintaan yang lebih dekat cenderung dilayani lebih dulu.

Di sisi lain, LOOK memiliki THM yang lebih tinggi, yaitu 314 *track*, dan AST sebesar 44.85 unit waktu, menjadikannya sedikit kurang efisien dibandingkan SSTF. Meskipun demikian, LOOK masih lebih efisien dibandingkan dengan SCAN, karena tidak melayani permintaan saat kepala *disk* kembali ke ujung *disk*. Algoritma ini memberikan keseimbangan yang lebih baik antara efisiensi dan keadilan dalam pelayanan permintaan, meskipun waktu pencarian dan pergerakan kepala *disk* masih lebih besar dibandingkan SSTF.

C-LOOK, meskipun lebih efisien dibandingkan SCAN, memiliki THM tertinggi di antara ketiganya, yaitu 341 *track*, dengan AST sebesar 48.71 unit waktu. Meskipun C-LOOK menghindari pergerakan kepala *disk* yang tidak perlu saat kembali ke awal, algoritma ini tetap memiliki THM dan AST yang lebih tinggi dibandingkan dengan LOOK dan SSTF. Meskipun memberikan pelayanan yang lebih adil dan mengurangi *starvation*, pergerakan kepala *disk* dan waktu pencarian yang lebih besar membuatnya kurang efisien dibandingkan kedua algoritma lainnya.

Secara keseluruhan, SSTF adalah algoritma yang paling efisien dalam hal waktu pencarian dan pergerakan kepala *disk*, meskipun dapat menghadapi masalah *starvation*. LOOK lebih adil dan sedikit lebih efisien dibandingkan dengan C-LOOK, namun masih memiliki waktu pencarian yang lebih tinggi. C-LOOK, meskipun menghindari beberapa kelemahan SCAN, memiliki THM dan AST yang lebih tinggi, menjadikannya kurang efisien dalam konteks ini.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma penjadwalan disk memainkan peran penting dalam mengoptimalkan kinerja akses data pada sistem operasi. Penelitian ini membandingkan kinerja tiga algoritma penjadwalan *disk*, yaitu *Shortest Seek Time First* (SSTF), LOOK, dan *Circular LOOK* (C-LOOK), dengan menggunakan simulator OS-SIM. Berdasarkan hasil simulasi, algoritma SSTF

menunjukkan efisiensi tertinggi dengan *Total Head Movement* (THM) terendah sebesar 208 track dan *Average Seek Time* (AST) sebesar 29,71 ms. Meskipun demikian, kelemahan SSTF adalah potensi terjadinya *starvation* pada permintaan yang lebih jauh. Algoritma LOOK memberikan keseimbangan antara efisiensi dan keadilan dengan THM sebesar 314 track dan AST sebesar 44,85 ms, namun masih kurang efisien dibandingkan SSTF. Algoritma C-LOOK, meskipun mampu mengurangi kondisi *starvation*, memiliki THM tertinggi sebesar 341 track dan AST sebesar 48,71 ms, menjadikannya algoritma dengan efisiensi terendah di antara ketiga algoritma yang diuji. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan panduan tentang algoritma penjadwalan disk yang optimal untuk berbagai kondisi operasional, dengan SSTF sebagai pilihan utama untuk efisiensi tinggi, LOOK untuk keseimbangan, dan C-LOOK untuk mengurangi kondisi *starvation*.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

REFERENSI

- [1] A. R. Dash, B. Dash, S. K. Sahu, N. K. Sahu, and S. Panda, "Optimized universal disk scheduling algorithm," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, pp. 1–71, 2024, doi: 10.1007/s40031-024-01036-9.
- [2] R. A. Putri, "Aplikasi simulasi algoritma penjadwalan sistem operasi," *Jurnal Teknologi Informasi*, vol. 5, no. 1, pp. 98–102, Jul. 2021, doi: 10.36294/jurti.v5i1.2215.
- [3] D. T. Putra and R. Purnomo, "Analisis algoritma round robin pada penjadwalan cpu," *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi Asia*, vol. 15, no. 2, pp. 85–90, 2021.
- [4] M. rajasekhar Reddy, V. V. D. S. S. Ganesh, S. Lakshmi, and Y. Sireesha, "Comparative analysis of cpu scheduling algorithms and their optimal solutions," in *Proceedings of the Third International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC 2019)*, IEEE, 2019, pp. 255–260.
- [5] A. Shankar, A. Ravat, and A. K. Pandey, "Comparative study of disk scheduling algorithms and proposal of a new algorithm for better efficiency," in *2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTING AND SOFTWARE ENGINEERING (ICACSE-2019)*, 2019, pp. 21–24. [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=3349013>
- [6] E. G and S. M, "Proposing disk scheduling algorithm to enhance the efficiency of disk performance," *SPECIAL ISSUE For IJEIT ON ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY*, , vol. 12, no. 1, pp. 111–119, 2024, [Online]. Available: www.ijeit.misuratau.edu.ly
- [7] M. K. M R, "An efficient disk scheduling algorithm using binary search tree," in *2019 1st International Conference on Advances in Information Technology*, IEEE, 2019, pp. 184–192.
- [8] B. P. Pokharel, "A Comparative analysis of disk scheduling algorithms," *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, vol. 8, no. 2, pp. 184–195, Apr. 2021, doi: 10.31033/ijrasb.8.2.24.
- [9] R. A. Dash, S. K. Sahu, and B. Kewal, "An optimized disk scheduling algorithm with bad-sector management," *International Journal of Computer Science, Engineering and Applications (IJCSA)*, vol. 9, no. 3, pp. 1–21, 2019, doi: 10.5012/ijcsea.2019.9301.
- [10] M. A. Khuuro, M. A. Bamboat, K. Kumar, I. A. Halepoto, N. Mirbahar, and G. S. Khan, "Analysis of Traditional Hard Disk Scheduling Algorithms: A Review," *Quaid-e-Awam University Research Journal of Engineering Science & Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 51–58, Jun. 2021, doi: 10.52584/qrj.1901.07.
- [11] S. Shastri, A. Sharma, and V. Mansotra, "A Comparative analysis of disk scheduling algorithms," *An International Multidisciplinary Research e-Journal*, vol. 2, no. 4, pp. 16–25, 2016, [Online]. Available: www.indianscholar.co.in
- [12] H. Rahmani, S. Arshad, and M. E. Moghaddan, "A disk scheduling algorithm based on ANT colony optimization," pp. 37–42, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2003.00926.
- [13] S. Suranauwarat, "A disk scheduling algorithm simulator," *Computers in Education Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 1–9, 2017.
- [14] Hayatunnufus, M. Riassetiawan, and A. Ashari, "Performance analysis of fifo and round robin scheduling process algorithm in iot operating system for collecting landslide data," in *2020 International Conference on Data Science, Artificial Intelligence, and Business Analytics (DATABIA)*, IEEE, 2020, pp. 63–68.
- [15] S. S. Myint, K. N. Myint, and S. K. Lwin, "Practical performance comparison of disk scheduling algorithms," *Journal of Computer Applications and Research*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2020.
- [16] S. Ratna, *Sistem operasi*, 1st ed., vol. 18. Yayasan Kita Menulis, 2023.
- [17] S. M. Ali, R. F. Alshahrani, A. H. Hadadi, T. A. Alghamdi, F. H. Almuhsin, and E. E. El-Sharawy, "A review on the cpu scheduling algorithms: comparative study," *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 21, no. 1, pp. 19–26, 2021, doi: 10.22937/IJCSNS.2021.21.1.4.
- [18] T. D. Putra and R. Purnomo, "Simulation and modelling of pre-emptive priority cpu scheduling algorithm," *Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, vol. 8, no. 3, pp. 1631–1640, 2024, doi: 10.33395/sinkron.v8i3.13352.
- [19] T. D. Putra and R. Purnomo, "Comparison between simple round robin and improved round robin algorithms," *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 10, no. 1, pp. 266–272, 2023.
- [20] R. Purnomo and T. D. Putra, "Simulation of preemptive shortest job first algorithm," *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE)*, vol. 11, no. 5, pp. 1–12, May 2022, doi: 10.17148/ijarcce.2022.11501.

Analisis Rekonfigurasi Jaringan Menggunakan Particle Swarm Optimization untuk Meningkatkan Voltage Stability Index

Analysis of Distribution Network Reconfiguration Using Particle Swarm Optimization to Improve Voltage Stability Index

Yoakim Simamora¹, Erita Astrid², Michael Fritz Immanuel³, Bakti Dwi Waluyo⁴, Muhammad Aulia Rahman Sembiring⁵, Mega Silfia Dewy⁶, Agnes Irene Silitonga⁷, Lisa Melvi Ginting⁸

^{1,2,3,4,5,6} Jurusan Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan; email: yoakimsimamora@unimed.ac.id

⁷ Jurusan Manajemen Fakultas Ekonomi Universitas Negeri Medan

⁸ Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan

[Dikirimkan: hh Bulan 20xx, Direvisi: 22 Mei 2025, Diterima: 27 Mei 2025]

Corresponding Author: Yoakim Simamora

INTISARI — Sistem distribusi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang mendistribusikan energi listrik dari jaringan transmisi sampai ke konsumen tegangan menengah dan tegangan rendah, seperti konsumen rumah tangga, konsumen industri dan fasilitas lainnya. Rekonfigurasi jaringan adalah proses penataan ulang struktur dan konfigurasi jaringan dengan cara membuka dan menutup saklar untuk memperoleh konfigurasi jaringan yang paling optimal. Pada penelitian ini penentuan buka tutup saklar menggunakan algoritma binary particle swarm optimization (BPSO), prinsip dasar algoritma BPSO dalam mencari nilai optimal berdasarkan perilaku sosial burung berkelompok atau ikan yang berenang bersama. Algoritma ini digunakan untuk menemukan solusi optimal dalam ruang multidimensi, terutama ketika masalahnya kompleks, non linear, atau tidak memiliki solusi matematis yang mudah dihitung. Kualitas pelayanan, keandalan, dan kestabilan tegangan merupakan parameter yang dijadikan tolak ukur pelayanan konsumen pada sistem distribusi tenaga listrik. Untuk mengukur stabilitas tegangan penelitian ini menyajikan Voltage stability index (VSI), perbaikan stabilitas tegangan menggunakan rekonfigurasi jaringan dengan algoritma BPSO, pada penelitian nilai VSI akan dibandingkan dengan algoritma pembandingan lain, algoritma PSO dari penelitian terdahulu, cuckoo search algorithm (CSA), Harmony Search Algorithm (HSA), dan modified whale optimization algorithm (MWOA). Hasil simulasi menunjukkan algoritma BPSO dapat mereduksi rugi daya dari nilai awal 202,7 kW menjadi 139,3 kW atau berkurang sebesar 31,28%, dibandingkan dengan algoritma lain BPSO memiliki persentase reduksi rugi daya yang paling baik. Hasil simulasi juga menampilkan nilai VSI mengalami perbaikan dari nilai awal 0,2112 menjadi 0,1520 atau meningkat 28%, dalam perbaikan nilai VSI pada sistem distribusi IEEE 33 bus algoritma BPSO menjadi algoritma terbaik dalam peningkatan nilai VSI.

KATA KUNCI — Voltage Stability Index, Rekonfigurasi, Particle Swarm Optimiiization, Rugi Daya

ABSTRACT — The distribution system is a part of the power system that distributes electrical energy from the transmission network to medium and low voltage consumers, such as households, industrial consumers, and other facilities. Network reconfiguration is the process of restructuring and configuring the network by opening and closing switches to obtain the most optimal network configuration. In this study, the determination of switch opening and closing uses the binary particle swarm optimization (BPSO) algorithm, whose basic principle in finding optimal values is based on the social behavior of birds flocking or fish swimming together. To measure voltage stability, this research presents the Voltage Stability Index (VSI), improving voltage stability using network reconfiguration with the BPSO algorithm. In this study, the VSI value will be compared with other algorithms, including the PSO algorithm from previous research, the Cuckoo Search Algorithm (CSA), the Harmony Search Algorithm (HSA), and the Modified Whale Optimization Algorithm (MWOA). The simulation results show that the BPSO algorithm can reduce power loss from an initial value of 202.7 kW to 139.3 kW, a decrease of 31.28%. Compared to other algorithms, BPSO has the best percentage reduction in power loss. The simulation results also show that the VSI value improved from an initial value of 0.2112 to 0.1520, an increase of 28%. In improving the VSI value in the IEEE 33 bus distribution system, the BPSO algorithm became the best algorithm for enhancing the VSI value.

KEYWORDS — Voltage Stability Index, Reconfiguration, Binary Particle Swarm Optimization, Power Losses.

I. PENDAHULUAN

Jaringan distribusi adalah tahap terakhir dalam penyaluran sistem tenaga listrik. Proses ini menyalurkan daya dari sistem transmisi sampai ke konsumen. Sistem distribusi biasanya memiliki rugi daya yang tinggi dan nominal tegangan yang rendah dikarenakan karakteristiknya yang jauh dari sistem pembangkit, bentuk topologi jaringan yang umumnya radial, perbandingan resistansi dan reaktansi yang besar. Karena rugi daya dan jatuh tegangan pada sistem distribusi cukup besar, menjadikan rugi daya dan jatuh tegangan menjadi masalah penting dalam sistem tenaga listrik, oleh karena itu banyak upaya yang telah dilakukan untuk mengurangi rugi daya dan memperbaiki jatuh tegangan, salah satunya adalah dengan rekonfigurasi jaringan

Azad Farsani menyajikan pendekatan baru untuk mengoptimalkan sistem distribusi tenaga listrik dengan mengurangi rugi daya melalui rekonfigurasi jaringan. Artikel ini memperkenalkan algoritma hibrida yang disebut sebagai SAPSO-MSFLA, yang bertujuan untuk menemukan konfigurasi terbaik untuk jaringan distribusi secara efisien. Studi ini menyoroti tantangan metode optimisasi tradisional dalam menangani sifat diskrit dari operasi buka tutup saklar dan kebutuhan untuk penyesuaian parameter yang efektif dalam algoritma particle swarm optimization. Algoritma yang diusulkan menunjukkan konvergensi yang lebih cepat dalam simulasi dan kinerja yang lebih baik yang dilakukan pada dua pengujian distribusi, menunjukkan potensinya untuk aplikasi yang lebih luas dalam masalah optimisasi yang kompleks [1].

Mosbah menyajikan metode baru konfigurasi ulang jaringan distribusi dinamis menggunakan minimum spanning tree (MST) berdasarkan algoritma Kruskal. Rekonfigurasi adalah tugas penting dalam sistem manajemen distribusi, yang menentukan jumlah kombinasi saklar yang mungkin dan kandidat terbaik untuk konfigurasi optimal sistem distribusi. Makalah ini menyajikan formulasi matematis dari rekonfigurasi jaringan distribusi dinamis, dengan fokus pada mengurangi rugi daya dengan mempertimbangkan kendala keamanan, teknis, dan topologis. Sasaran dari konfigurasi ulang jaringan adalah untuk mengurangi rugi daya aktif dengan membuka dan menutup saklar. Makalah ini juga membahas kendala praktis dalam menerapkan konfigurasi ulang jaringan distribusi pada sistem besar, seperti jumlah saklar yang banyak dan waktu yang diperlukan untuk mencapai konfigurasi jaringan distribusi yang paling optimal yang memenuhi semua batasan. Makalah ini juga menjelaskan pentingnya teknik optimisasi yang tangguh dalam menentukan konfigurasi ulang jaringan distribusi dinamis yang optimal [2].

Penelitian terdahulu membahas penerapan rekonfigurasi jaringan optimal untuk memperbaiki level tegangan dan meminimalisasi rugi jaringan sistem distribusi menggunakan head based optimizer. Studi ini berfokus pada proses mengubah status saklar untuk mengubah topologi feeder dalam sistem distribusi. Studi ini mengusulkan cara yang ekonomis untuk memperbaiki level tegangan dan mengurangi kehilangan daya dalam sistem jaringan distribusi dengan menggunakan rekonfigurasi jaringan yang optimal pada berbagai tingkat beban jaringan. Fungsi objektif yang digunakan dalam artikel ini mencakup perbaikan profil tegangan, pengurangan kehilangan daya, pengurangan biaya operasi, dan minimisasi emisi gas. Metode yang diusulkan dievaluasi pada tiga tingkat beban yang berbeda pada sistem distribusi tegangan IEEE 33 bus, dan hasil analisis dibandingkan dengan metode optimisasi lainnya yang dipublikasikan dalam literatur. Studi ini menyimpulkan bahwa metode yang diusulkan meningkatkan profil tegangan sistem sambil meminimalkan kerugian dan biaya daya, yang menunjukkan bahwa metode ini efektif dalam menemukan hasil terbaik [3].

Studi terdahulu mengusulkan metode baru untuk penempatan *Distributed Generator* (DG) berdasarkan profil tegangan rendah untuk optimisasi konfigurasi ulang jaringan dan penentuan ukuran *Distributed Generator* (DG). Metode ini terdiri dari tiga langkah: urutan switching terkategori untuk konfigurasi jaringan radial, pengumpulan konfigurasi ulang untuk mengurangi kerugian melalui alokasi DG berdasarkan lokasi geografis gardu induk, dan penentuan ukuran serta alokasi DG di setiap bus dengan profil tegangan rendah. Tujuan dari studi ini adalah untuk meningkatkan level tegangan dan meminimalkan kerugian daya jaringan dengan menggunakan pengaturan ulang jaringan, *placement dan sizing Distributed Generator* (DG), dan rekonfigurasi dan penempatan *Distributed Generator* (DG) yang dioptimalkan secara bersama [4].

Dahalan menyajikan metode Particle Swarm Optimization (PSO) untuk mengidentifikasi rencana operasi switching saklar untuk rekonfigurasi jaringan dan nilai optimum dari unit *distributed generator* (DG) secara bersamaan. Tujuan utamanya adalah meminimalisir rugi daya nyata dan memperbaiki level tegangan bus dalam sistem sambil memenuhi semua kendala distribusi. Algoritma PSO disajikan untuk menentukan konfigurasi baru yang optimal dan dampaknya terhadap rugi daya aktif jaringan serta profil tegangan. Untuk menunjukkan validitas algoritma yang diusulkan, simulasi komputer dilakukan pada sistem 33 bus dan hasilnya disajikan serta dibandingkan dengan metode *Genetic Algorithm* (GA). Permintaan yang meningkat dalam sistem tenaga telah menjadi tantangan bagi insinyur sistem tenaga dalam mempertahankan sistem yang andal dan aman secara ekonomi. Integrasi DG dalam sistem distribusi dapat meningkatkan profil tegangan, perbaikan keandalan, pasokan daya tanpa gangguan, dan efisiensi energi yang lebih tinggi. Rekonfigurasi jaringan distribusi adalah salah satu skema kontrol yang paling signifikan dalam jaringan distribusi yang dapat dipengaruhi oleh interkoneksi DG [5].

Raut mishra menjelaskan *sine-cosine algorithm* yang dikombinasikan dengan levy flight untuk mengkonfigurasi ulang jaringan distribusi dan penempatan *Distributed Generator* (DG) secara simultan. Efektivitas algoritma ini diverifikasi pada 10 fungsi benchmark standar dan digunakan untuk menangani masalah optimisasi kombinatorial nyata, seperti rekonfigurasi jaringan. Permintaan beban yang meningkat di daerah industri telah menyebabkan sistem distribusi beroperasi di tepi batas stabilitas tegangan mereka, yang mengakibatkan efisiensi yang buruk dan kerugian finansial yang lebih tinggi. [6].

Liu li mengajukan algoritma hibrid baru yang menggabungkan *Harmony Search Algorithm* (HSA) dan *Genetic Algorithm* (GA) untuk mengatasi masalah kompleks konfigurasi ulang jaringan distribusi yang bertujuan untuk meminimalkan kehilangan daya. Makalah ini membahas menyoroti tantangan dari optima lokal dalam proses optimisasi dan menunjukkan bagaimana pendekatan hibrid meningkatkan kualitas solusi dengan memanfaatkan kekuatan kedua algoritma. Efektivitas metode ini divalidasi melalui simulasi pada sistem distribusi 33-bus dan 69-bus, menunjukkan peningkatan signifikan dalam solusi optimal dibandingkan dengan metode tradisional. Penelitian ini menekankan potensi aplikasi algoritma tersebut pada masalah optimisasi kompleks lainnya, menyoroti kontribusi inovatifnya dalam bidang sistem distribusi listrik [7].

Partha Kahyal membahas pentingnya stabilitas tegangan dalam sistem distribusi listrik dan menyajikan metode untuk meningkatkannya melalui rekonfigurasi jaringan menggunakan artificial neural network (ANN). Penelitian ini memperkenalkan indeks stabilitas tegangan untuk menilai stabilitas sistem dan menggambarkan proses pencarian dua tahap untuk konfigurasi saklar optimal yang meningkatkan stabilitas tegangan dan mengurangi kerugian daya. Studi ini menunjukkan bahwa setelah rekonfigurasi, kehilangan daya aktif dan reaktif dalam sistem distribusi 52-bus yang praktis berkurang secara signifikan, yang mengarah pada profil tegangan yang lebih baik di seluruh jaringan. Temuan tersebut menyoroti efektivitas pendekatan berbasis ANN yang diusulkan dalam mencapai efisiensi operasional dan keandalan yang lebih baik dalam jaringan distribusi [8].

Mistry mengusulkan metode baru untuk rekonfigurasi jaringan per jam pada jaringan distribusi radial 16-node dan 33-node untuk satu hari dengan rekonfigurasi jaringan yang mempertimbangkan model beban statis. Indeks stabilitas tegangan minimum ditemukan pada node yang memiliki profil tegangan rendah dan kerugian yang lebih tinggi. Sistem distribusi menghadapi masalah seperti penyeimbangan beban, pengurangan kerugian, profil tegangan rendah di ujung konsumen, dan ketidakstabilan tegangan akibat peningkatan permintaan energi yang progresif. Rekonfigurasi jaringan dapat meningkatkan stabilitas tegangan dengan mengubah topologi jaringan, mengurangi kehilangan daya sistem, meningkatkan level tegangan, dan memperbaiki keandalan sistem [9].

Mohammed Imran menyajikan pendekatan baru untuk mengoptimalkan rekonfigurasi jaringan distribusi yang bertujuan untuk meminimalkan kerugian daya dan meningkatkan profil tegangan. Penelitian Ini memperkenalkan Fireworks Algorithm (FWA), teknik optimasi berbasis kecerdasan kawanan yang terinspirasi oleh proses ledakan kembang api, yang secara efektif menangani sifat kombinatorial kompleks dari rekayasa ulang jaringan sambil memastikan struktur radial sistem tetap terjaga. Metode ini diuji pada sistem uji standar IEEE, khususnya sistem 33-bus dan 119-bus, menunjukkan hasil yang lebih dibandingkan dengan metode algoritma dalam hal kualitas solusi, kecepatan konvergensi, dan efisiensi komputasi. Hasilnya menunjukkan bahwa FWA secara signifikan mengurangi kehilangan daya dan meningkatkan stabilitas tegangan, bahkan dalam kondisi abnormal, menunjukkan efektivitasnya dalam jaringan distribusi berskala besar [10].

Makalah ini membahas Voltage Stability Index (VSI) dari jaringan distribusi radial, yang mengalami perubahan signifikan dalam variasi beban setiap hari. Beberapa node dengan indeks stabilitas minimum dipilih terlebih dahulu, dan node dengan nilai minimum dinyatakan sebagai node yang paling sensitif. Studi ini juga mengidentifikasi nilai kritis dari total beban nyata dan total beban daya reaktif untuk berbagai kasus, mengungkapkan bahwa sistem akan runtuh di luar nilai kritis daya yang telah dihitung. Node yang paling sensitif adalah yang menunjukkan titik kritis tertinggi, margin daya reaktif terendah, defisiensi daya reaktif terbesar, dan perubahan % tegangan tertinggi.

Penelitian ini mengusulkan metode metaheuristik Binary Particle Swarm Optimization (BPSO) yang terinspirasi perilaku sekelompok burung atau sekelompok ikan dalam karakteristiknya mencari makanan. Pendekatan algoritma PSO digunakan untuk menentukan saklar yang terbuka dan tertutup untuk memperoleh konfigurasi jaringan yang paling optimal. Tujuan dari studi ini adalah untuk meminimalisasi kerugian daya aktif dan meningkatkan profil tegangan, setelah konfigurasi jaringan optimal diperoleh dengan rugi daya yang minimal langkah berikutnya adalah menganalisis Voltage Stability Index (VSI) dari jaringan distribusi hasil rekonfigurasi. Metode ini akan diuji pada sistem distribusi IEEE 33 bus, hasil dari analisis dan simulasi akan dibandingkan dengan algoritma pembandingan lain, algoritma PSO dari penelitian terdahulu, Cucko Search Algorithm (CSA), Harmony Search Algorithm (HSA), dan Modified Whale Optimization Algorithm (MWOA)

II. METODE PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan tentang fungsi objektif yang akan dicapai dari metode yang diajukan, batasan - batasan yang harus dipenuhi dalam analisis, algoritma Particle Swarm Optimization (PSO) sebagai metode yang digunakan untuk menentukan saklar yang terbuka dan tertutup untuk mendapatkan konfigurasi baru jaringan, Voltage Stability Index (VSI) sebagai parameter kualitas daya yang akan dianalisis setelah rekonfigurasi jaringan dilakukan, dan data penelitian menggunakan sistem IEEE 33 bus dengan level tegangan 12,6 kV.

A. FUNGSI OBJEKTIF

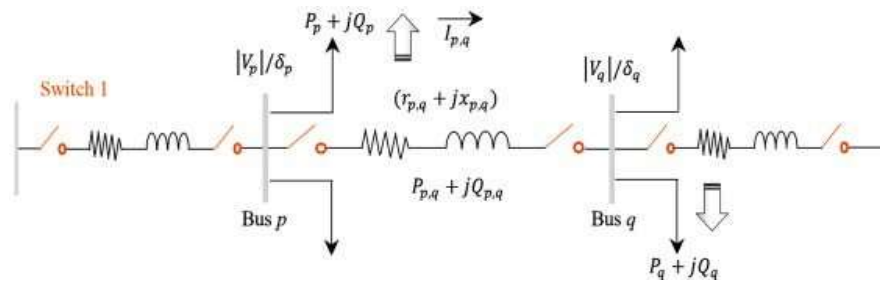
Fungsi objektif adalah fungsi matematis yang digunakan untuk memperoleh hasil terbaik dalam analisis aliran daya. Fungsi objektif dalam makalah ini adalah untuk mengurangi rugi daya aktif, meningkatkan profil tegangan, dan meningkatkan nilai VSI. Persamaan (1) adalah persamaan fungsi objektif untuk mengurangi rugi daya aktif.

$$\text{Min } F = \min (P_{\text{loss}} + (\lambda_v \times S_{CV})) \quad (1)$$

Dimana Min F adalah *minimum function*, Ploss adalah rugi jaringan yang didapatkan menggunakan persamaan (2), λ_v adalah penalti faktor. S_{CV} adalah jumlah dari tegangan yang melanggar batasan tegangan (*Constraint*). Nilai penalti faktor didapatkan sebagai berikut :

$$\lambda_v = \begin{cases} 0, & \text{jika batasan tegangan tidak dilanggar} \\ 1, & \text{jika batasan tegangan dilanggar} \end{cases}$$

Untuk menghitung rugi jaringan, analisis aliran daya adalah langkah pertama yang dilakukan untuk menghitung parameter yang tidak diketahui (tegangan pada bus beban, arus yang mengalir pada penghantar, dan daya reaktif pada pembangkit) menggunakan aliran daya *Bus Injection to Branch Current* (BIBC) dan *Branch Current to Branch Voltage* (BCBV). Gambar 1 menjelaskan diagram satu garis jaringan distribusi radial, impedansi penghantar jaringan disribusi diantara bus p dan bus q [2].



Gambar 1. Penghantar Jaringan Distribusi

$$P_{loss}(t) = I_{pq}^2 R_{pq} = \frac{S_{pq}^2}{V_p^2} R_{pq} = \frac{P_{pq}^2 + Q_{pq}^2}{V_p^2} R_{pq} \quad (2)$$

Dimana $P_{loss}(t)$ adalah total rugi daya jaringan pada saat t , V_p/δ_p adalah tegangan dan sudut fase tegangan pada bus p , x_{pq} dan r_{pq} adalah reaktansi dan resistansi pada saluran diantara bus p dan bus q , sedangkan Q_{pq} dan P_{pq} adalah daya reaktif dan daya aktif menuju bus i^{th} , dan N adalah jumlah bus pada sistem. Studi ini memiliki 3 batasan dalam proses analisis yaitu

Batasan tegangan : $V_{min} < V_i < V_{max}$; i = nomor bus

Batasan arus : $I_{min} < I_i < I_{max}$; i = nomor cabang

Batasan topologi dalam penelitian ini adalah setelah konfigurasi ulang jaringan, bentuk jaringan masih berbentuk radial, tidak ada berbentuk loop. Dimana P_{loss} adalah total rugi daya dalam sistem, I_i magnitude arus yang mengalir melalui cabang i , V_i tegangan bus i

B. ALGORITMA BINARY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Kennedy dan Eberhart memperkenalkan Algoritma Swarm Optimization (PSO) pada tahun 1995. PSO adalah algoritma optimisasi berbasis AI yang didasarkan pada kecerdasan koloni ikan dan burung [11]. Persamaan (6) dan (7) menunjukkan algoritma PSO standar.

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 \cdot rand(p_p - x_i(t)) + c_2 \cdot rand(p_g - x_i(t)) \quad (6)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (7)$$

Proses yang diusulkan oleh Kennedy dan Eberhart [12] menghasilkan variasi PSO. Persamaan update partikel menjadi persamaan (8) ketika inersia berat ditambahkan sebagai pengontrol keragaman dari PSO awal.

$$v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot rand(p_p - x_i(t)) + c_2 \cdot rand(p_g - x_i(t)) \quad (8)$$

Persamaan inersia berat yang digunakan adalah seperti persamaan (9), di mana w adalah inersia berat yang memiliki nilai yang berbeda untuk setiap iterasi.

$$w_{It} = w_{max} - \frac{(w_{max} - w_{min}) \cdot It}{It_{maks}} \quad (9)$$

Optimasi *Binary Particle Swarm Optimization* (BPSO) adalah teknik optimasi lanjutan yang berasal dari algoritma *Particle Swarm Optimization* standar (PSO), yang dirancang khusus untuk mengatasi tantangan dalam ruang pencarian biner. Kegunaan BPSO yang signifikan terletak pada aplikasinya dalam rekonfigurasi jaringan distribusi, sebuah proses penting untuk mengoptimalkan efisiensi dan keandalan sistem distribusi listrik. Dengan meniru pola perilaku sosial yang diamati di alam, seperti burung yang terbang berkelompok atau ikan yang berenang berkelompok, BPSO memungkinkan identifikasi konfigurasi jaringan optimal yang meminimalkan kehilangan daya dan meningkatkan stabilitas tegangan.

Dalam BPSO, P_i dan P_g dari swarm diupdate dalam PSO standar. Satu perbedaan utama antara BPSO dan PSO standar adalah interpretasi kecepatan [13]. Pada BPSO, kecepatan dibatasi dalam kisaran $[0,1]$. Persamaan kecepatan serupa dengan persamaan 10.

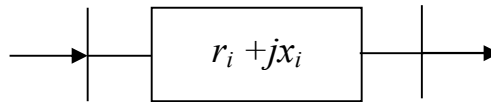
$$v_{ij}'(t) = sig((t)) = \frac{1}{1 + e^{-v_{ij}(t)}} \quad (10)$$

Persamaan (10) digunakan untuk memperbarui vektor kecepatan partikel. Dan posisi baru partikel diperoleh dengan menggunakan persamaan (11).

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{if } r_{ij} < sig(v_{ij}(t+1)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

C. VOLTAGE STABILITY INDEX

Penelitian ini mengusulkan (VSI) baru yang dapat menilai keadaan sistem distribusi dari sisi voltage collapse. Operator sistem selalu ingin mengetahui seberapa jauh jaringan dari titik voltage collapse agar sistem tenaga dapat berjalan dengan lancar dan handal ini didasarkan pada solusi persamaan kuadrat sederhana [14]. Model rangkaian ekuivalen dapat digunakan untuk mewakili setiap cabang $ri + jxi$ antara bus: i dan bus: $i+1$ dari sistem distribusi radial, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 [15].



Gambar 2. Rangkaian Ekuivalen Sistem Distribusi Dua bus

VSI yang diusulkan dapat digunakan untuk menentukan tingkat stabilitas tegangan dari sistem interkoneksi total. Menurut model ini, jika nilai indeksnya dekat dengan nol, sistem dianggap stabil [15]. V_{i+1} adalah tegangan penerima, dan P_{i+1} dan Q_{i+1} adalah daya aktif dan reaktif total dari total beban. Selain itu, r_i dan x_i adalah model sirkuit ekuivalen, yang ditemukan dengan menghitung total kehilangan daya aktif dan reaktif dalam (12) dan (13). Simbol P_1 dan Q_1 mewakili total pembangkitan daya aktif dan reaktif, dan V_i adalah tegangan pengiriman. Persamaan (14) menunjukkan persamaan untuk menghitung VSI, nilai VSI harus lebih kecil atau sama dengan 1 [8].

$$P_L = r_{eq} \left(\frac{P_S^2 + Q_S^2}{V_S^2} \right) \tag{12}$$

$$Q_L = x_{eq} \left(\frac{P_S^2 + Q_S^2}{V_S^2} \right) \tag{13}$$

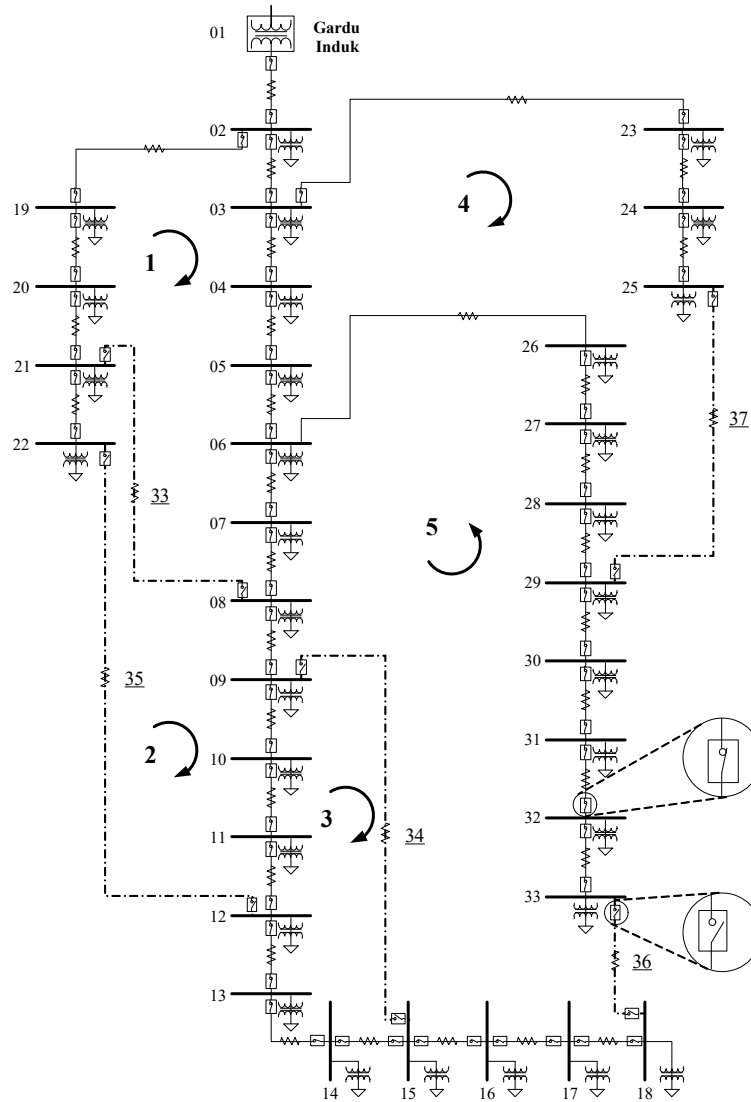
$$L = 4 \cdot \sqrt{(P_S^2 + Q_S^2) \cdot (r_{eq}^2 + x_{eq}^2)} \tag{14}$$

III. HASIL DAN ANALISIS

Algoritma BPSO akan diuji coba pada sistem distribusi IEEE 33 bus untuk mendapatkan konfigurasi jaringan yang paling optimal dengan rugi daya paling minimum dan nilai VSI yang paling optimum. Algoritma BPSO yang diajukan pada penelitian ini akan dibandingkan algoritma PSO dari penelitian terdahulu, Cuckoo Search Algorithm (CSA), Harmony Search Algorithm (HSA), dan Mean Whole Optimization Algorithm (MWOA). Sistem distribusi IEEE 33 bus terdiri dari 32 sectionalize switch dengan nomor switch 1-32 dan 5 tie switch dengan nomor switch 33-37, single line diagram sistem distribusi 33 bus dengan 5 loop (loop 1 sampai loop 5) ditunjukkan pada gambar 4 [16]. Data impedansi saluran diambil dari [17] dengan total daya aktif sebesar 3715 kW dan total daya reaktif sebesar 2300 kVAR. Kondisi awal rugi daya dari sistem distribusi IEEE 33 bus adalah sebesar 202,7 kW, tegangan minimum sebesar 0,9166 pada bus 18, dan nilai VSI sebesar 0,2112. Penentuan loop dari sistem distribusi juga perlu diperhatikan, agar tidak ada satu switch yang dimasukkan ke dalam 2 loop yang berbeda [18]. Tabel I menjelaskan loop dasar pada sistem distribusi IEEE 33 bus.

TABEL I
LOOP DASAR JARINGAN DISTRIBUSI IEEE 33 BUS

Loop	Switch OFF	Jumlah Switch
1	2, 3, 4, 5, 6, 7, 18, 19, 20, 33	10
2	8, 9, 10, 11, 21, 35	6
3	12, 13, 14, 34	4
4	15, 16, 17, 29, 30, 31, 32, 36	8
5	22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 37	8



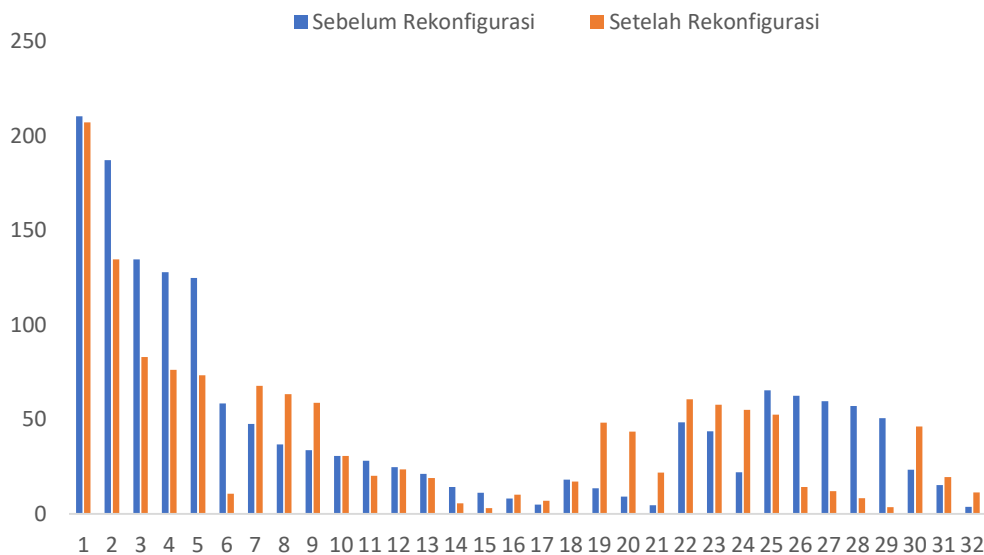
Gambar 3. Single Line diagram Sistem Distribusi IEEE 33 Bus

TABEL II

HASIL SIMULASI REKONFIGURASI JARINGAN MENGGUNAKAN BINARY PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (BPSO)

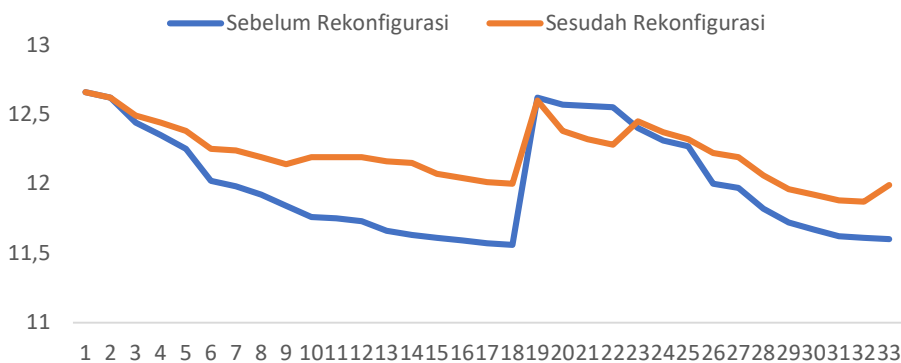
Metode	Tie Switch	Tegangan Minimum (p.u)	Rugi Daya (kW)	Persentase Reduksi Rugi Daya (%)	Voltage Stability Index
Kondisi awal	33, 34, 35, 36, 37	0,9166	202,7	-	0,2112
BPSO	7, 9, 14, 32, 37	0,9378	139,3	31,28	0,1520
PSO 1 [5]	7, 10, 28, 14, 32	0,94	140,7	30,59	0,1547
PSO 2 [4]	8,17, 28, 33, 34	0,9363	150,9	25,56	0,1636
CSA [19]	7, 9, 14, 32, 28	0,9413	140	30,93	0,1540
HSA [7]	7, 9, 14, 25, 32	0,9423	139,6	31,13	0,1522
MWOA [20]	7, 9, 14, 28, 32	0,9457	141,42	30,23	0,1561

Untuk menganalisis performa dari algoritma yang diajukan, hasil simulasi dibandingkan dengan hasil algoritma lainnya, PSO 1 [5], PSO 2 [4], *Cucko Search Algoritim* (CSA) [19], *Harmony Search Algorithm* (HSA) [7], dan *Modified Whale Optimization Algorithm* (MWOA) [20]. Hasil dari algoritma pembandingan akan dijalankan dengan metode aliran daya yang diajukan pada penelitian ini dengan konfigurasi *tie switch* yang dihasilkan dari algoritma pembandingan dan ditampilkan pada tabel I. Dari tabel II terlihat bahwa untuk reduksi rugi daya dan peningkatan nilai VSI algoritma BPSO mengungguli algoritma, PSO, CSA, HSA dan MWOA. Dari hasil rekonfigurasi jaringan menggunakan algoritma BPSO diperoleh *tie switch* yang baru, konfigurasi jaringan yang baru berhasil mengurangi rugi daya dari 202,7 kW menjadi 139,3 kW atau berkurang sebesar 31,28%, setelah diperoleh rugi daya dilakukan analisis nilai VSI, setelah konfigurasi baru nilai VSI berukuran dari 0,2112 menjadi 0,1520 atau berkurang sebesar 28%.



Gambar 4. Perbandingan Nilai Arus Menuju Bus Pada Sistem Distribusi Sebelum dan Sesudah Rekonfigurasi

Gambar 4 menyajikan perbandingan nilai arus yang mengalir pada saluran distribusi menuju ke bus beban pada sistem distribusi untuk kondisi awal dan hasil rekonfigurasi menggunakan algoritma BPSO, Nilai arus yang mengalir pada saluran distribusi kondisi awal lebih besar dibandingkan dengan arus saluran distribusi setelah rekonfigurasi menggunakan BPSO.



Gambar 5. Perbandingan Tegangan Tiap Bus Sebelum dan Sesudah Rekonfigurasi

Gambar 5 menampilkan grafik profil tegangan sistem distribusi IEEE 33 bus sebelum dan sesudah rekonfigurasi, sebelum rekonfigurasi profil tegangan terendah sebesar 0,9166 pu pada bus 18, setelah rekonfigurasi jaringan profil tegangan terendah meningkat menjadi 0,9378 atau meningkat sebesar 22,61%.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini mengajukan algoritma BPSO untuk menyelesaikan permasalahan rekonfigurasi jaringan distribusi dengan tujuan meningkatkan profil tegangan, mengurangi rugi daya jaringan dan meningkatkan nilai VSI pada sistem distribusi. Algoritma yang diajukan telah di uji coba pada sistem distribusi IEEE 33 bus dan hasilnya telah dibandingkan dengan algoritma optimasi pembandingan PSO dari penelitian terdahulu, CSA, HSA, dan MWOA yang tersedia dari literatur. Hasil simulasi menunjukkan metode BPSO lebih baik dalam menentukan konfigurasi jaringan paling optimal sehingga dapat menurunkan rugi daya dan

meningkat nilai VSI dibanding dengan algoritma pembandingan lain. Hasil simulasi menunjukkan rugi daya jaringan berkurang 31,28% sedangkan nilai VSI meningkat sebesar 22,61%.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis dengan ini menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan, baik secara pribadi, institusional, maupun komersial, yang dapat memengaruhi objektivitas dan integritas dalam pelaksanaan penelitian berjudul “Analisis Rekonfigurasi Jaringan Menggunakan *Particle Swarm Optimization* untuk Meningkatkan *Voltage Stability Index*”. Seluruh tahapan penelitian, mulai dari perancangan, pengumpulan data, analisis hingga pelaporan hasil, dilakukan secara mandiri dan bebas dari intervensi pihak manapun

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih untuk LPPM Universitas Negeri Medan yang turut membantu dalam penyelesaian makalah ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada reviewer yang memberikan rekomendasi dalam peningkatan kualitas makalah.

REFERENSI

- [1] T. Niknam and E. Azad Farsani, “A hybrid self-adaptive particle swarm optimization and modified shuffled frog leaping algorithm for distribution feeder reconfiguration,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 23, no. 8, pp. 1340–1349, 2010, doi: 10.1016/j.engappai.2010.02.005.
- [2] M. Mosbah, S. Arif, R. D. Mohammedi, and A. Hellal, “Optimum dynamic distribution network reconfiguration using minimum spanning tree algorithm,” *2017 5th Int. Conf. Electr. Eng. - Boumerdes, ICEE-B 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ICEE-B.2017.8192170.
- [3] D. Otuo-Acheampong, G. I. Rashed, A. M. Akwasi, and H. Haider, “Application of Optimal Network Reconfiguration for Loss Minimization and Voltage Profile Enhancement of Distribution System Using Heap-Based Optimizer,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 2023, 2023, doi: 10.1155/2023/9930954.
- [4] M. N. M. Nasir, N. M. Shahrin, Z. H. Bohari, M. F. Sulaima, and M. Y. Hassan, “A Distribution Network Reconfiguration Based on PSO : Considering DGs Sizing and Allocation Evaluation for Voltage Profile Improvement”.
- [5] W. Dahalan, “Network reconfiguration for loss reduction with distributed generations using PSO”, in *Proceedings of International conference on Power and Energy*, no. December, pp. 1–7, 2012.
- [6] U. Raut and S. Mishra, “An improved sine-cosine algorithm for simultaneous network reconfiguration and DG allocation in power distribution systems,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 92, p. 106293, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106293.
- [7] L. Liu, H. Yu, and L. Li, “Distribution network reconfiguration based on harmony search/genetic hybrid algorithm,” *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED*, no. Ciced, pp. 5–6, 2012, doi: 10.1109/CICED.2012.6508726.
- [8] I. Journal and E. Engineering, “International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 4, Number 1, March 2012,” vol. 4, no. 1, pp. 120–133, 2012.
- [9] K. Mistry and R. Roy, “Enhancement of Voltage Stability Index of distribution system by network reconfiguration including static load model and daily load curve,” *2011 IEEE PES Int. Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT India 2011*, pp. 17–22, 2011, doi: 10.1109/ISGT-India.2011.6145379.
- [10] A. Mohamed Imran and M. Kowsalya, “A new power system reconfiguration scheme for power loss minimization and voltage profile enhancement using Fireworks Algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 312–322, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.04.034.
- [11] L. Vanneschi and S. Silva, “Particle Swarm Optimization,” *Nat. Comput. Ser.*, pp. 105–111, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-17922-8_4.
- [12] C. Wu and M. S. Tsai, “Feeder reconfiguration using binary coding particle swarm optimization,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 488–494, 2008.
- [13] S. Biswas, A. Chatterjee, and S. K. Goswami, “An artificial bee colony based optimal placement and sizing of distributed generation,” *Int. Conf. Control. Instrumentation, Energy Commun. CIEC 2014*, pp. 356–360, 2014, doi: 10.1109/CIEC.2014.6959109.
- [14] V. Tamilselvan, T. Jayabarathi, T. Raghunathan, and X. Yang, “Optimal capacitor placement in radial distribution systems using flower pollination algorithm,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 2775–2786, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2018.01.004.
- [15] R. Arunjothi and K. P. Meena, “Optimizing capacitor size and placement in radial distribution networks for maximum efficiency,” *Syst. Soft Comput.*, vol. 6, no. June, p. 200111, 2024, doi: 10.1016/j.sasc.2024.200111.
- [16] T. T. Nguyen, P. N. Vinh, and H. D. Nguyen, “Optimizing location and size of capacitors for power loss reduction in radial distribution networks,” vol. 19, no. 1, 2021, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v19i1.16491.
- [17] rio afrianda Yoakim Simamora, Sigit sukamajati, “Optimasi Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Radial,” *J. Energi Kelistrikan*, vol. 10, no. 2, pp. 102–111, 2018.
- [18] S. Adeleke, O. Ighodalo, O. Olatunde, T. Grace, and T. Ejike, “Franklin Open Optimal allocation of shunt capacitors in radial distribution networks using Constriction-Factor Particle Swarm Optimization and its techno-economic analysis,” *Franklin Open*, vol. 7, no. September 2023, p. 100093, 2024, doi: 10.1016/j.fraope.2024.100093.
- [19] T. T. Nguyen, A. V. Truong, and T. A. Phung, “A novel method based on adaptive cuckoo search for optimal network reconfiguration and distributed generation allocation in distribution network,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 801–815, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.030.
- [20] A. Uniyal and S. Sarangi, “Optimal network reconfiguration and DG allocation using adaptive modified whale optimization algorithm considering probabilistic load flow,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 192, no. April 2019, p. 106909, 2021, doi: 10.1016/j.epr.2020.106909.

Optimasi Prediksi Sisa Umur Penggunaan Baterai dengan Model PSO-LSTM

Optimizing Battery's Remaining Useful Life Prediction using PSO-LSTM Model

Wilson Wiranata¹, Yohanes Calvinus²

^{1,2} Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara; email: wilson.525210017@stu.untar.ac.id, yohanesft@untar.ac.id

[Dikirimkan: 2 November 2024, Direvisi: 28 Mei 2025, Diterima: 31 Mei 2025]
Corresponding Author: Wilson Wiranata

INTISARI — Baterai kini menjadi solusi utama seiring dengan bergesernya sumber energi menjadi energi terbarukan. Pada tahun 2011 hingga 2022 *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) telah merekap adanya peningkatan kurang lebih sebanyak 40% nilai PPM dan jumlah karbon dioksida (CO₂). *Electric Vehicle* (EV) telah berkontribusi dalam pengurangan CO₂ dan PPM secara berkelanjutan. Walaupun demikian, teknologi baterai memiliki kekurangan yang bersangkutan dengan masa akhir penggunaan atau yang sering disebut dengan *Remaining Useful Life* (RUL) yang dapat menyebabkan kebakaran atau emisi racun pada baterai tersebut. Penelitian ini akan menggunakan pendekatan data yang memanfaatkan kecerdasan buatan untuk memprediksi RUL baterai, di mana dapat dicegah terjadinya kerusakan baterai dengan model tersebut. Model stokastik *Particle Swarm Optimization - Long Short Term Memory* (PSO-LSTM) telah digunakan untuk mengoptimasi *hyperparameter window size* dan *hidden layer* secara stokastik. Hal tersebut dilakukan untuk mendapat model yang memiliki kesalahan minim. PSO-LSTM memprediksi data yang bersumber dari NASA *Prognosis Centre of Excellence* (PCoE) yang meliputi data “Siklus” dan “Kapasitas”. Didapati bahwa hasil PSO-LSTM teroptimasi dengan baik dengan RMSE 0.074 dan MAE 0.021 (80% data pelatihan), lalu 0.070 untuk RMSE dan 0.021 untuk nilai MAE (20% data pengujian). Model stokastik PSO-LSTM tersebut dapat dikembangkan pada *Battery Management System* (BMS) cerdas untuk keperluan industri otomotif di kemudian harinya.

KATA KUNCI — Energi Terbarukan, Prediksi, PSO-LSTM, RUL

ABSTRACT — Batteries now serve as the main solution amid the shift to renewable energy. Between 2011 and 2022, the National Aeronautics and Space Administration (NASA) recorded an approximate notable 40% increase in global CO₂ concentration in parts per million (PPM). Electric Vehicles (EVs) have contributed to sustainable reductions in CO₂ and PPM. Nevertheless, battery technology has drawbacks related to its end-of-life phase, commonly referred to as Remaining Useful Life (RUL), which can potentially lead to fires or dangerous toxic emissions from the cells. This study will employ a data-driven approach utilizing artificial intelligence to predict battery RUL, thereby effectively preventing potential battery failures with the developed model. The stochastic Particle Swarm Optimization - Long Short Term Memory (PSO-LSTM) model has been used to optimize window size and hidden layer hyperparameters. This was done to achieve a model with minimal error. PSO-LSTM forecasts data sourced from NASA's Prognosis Centre of Excellence (PCoE), encompassing both “Cycle” and distinct “Capacity” measurements. PSO-LSTM model optimization produced RMSE of 0.074 and MAE values of 0.021 on 80% training data, and RMSE of 0.070 with MAE of 0.021 on 20% testing data. This stochastic PSO-LSTM model can be integrated into intelligent Battery Management Systems (BMS) for specific future automotive industry applications

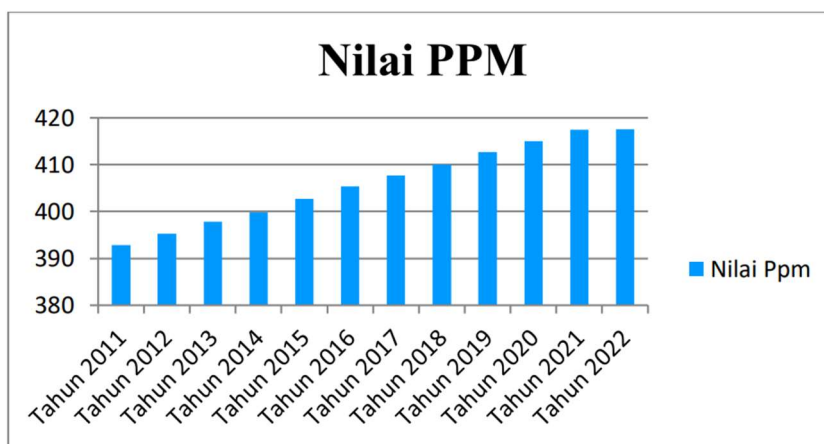
KEYWORD — Prediction, PSO-LSTM, Renewable Energy, RUL

I. PENDAHULUAN

Dengan adanya transisi menuju energi bersih, teknologi baterai merupakan salah satu solusi utama menurunkan tingkat karbon dioksida (CO₂). Badan *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) telah merekam temuan data terkait peningkatan jejak CO₂ dari tahun 2011 hingga tahun 2022. Terdapat peningkatan kurang lebih sebanyak 40% nilai PPM dari jumlah karbon CO₂ yang beredar di muka Bumi dalam kurun waktu 10 tahun tersebut [1]. Transportasi memberikan kontribusi terbesar dalam peningkatan ini. Dari tahun 2018 di area Tegal, Jawa Tengah, telah dilakukan survei terhadap kontribusi emisi kendaraan bermotor yang dihasilkan oleh ruas jalan adalah sebesar 80,096,024 g/ jam di Jalan Ki Hajar Dewantoro [2]. Salah satu solusi dari masalah ini adalah dengan menggantikan mobil berbahan bensin (BBM) dengan mobil berkendaraan baterai, atau yang lebih umum disebut dengan *Electric Vehicle* (EV). Sebagai energi terbarukan, baterai telah mendorong industri transportasi menuju energi bersih. Di Negara Republik Tiongkok ditemukan adanya relevansi terhadap peningkatan penjualan EV dan penurunan emisi CO₂. Dengan adanya peningkatan 1% pada penjualan EV, maka terdapat pengurangan emisi karbon sebesar 0.096% di sebuah kota di Republik

Tiongkok [3]. Data-data tersebut menunjukkan signifikansi dari EV dalam perlawanan terhadap polusi CO₂. Teknologi baterai EV yang umum dijumpai di masyarakat merupakan teknologi baterai Lithium Ion (Li-Ion). Baterai Li-Ion memiliki densitas yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan jenis-jenis baterai lainnya seperti Nikel Kadmium (Ni-Cd) dan timbal-asam (Pb-O₂). Densitas baterai Li-Ion berada di kisaran 90-260 Wh/kg tergantung dari material yang digunakan [4]. Walaupun terbaru, baterai tetap mengalami degradasi pada pemakaian sisa umur penggunaan atau yang lebih sering disebut sebagai *Remaining Useful Life* (RUL). RUL dapat diartikan sebagai penurunan performa menuju kegagalan sebuah baterai seiring berjalannya waktu [5].

Apabila sudah mencapai masa akhir dari RUL tersebut, maka terdapat beberapa masalah yang dapat timbul. Pembengkakan baterai dapat menyebabkan kebakaran dan emisi racun dari baterai tersebut. Penyebab utama dari penurunan RUL adalah pengisian dan pengosongan, serta suhu baterai itu sendiri. telah dilakukan survei terhadap pengaruh pengisian dan pengosongan baterai terhadap RUL. Dilakukan percobaan pengosongan baterai 18650 keluaran sony dengan tingkat pengosongan sebesar 1C, 2C, dan 3C. Pada 50 siklus pertama, didapati bahwa baterai tersebut masih stabil. Degradasi yang signifikan terjadi pada siklus ke-52 dan seterusnya. Pada 1C dihasilkan penurunan sebesar 9,5%, 13,2% untuk 2C, dan sebesar 16,9% untuk tingkat pengosongan 3C [6]. Penyebab utama dari fenomena ini adalah dikarenakan adanya *loss* pada karbon di tingkat pengosongan yang lebih tinggi. Selain dari pengosongan dan pengisian, temperatur juga berperan penting terhadap degradasi baterai. Pada suhu 25°C hingga 45°C terdapat peningkatan pada kapasitas baterai. Namun, kapasitas tersebut mengurangi masa RUL baterai [7].



Gambar 1. Peningkatan Nilai PPM

Pada penelitian ini telah dikembangkan model PSO-LSTM untuk memprediksi RUL pada tahap pelatihan dan pengujian dengan menerapkan optimasi hiperparameter *window size* dan *hidden layer* secara stokastik. Optimasi tersebut dilakukan guna mencari solusi terbaik secara cepat dan memaksimalkan hiperparameter yang digunakan untuk hasil yang lebih akurat. Diharapkan bahwa model tersebut dapat dijadikan sebuah model prediksi yang dapat dimanfaatkan di industri baterai untuk kedepannya.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. PREDIKSI RUL

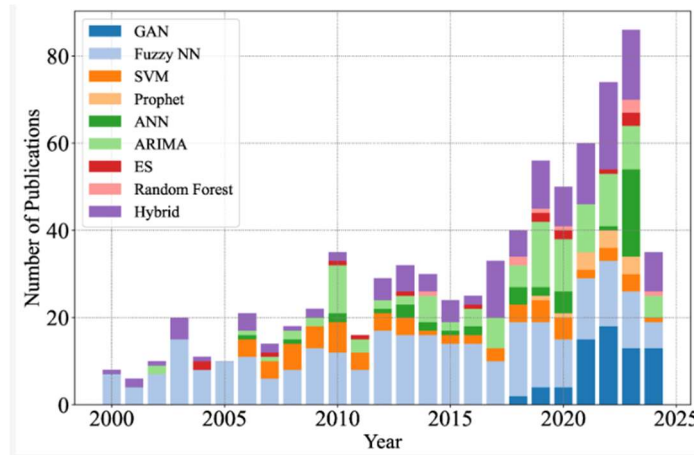
Terdapat tiga macam pendekatan yang bisa diterapkan pada prediksi RUL baterai berdasarkan pemahaman terhadap data dan sistem yang dimiliki. Tiga macam tersebut meliputi pendekatan berbasis data, pendekatan fisik, dan pendekatan hibrida. Pendekatan berbasis data memanfaatkan metode matematis dan model kecerdasan buatan untuk memprediksi, sementara pendekatan fisik merupakan pendekatan yang memanfaatkan model fisik(hardware) dari sistem. Masing-masing pendekatan tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan. Pada penelitian ini, digunakan pendekatan berbasis data dikarenakan kemudahan dalam implementasi [8]. Penelitian pertama terkait pendekatan berbasis data berawal dengan prediktif berdasarkan model CNN. untuk estimasi masalah RUL. Dalam penelitian itu, digunakan *layer* konvolusi, *pooling*, *squashing sigmoid*, hiperbolik, *rectifier*, dan normalisasi [9].

B. PENELITIAN SERUPA

Terdapat dua jenis model kecerdasan buatan, yakni prediksi non deret waktu dan prediksi deret waktu. Prediksi non deret waktu merupakan pemodelan yang datanya tidak berkaitan dengan waktu seperti model *Backpropagation*, *Neural Network*, , dan lain-lain. Sebaliknya, prediksi deret waktu sangat bergantung dengan waktu rekapan data seperti *Autoregressive Integrated Moving Area* (ARIMA), *Gated Recurrent Unit* (GRU), dan lain-lain. Terdapat peningkatan popularitas terhadap pemanfaatan prediksi deret waktu yang ditampilkan pada Gambar 1.2. Bisa dilihat, dari tahun 2000 sampai tahun 2024, ditemui bahwa penggunaan prediksi deret waktu meningkat kurang lebih sebanyak 80% [10].

Penelitian serupa telah dilakukan dengan model kecerdasan buatan yang berbeda, yakni dengan model ARIMA untuk memprediksi RUL dari dataset NASA *Prognosis Centre of Excellence* (PCoE), di mana digunakan metrik *Root Mean Square Error*

(RMSE) yang bernilai 0.209 [11] untuk model tersebut. Selain dari model ARIMA, model sederhana *Random Forest* juga telah digunakan dalam memprediksi RUL dengan dataset yang sama. Hiperparameter yang digunakan pada pemodelan ini adalah 42 *estimator*, 9 fitur maksimum, 10, minimum sampel, dan 10 node maksimum. Metrik yang diukur dari penelitian tersebut adalah RMSE di mana didapati nilai metrik yang memuaskan yakni 3.7574 apabila dibandingkan dengan model *Linear Regression* (7.3853) dan *Bayesian Network* (7.3856) [12]. Berdasarkan Gambar 2 mengenai statistik penggunaan prediksi deret waktu, masih sedikit penelitian yang dilakukan terhadap pemodelan hibrida. Pada penelitian ini, akan dibuat pemodelan pembelajaran mesin hibrida yakni PSO-LSTM untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi dari prediksi RUL baterai. Salah satu model hibrida yang pernah dimanfaatkan untuk melakukan prediksi terhadap RUL baterai adalah *Hawk Harris-Random Forest* model. Di mana model tersebut dibandingkan dengan *LightGBM*, dan model hibrida *Hawk Harris- LightGBM*. Model *Hawk Harris-Random Forest* memberikan hasil terbaik dengan nilai RMSE sekecil 46.35 [13].



Gambar 2. Statistik Penggunaan Prediksi Deret Waktu

Untuk estimasi masalah RUL. Dalam penelitian itu, digunakan *layer* konvolusi, pooling, *squashing sigmoid*, hiperbolik, rectifier, dan normalisasi [9].

C. MODEL PSO-LSTM

Terinspirasi dari kawanan hewan, algoritma metaheuristik PSO merupakan algoritma pencarian yang berbasis kecerdasan individu, di mana setiap partikel memiliki solusi terhadap penyelesaian masalah (*global best* dan *local best*). Algoritma ini mampu melakukan pembaharuan terhadap partikel-partikel di kawannya dengan rumus matematik sebagai berikut [14] :

$$v^{k+1}i, d = w^{k+1}i, d + c1r1 (pbest^{k+1} i, d - x^{k+1}i, d)(1)$$

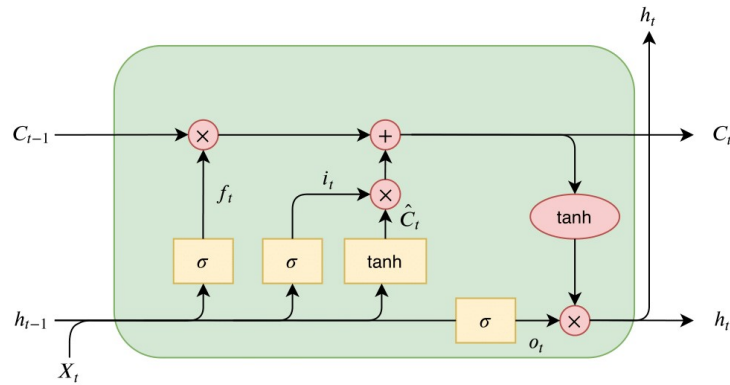
Algoritma cerdas ini akan dipadukan dengan model *Long LSTM* untuk memperoleh hasil akurasi yang lebih baik. LSTM merupakan pengembangan dari model *Recurrent Neural Network*(RNN). Model ini mengatasi masalah utama dari RNN, yakni masalah penurunan gradien pada saat pelatihan data berlebih. Hal tersebut diatasi dengan adanya fitur gerbang pada model LSTM. Terdapat tiga jenis gerbang pada model ini yakni gerbang *input* (2), *output* (3), dan *forget* (4). Ketiga gerbang tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut [15] :

$$i(t) = \sigma(Wi [ht - 1, xt] + bi) \quad (2)$$

$$f(t) = \sigma(Wi [ht - 1, xt] + bf) \quad (3)$$

$$o(t) = \sigma(Wi [ht - 1, xt] + bo) \quad (4)$$

Pada penelitian ini, algoritma PSO diajukan sebagai alat optimisasi prediksi dari model LSTM. PSO dapat menentukan ukuran jendela dari model tersebut dengan cerdas [16]. Ukuran jendela dapat didefinisikan sebagai ukuran data yang diambil dalam satu *frame*, jumlah data yang diambil berpengaruh terhadap akurasi hasil akhir dari prediksi model [17].



Gambar 3. Arsitektur LSTM

D. DATASET NASA PCOE

Dataset di atas merupakan kumpulan data pengukuran baterai 18650 dalam beberapa kondisi eksperimen tertentu. Terdapat dua jenis pengambilan data utama yakni pengisian dan pengosongan, pada penelitian ini akan dimanfaatkan data dengan jenis pengosongan untuk prediksi lanjut. Variasi dari tegangan baterai saat pengosongan dimulai dari 2.2 V hingga 2.7 V, sementara nilai arus adalah konstan yang berada di 1.5 A [18]. Tabel 1 akan menampilkan fitur lengkap dari jenis data pengosongan dari dataset Nasa PCoE yang dimaksud.

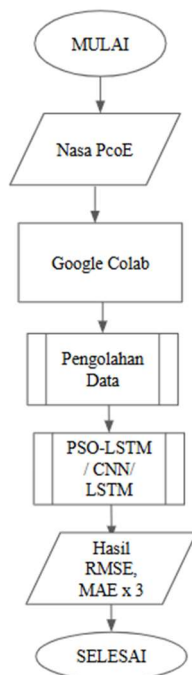
TABEL I
 FITUR DATASET NASA PCOE

Fitur	Deskripsi
Tegangan diukur	Tegangan baterai (V)
Arus diukur	Arus yang keluar dari baterai (A)
Suhu yang diukur	Suhu baterai yang diukur (C)
Beban Arus	Arus pada beban (A)
Beban Tegangan	Tegangan pada beban (V)
Siklus	Waktu siklus
Kapasitas	Kapasitas Baterai (Ahr)

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. METODOLOGI

Penelitian ini memanfaatkan Google Collab sebagai sarana pemrograman, di mana telah dimanfaatkan GPU bawaan milik perancang. Akan diunduh dataset B0007 yang bersumber dari NASA PCoE via Google drive yang dapat dihubungkan langsung kepada Google Colab. Terdapat dua fitur yang digunakan dari dataset tersebut, di antara lain adalah “Siklus” dan “Kapasitas”. Gambar 3 dapat dijadikan sebagai acuan untuk mempermudah pemahaman alur dari perencanaan yang sudah dibuat. Pengolahan data akan dilakukan sebesar 80:20 untuk pengujian dan pelatihan. 80:20 memberikan kestabilan yang lebih baik apabila dibandingkan dengan rasio lainnya seperti 70:30 ataupun 60:40 [19]. Akan diambil data sebanyak lima kali untuk mendapat rerata dari model yang sudah dibuat.



Gambar 4. Alur Metode Penelitian

B. KONFIGURASI HIPERPARAMETER

TABEL II
KONFIGURASI HIPERPARAMETER

PSO-LSTM	CNN	LSTM
Hidden Layer = Intelligent Window Size = Intelligent C1, C2 = 1.5, 2.0 W = 0.01 Epochs = 100 Batch Size = 32	Hidden Layer = 5 Filter = 5 Kernel = 5 Epochs = 100 Batch Size = 32	Hidden Layer = 5 Epochs = 100 Batch Size = 32

Untuk merealisasikan model hibrida PSO-LSTM yang akan dibuat, diperlukan juga beberapa konfigurasi dari hiperparameter model. Hiperparameter merujuk kepada parameter yang dimasukkan sesuai dengan keinginan pengguna. Hiperparameter umum yang digunakan di antara lain adalah *Hidden Layer*, *Window Size*, *Epochs*, dan *BatchSize*. Tabel 2 di atas sudah menampilkan konfigurasi dari hiperparameter yang akan dimanfaatkan pada penelitian ini [20].

C. METRIK EVALUASI

Sebagai tolak ukur dari keakuratan model yang sudah dirancang, akan digunakan beberapa metrik pengukuran standar yang digunakan, di antara lain adalah RMSE dan *Mean Absolute Error* (MAE). RMSE berfungsi untuk mengukur seberapa kecil kesalahan yang dimiliki berdasarkan pengurangan dari nilai asli dan nilai prediksi. Di mana, y_i merepresentasikan hasil prediksi dan y adalah bilangan data aktual. Berbeda dengan RMSE, MAE adalah kumpulan rata-rata kesalahan absolut tanpa membedakan antara kesalahan positif dan negatif. MAE. Nilai RMSE dan MAE yang baik berkisar dari 0 sampai 1, di mana nilai mendekati 0 memberikan hasil yang terbaik [21].

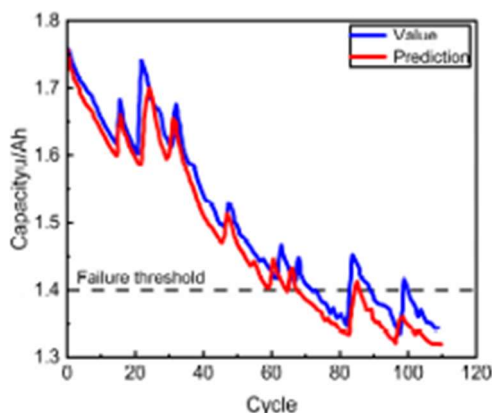
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y)^2}{N}} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y| \quad (6)$$

D. GRAFIK PREDIKSI

Selain dari pengukuran metrik, prediksi RUL dapat dilakukan secara visual dengan memanfaatkan grafik prediksi “siklus” terhadap “kapasitas”. Prediksi ini bertujuan untuk mengklasifikasi sifat *overfitting* dan *underfitting* pada data tersebut. Gambar 4

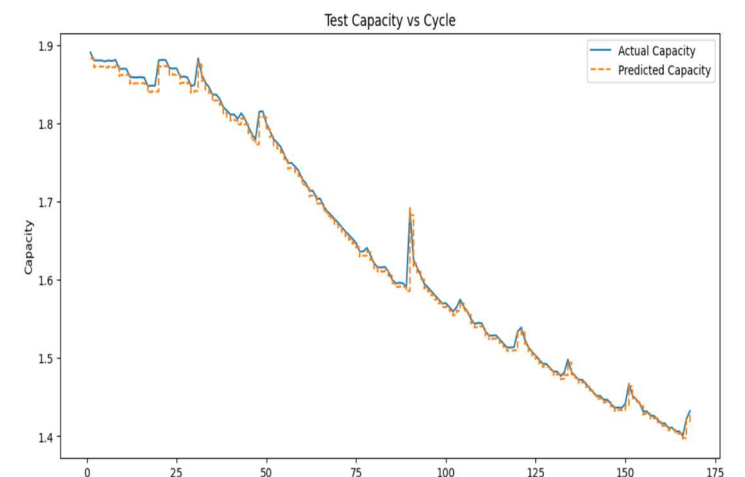
menampilkan contoh dari grafik prediksi yang akan dibuat. Pada contoh gambar 5, garis biru merupakan data asli yang digrafikan dan garis merah mengartikan hasil prediksi model.



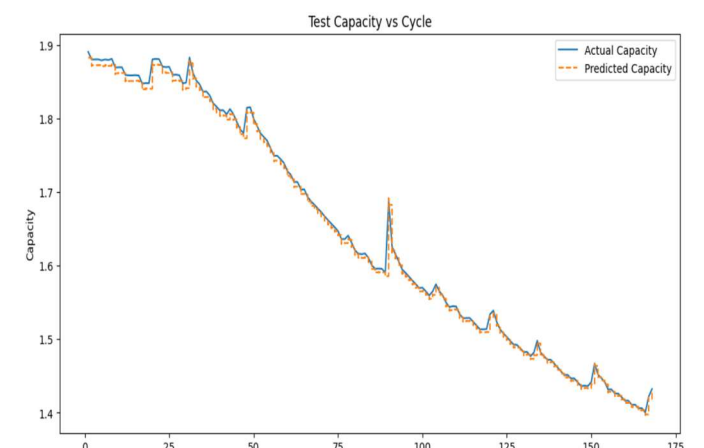
Gambar 5. Prediksi RUL

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6 dan 7 merupakan hasil visualisasi dari data yang asli dan terprediksi, di mana garis biru pada gambar menunjukkan hasil lsi sementara titik kuning merupakan hasil prediksi. Bisa dilihat bahwa hasil yang diprediksi cukup baik, namun model PSO-LSTM ini memiliki kecenderungan untuk *underfitting*. Hal ini dapat dicapai karena adanya terlalu banyak data yang digunakan pada model tersebut.



Gambar 6. Visualisasi PSO-LSTM Training



Gambar 7. Visualisasi PSO-LSTM Testing

TABEL III
HASIL PELATIHAN

Uji-Coba	PSO-LSTM		CNN		LSTM	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
#1	0,073	0,021	0,136	0,173	0,080	0,91
#2	0,074	0,021	0,137	0,174	0,082	0,093
#3	0,073	0,022	0,137	0,171	0,079	0,092
#4	0,075	0,022	0,136	0,170	0,083	0,09
#5	0,077	0,023	0,137	0,171	0,081	0,094
Avg	0,074	0,021	0,136	0,172	0,081	0,092

TABEL IV
HASIL PENGUJIAN

Uji-Coba	PSO-LSTM		CNN		LSTM	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
#1	0,069	0,02	0,132	0,167	0,090	0,093
#2	0,071	0,018	0,134	0,169	0,088	0,092
#3	0,070	0,019	0,133	0,168	0,089	0,095
#4	0,068	0,017	0,131	0,166	0,087	0,091
#5	0,072	0,021	0,135	0,170	0,091	0,095
Avg	0,070	0,021	0,133	0,168	0,089	0,093

Dapat dilihat dari hasil Tabel 3 maupun Tabel 4, model PSO-LSTM yang diajukan memberikan hasil terbaik dengan nilai kesalahan RMSE dan MAE terendah. Pada Tabel 3 dengan pelatihan (80%) didapati rerata MAE dan RMSE sebesar 0.074 dan 0.021. Hasil tersebut bisa dibandingkan dengan model CNN yang bernilai 0.136 dan 0.172. Model LSTM yang berdiri sendiri menghasilkan nilai 0.081 dan 0.092. Sifat serupa dapat dijumpai pada Tabel 4. Nilai MAE dan RMSE dari model PSO-LSTM yang didapatkan ketika pengujian adalah 0.070 dan 0.019, sementara rerata Model CNN adalah 0.133 dan 0.168 (MAE dan RMSE), lalu model LSTM menghasilkan nilai 0.089 dan 0.093 untuk masing-masing metrik. Model PSO-LSTM dapat memberikan nilai keakuratan tinggi untuk *deployment* pada sebuah *Battery Management System* (BMS) di kedepannya.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil prediksi dari grafik visualisasi dan metrik, dapat disimpulkan bahwa *window size* dan *hidden layer* model PSO-LSTM telah teroptimasi secara stokastik dengan baik. Hasil keakuratan tersebut dapat dilihat dari metrik pengukuran yang memiliki RMSE dan MAE sebesar 0.074 dan 0.021 untuk rata-rata data pelatihan, kemudian dengan nilai 0.070 dan 0.021 untuk pengujian. Model PSO-LSTM dapat dikembangkan lebih lanjut di dalam pembuatan BMS cerdas pada industri baterai EV.

KONFLIK KEPENTINGAN

Dengan ini, penulis menyatakan bahwa seluruh proses penelitian telah dilakukan secara independen dan objektif. Tidak terdapat konflik kepentingan, baik secara finansial, profesional, maupun pribadi, yang dapat memengaruhi representasi atau interpretasi hasil penelitian ini. Segala temuan disampaikan dengan integritas akademik demi kontribusi yang jujur terhadap pengembangan ilmu pengetahuan.

REFERENSI

- [1] G. Zola, D. Nugraheni, A. Rosiana, A. Dzamar, A. Pambudy, and N. Agustanta, "Inovasi kendaraan listrik sebagai upaya meningkatkan kelestarian lingkungan dan mendorong pertumbuhan ekonomi hijau di Indonesia," *Ekonomi Sumberdaya dan Lingkungan*, vol. 11, no. 3, pp. 2303–1220, 2023.
- [2] P. Hendratmoko and Y. E. R. U. Dewantoro, "Pemetaan Emisi CO₂ hasil kontribusi kegiatan transportasi di Kota Tegal Jawa Tengah," *Jurnal Keselamatan Transportasi Jalan (Indonesian Journal of Road Safety)*, vol. 5, no. 2, pp. 19–28, 2018. Available: <https://doi.org/10.46447/kjt.v5i2.46>
- [3] X. Zhao, H. Hu, H. Yuan, and X. Chu, "How does adoption of electric vehicles reduce carbon emissions? Evidence from China," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, p. e20296, 2023. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20296>
- [4] Perdana, F. A. (2021). Baterai Lithium. INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA, 9(2), 113. <https://doi.org/10.20961/inkui.v9i2.50082>
- [5] C. Xiongzi, Y. Jinsong, T. Diyin, and W. Yingxun, "Remaining useful life prognostic estimation for aircraft subsystems or components: A review," in *Proc. 10th IEEE Int. Conf. Electron. Meas. Instrum. (ICEMI)*, 2011, vol. 2, pp. 94.
- [6] Q. Dai, J. C. Kelly, L. Gaines, and M. Wang, "Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications," *Batteries*, vol. 5, no. 2, 2019. Available: <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>
- [7] L. Timilsina, P. R. Badr, P. H. Hoang, G. Ozkan, B. Papari, and C. S. Edrington, "Battery degradation in electric and hybrid electric vehicles: A survey study," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 42431–42462, 2023.



- [8] M. S. Reza, M. Mannan, M. Mansor, P. J. Ker, T. M. I. Mahlia, and M. A. Hannan, "Recent advancement of remaining useful life prediction of lithium-ion battery in electric vehicle applications: A review of modelling mechanisms, network configurations, factors, and outstanding issues," *Energy Reports*, vol. 11, Apr. 2024, pp. 4824–4848. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.039>
- [9] S. B. Navathe, W. Wu, S. Shekhar, X. Du, X. S. Wang, and H. Xiong, "Deep convolutional neural network based regression approach for estimation of remaining useful life," pp. E1–E1, 2016.
- [10] S. S. W. Fatima and A. Rahimi, "A review of time-series forecasting algorithms for industrial manufacturing systems," *Machines*, vol. 12, no. 6, 2024. Available: <https://doi.org/10.3390/machines12060380>
- [11] Zhou, Y., & Huang, M. (2016). Microelectronics Reliability Lithium-ion batteries remaining useful life prediction based on a mixture of empirical mode decomposition and ARIMA model. MR. Available : <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.07.151>
- [12] Sekhar, J. N. C., Domathoti, B., & Santibanez Gonzalez, E. D. R. (2023). Prediction of Battery Remaining Useful Life Using Machine Learning Algorithms. Sustainability (Switzerland), 15 (21). Available : <https://doi.org/10.3390/su152115283>
- [13] S. Jafari., & Y. C. Byun (2023). Optimizing Battery RUL Prediction of Lithium-Ion Batteries Based on Harris Hawk Optimization Approach Using Random Forest and LightGBM. IEEE Access, 11(July), 87034–87046. Available : <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3304699>
- [14] P. Collet, & J.-P. Rennard, (2011). Stochastic Optimization Algorithms. Intelligent Information Technologies, March. Available : <https://doi.org/10.4018/9781599049410.ch064>
- [15] Song, X., Yang, F., Wang, D., & Tsui, K. L. (2019). Combined CNN-LSTM Network for State-of-Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries. IEEE Access, 7, 88894–88902. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2926517>
- [16] A. Slowik (2016). Particle Swarm Optimization. The Industrial Electronics Handbook - Five Volume Set, July. Available : https://doi.org/10.1007/978-3-319-46173-1_2
- [17] Ermshaus, Schäfer., & Leser. (2023). Window Size Selection in Unsupervised Time Series Analytics: A Review and Benchmark. Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 13812 LNAI, 83–101. Available : https://doi.org/10.1007/978-3-031-24378-3_6
- [18] S, Hasib. A., Islam, S., Chakraborty, R. K., Ryan, M. J., Saha, D. K., Ahamed, M. H., Moyeen, S. I., Das, S. K., Ali, M. F., Islam, M. R., Tasneem, Z., & Badal, F. R. (2021). A Comprehensive Review of Available Battery Datasets, RUL Prediction Approaches, and Advanced Battery Management. IEEE Access, 9 (June), 86166–86193. Available : <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3089032>
- [19] Kebonye, N. M. (2021). Exploring the novel support points-based split method on a soil dataset. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 186(June), 110131. Available : <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110131>
- [20] Loussaief, S., & Abdelkrim, A. (2018). Convolutional Neural Network hyper-parameters optimization based on Genetic Algorithms. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 9(10), 252–266. Available : <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.091031>
- [21] Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) -Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geoscientific Model Development, 7(3), 1247–1250. Available : <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>

Tinjauan Literatur: Deteksi Anomali Berbasis Analisis Waktu pada CAN Bus Kendaraan Listrik

Literature Review: Timing Analysis Based Anomaly Detection on Electric Vehicle CAN Bus

Putu Ayu Citra Setiawan¹, Ida Ayu Dwi Giriantari², Ngurah Indra ER³

¹ Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Udayana, Gedung Pacasarjana Universitas Udayana; email: setiawan.2381711026@student.unud.ac.id
^{2,3} Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana; email: 2 dayu.giriantari@unud.ac.id, 3indra@unud.ac.id

[Dikirimkan: 7 Januari 2025, Direvisi: 23 Mei 2025, Diterima: 31 Mei 2025]
Corresponding Author: Putu Ayu Citra Setiawan

INTISARI — Perkembangan teknologi otomotif modern menekankan pentingnya konektivitas dan otonomi kendaraan, dengan tujuan meningkatkan keselamatan dan kenyamanan. Salah satu aspek krusial dari kendaraan modern adalah sistem komunikasi antar ECU (Electronic Control Units), yang sebagian besar menggunakan CAN Bus sebagai protokol utama. CAN Bus mengatur berbagai fungsi vital kendaraan, mulai dari sistem pengereman hingga fitur keselamatan, yang menjadikannya target potensial bagi ancaman keamanan. Oleh karena itu, industri otomotif mengembangkan dua pendekatan utama untuk mengatasi masalah keamanan ini. Pertama, pertahanan pasif melalui protokol keamanan yang mencakup enkripsi, otentikasi, dan verifikasi pesan dan kedua, deteksi anomali yang menggunakan teknologi canggih. Beberapa metode deteksi anomali yang telah diperkenalkan antara lain K-Means clustering, Support Vector Machines (SVM), dan Deep Learning, masing-masing menawarkan keunggulan dalam mendeteksi pola serangan tertentu. Namun, salah satu pendekatan yang semakin populer adalah analisis waktu, yang memanfaatkan pola waktu antar pesan dan clock skew pada CAN Bus untuk mengidentifikasi perilaku mencurigakan dan mendeteksi anomali secara real-time. Meskipun metode ini telah menunjukkan efektivitas dalam mendeteksi berbagai jenis serangan, tantangan utama adalah kemampuannya dalam mengidentifikasi serangan yang sangat tersembunyi dan tidak terlihat oleh metode tradisional. Penelitian ini memberikan pemahaman tentang berbagai pendekatan deteksi anomali pada jaringan CAN Bus kendaraan listrik, dengan fokus utama pada analisis waktu. Dengan mengkaji berbagai pendekatan, penelitian ini memberikan wawasan yang berharga dalam meningkatkan keamanan kendaraan listrik dan ekosistem transportasi cerdas secara keseluruhan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode berbasis analisis waktu dapat mendeteksi berbagai jenis serangan, seperti spoofing, replay attacks, dan denial-of-service (DoS), dengan efisiensi tinggi.

KATA KUNCI — Analisis Waktu Kedatangan, Deteksi Anomali, Jaringan Area Kontroler, Kendaraan Listrik, Offset Jam, Skew Jam.

ABSTRACT — The development of modern automotive technology emphasizes the importance of vehicle connectivity and autonomy, with the aim of enhancing safety and comfort. Due to its role in managing critical vehicle functions and its vulnerability to security threats, the automotive industry has developed two primary approaches to address CAN Bus security. Therefore, the automotive industry has developed two main approaches to address this security issue. First, passive defense through security protocols that include encryption, authentication, and message verification, and second, anomaly detection using advanced technologies. Several anomaly detection methods have been introduced, including K-Means clustering, Support Vector Machines, and Deep Learning, each offering advantages in detecting specific attack patterns. However, one increasingly popular approach is time analysis, which leverages message inter-arrival patterns and clock skew on the CAN Bus to identify suspicious behavior and detect anomalies in real-time. Although this method has shown effectiveness in detecting various types of attacks, the main challenge lies in its ability to identify highly concealed attacks that may not be visible to traditional methods. This research provides an understanding of various anomaly detection approaches on electric vehicle CAN Bus networks, with a primary focus on time analysis. By reviewing several approaches, this study offers valuable insights into improving the security of electric vehicles and the overall smart transportation ecosystem. The results show that time-based analysis methods can detect various types of attacks, such as spoofing, replay attacks, and denial-of-service, with high efficiency.

KEYWORDS — Anomaly Detection, Clock Offsets, Clock Skew, Controller Area Network, Kendaraan Listrik, Time Arrival Analysis.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan industri otomotif saat ini bergerak pesat ke arah di mana konektivitas dan otonomi menjadi fitur utama dalam desain dan pengoperasian kendaraan. Inovasi dalam teknologi kendaraan, seperti kendaraan yang terhubung dan kendaraan dengan kemampuan mengemudi otonom (autonomous vehicles), diharapkan akan merombak paradigma transportasi masa depan. Kendaraan yang terhubung memungkinkan komunikasi antar kendaraan (Vehicle to Vehicle) dan antara kendaraan dengan

infrastruktur jalan, yang dapat meningkatkan kesadaran situasional dan mendukung pengambilan keputusan secara real-time untuk mengurangi potensi kecelakaan. Kendaraan otonom dikembangkan dengan tujuan mengurangi jumlah kecelakaan lalu lintas yang disebabkan oleh faktor manusia [3], seperti kelelahan atau kesalahan pengemudi. Dengan sistem kontrol yang sepenuhnya otomatis, kendaraan ini dapat menghindari kecelakaan dengan memanfaatkan sensor canggih, kamera, radar, dan algoritma kecerdasan buatan (AI) untuk mengidentifikasi dan merespons potensi bahaya lebih cepat daripada manusia. Selain itu, kendaraan otonom juga berpotensi mengurangi kemacetan lalu lintas, karena mereka dapat mengoptimalkan alur lalu lintas dengan berkoordinasi secara langsung dengan kendaraan lain, mengatur kecepatan dan jalur secara efisien, serta meminimalkan jeda antara kendaraan. Meskipun potensi manfaatnya besar, pengembangan kendaraan yang terhubung dan otonom juga menghadirkan tantangan baru, terutama dalam hal keamanan dan privasi [1][2][3]. Kendaraan yang terhubung memerlukan sistem komunikasi yang aman untuk mencegah potensi serangan siber, sementara kendaraan otonom perlu dipastikan dapat beroperasi dengan aman dalam lingkungan yang kompleks dan dinamis. Oleh karena itu, industri otomotif harus terus mengembangkan dan mengimplementasikan solusi teknologi yang tidak hanya memperhatikan inovasi dan kenyamanan, tetapi juga mengutamakan aspek keamanan dan perlindungan data pribadi pengguna.

CAN Bus (Controller Area Network) adalah protokol komunikasi yang digunakan dalam kendaraan modern, termasuk kendaraan listrik. Keamanan jaringan CAN bus menjadi masalah yang krusial karena potensi serangan yang dapat merusak sistem kendaraan dan membahayakan keselamatan karena Bus CAN berfungsi sebagai saluran komunikasi utama antar ECU yang mengatur berbagai fitur kendaraan, seperti sistem pengereman, pengendalian mesin, suspensi, sistem hiburan, dan bahkan fitur keselamatan seperti airbag. Karena itu serangan yang dilakukan terhadap bus CAN dan ECU memiliki potensi untuk mengakses dan mengendalikan berbagai subsistem kendaraan [3]. Jika ada serangan yang berhasil menembus sistem ini, pelaku dapat mengontrol atau mengubah fungsi-fungsi vital kendaraan.

Untuk meningkatkan keamanan jaringan kendaraan, terdapat dua pendekatan utama yang dapat diambil. Pendekatan pertama adalah melalui pertahanan pasif, yang berfokus pada pengembangan dan penerapan protokol keamanan atau kerangka jaringan keamanan untuk melindungi komunikasi di dalam kendaraan dan antara kendaraan dengan sistem luar. Protokol keamanan ini biasanya mencakup enkripsi, otentikasi, kontrol akses, dan verifikasi pesan untuk mencegah potensi serangan yang bisa mengeksploitasi celah keamanan di dalam sistem kendaraan. Beberapa protokol ini dapat menangkal serangan seperti man-in-the-middle, spoofing, dan replay attacks, yang dapat merusak integritas data yang dikirimkan di dalam jaringan kendaraan. Namun, meskipun protokol keamanan pasif ini dapat memberikan lapisan perlindungan, mereka tidak dapat sepenuhnya mengatasi ancaman yang terus berkembang, terutama serangan yang terjadi setelah akses ke jaringan kendaraan diperoleh. Oleh karena itu, pendekatan kedua yang semakin mendapatkan perhatian adalah melalui deteksi anomali berbasis teknologi canggih [4].

Deteksi anomali berfokus pada pemantauan dan analisis aktivitas jaringan kendaraan untuk mengidentifikasi pola yang tidak biasa atau mencurigakan yang mungkin menunjukkan adanya serangan atau pelanggaran keamanan. Tujuan utama dari deteksi anomali ini adalah untuk mendeteksi aktivitas yang menyimpang dari pola komunikasi normal, yang sering kali mengindikasikan adanya ancaman seperti serangan denial-of-service (DoS), fuzzing, spoofing, atau replay attacks. Teknik deteksi ini sangat penting dalam konteks kendaraan otonom dan sistem kontrol kendaraan yang sangat bergantung pada jaringan komunikasi internal, seperti Controller Area Network (CAN) bus, di mana serangan terhadap jaringan ini dapat membahayakan keselamatan kendaraan dan pengendara.

Beberapa algoritma pembelajaran mesin dan teknik analisis data yang telah diterapkan untuk deteksi anomali dalam jaringan CAN termasuk K-Means clustering [5-13][23], Support Vector Machines (SVM) [9][14-18], serta pendekatan berbasis Deep Learning [19-22][24]. Algoritma K-Means, sebagai metode klusterisasi, bekerja dengan cara mengelompokkan data yang memiliki karakteristik serupa ke dalam grup atau kluster. Dengan memanfaatkan pendekatan ini, sistem deteksi anomali dapat mempelajari pola komunikasi normal dari jaringan kendaraan dan mengidentifikasi data baru yang tidak sesuai dengan pola tersebut, sehingga dapat mengindikasikan adanya anomali atau serangan. Selain itu, SVM digunakan untuk memisahkan data ke dalam kategori yang berbeda (misalnya, normal vs anomali) berdasarkan fitur-fitur tertentu yang diekstraksi dari data CAN. SVM dapat memberikan hasil yang sangat baik dalam situasi di mana data bersifat non-linear atau memiliki dimensi yang sangat tinggi. Sementara itu, teknik Deep Learning, khususnya Autoencoders atau Recurrent Neural Networks (RNN), digunakan untuk mendeteksi anomali yang lebih kompleks dan tidak dapat dengan mudah dikenali oleh algoritma tradisional.

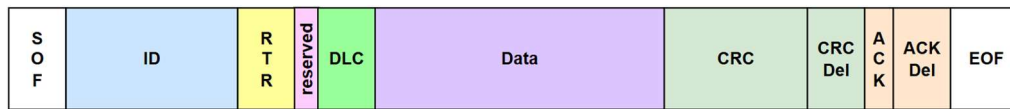
Meskipun algoritma ini sudah terbukti efektif dalam mendeteksi berbagai jenis serangan dan anomali, salah satu tantangan utama adalah kemampuan untuk mendeteksi serangan yang sangat tersembunyi atau yang disamarkan dengan sangat baik. Dalam konteks keamanan, deteksi anomali berbasis analisis clock telah muncul sebagai pendekatan inovatif. Analisis ini memanfaatkan pola waktu antar pesan untuk mendeteksi perilaku yang tidak biasa, yang dapat mengindikasikan adanya serangan atau kerusakan sistem. Keunggulan pendekatan ini terletak pada kemampuannya untuk mendeteksi anomali secara real-time, sehingga memungkinkan respons cepat terhadap ancaman yang muncul. Dengan meningkatnya kompleksitas dan konektivitas kendaraan listrik, literatur ini mengeksplorasi berbagai pendekatan yang digunakan dalam deteksi anomali pada komunikasi CAN Bus dengan fokus utama pada analisis clock, serta tantangan dan peluang yang terkait dengan implementasi teknologi ini dalam lingkungan dunia nyata.

II. LANDASAN TEORI

A. CONTROLLER AREA NETWORK (CAN)

Controller Area Network (CAN) merupakan standar jaringan yang memanfaatkan protokol serial untuk pertukaran pesan antar perangkat. Diperkenalkan secara resmi pada tahun 2011 melalui ISO 11898-1:2011 [41], standar ini menyediakan spesifikasi

lengkap untuk mengatur koneksi antara Electronic Control Units (ECU). Karena keandalannya yang sangat baik, kinerja real-time yang konsisten, dan kemudahan dalam pemasangan kabel, CAN bus telah menjadi pilihan utama bagi produsen mobil besar di seluruh dunia [20]. CAN bus mengumpulkan aliran data cabang dari berbagai sistem kontrol inti kendaraan, seperti mesin, sistem transmisi, sistem bodi, serta peralatan listrik lainnya, yang semuanya saling terhubung dalam satu jaringan. Dengan cara ini, berbagai informasi penting terkait kinerja kendaraan, seperti suhu mesin, status baterai, kecepatan kendaraan, dan kondisi sistem rem, dapat dipertukarkan secara real-time antara ECU, memungkinkan pemantauan dan pengendalian kendaraan yang lebih efektif. Keuntungan lain dari penggunaan CAN bus adalah kemampuan untuk mengurangi kompleksitas kabel, karena semua ECU dapat terhubung melalui satu jaringan pusat, yang mempermudah perawatan dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.



Gambar 1. Struktur Data Frame CAN

Start of Frame (SOF) digunakan untuk menginisialisasi bus ketika berada dalam keadaan idle, menandakan dimulainya transmisi pesan. Arbitration Field terdiri dari 11-bit yang berfungsi sebagai identitas pesan, dengan bit ke-12 sebagai RTR (Remote Transmission Request), yang membedakan pesan data dengan permintaan data [41]. Control Field mencakup dua bit yang disisihkan untuk cadangan dan Data Length Code (DLC) sepanjang 4-bit, yang menunjukkan panjang data yang dikirimkan, berkisar antara 0 hingga 8 byte. Data Field berisi data aktual yang akan ditransmisikan antar node, dengan panjang yang bervariasi sesuai dengan DLC [30]. CRC Field memastikan integritas data dengan menggunakan Cyclic Redundancy Check (CRC) untuk mendeteksi kesalahan transmisi [42]. Acknowledge Field terdiri dari bagian ACK dan ACK delimiter, yang masing-masing diwakili oleh satu bit untuk memberi sinyal apakah pesan diterima dengan benar [29]. Terakhir, End of Frame menandakan berakhirnya frame dengan menggunakan pengecekan tujuh bit recessive, memastikan frame telah selesai ditransmisikan. Semua field ini bekerja bersama untuk menjamin bahwa pesan dikirim secara terstruktur dan andal dalam jaringan CAN [48].

B. WAKTU ANTAR PESAN (INTER-ARRIVAL TIME)

Waktu antar pesan (Inter-Arrival Time) adalah selang waktu antara kedatangan dua pesan berturut-turut dalam sebuah sistem komunikasi, seperti Controller Area Network (CAN Bus). Dalam konteks CAN Bus, waktu antar pesan memiliki peran yang sangat penting karena memberikan gambaran tentang pola komunikasi antar Electronic Control Units (ECU) yang ada di dalam kendaraan atau sistem yang lebih besar. Sistem CAN digunakan dalam kendaraan untuk memungkinkan komunikasi antar berbagai ECU yang mengontrol berbagai fungsi kendaraan, seperti sistem penggerak, kontrol mesin, dan sistem keselamatan.

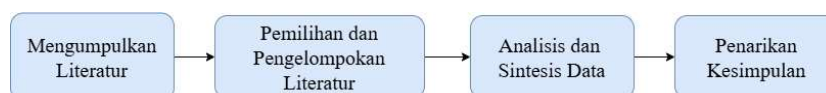
Pola waktu antar pesan pada CAN Bus biasanya konsisten karena banyak pesan yang dikirimkan secara periodik atau dalam interval yang telah ditentukan [53]. Misalnya, sensor kendaraan yang mengukur suhu mesin atau tekanan bahan bakar mengirimkan data secara berkala pada interval waktu tertentu. ECU yang mengontrol rem atau sistem pengereman otomatis juga mengirimkan data dengan frekuensi tetap untuk memastikan kelancaran komunikasi antar sistem. Keberlanjutan dan konsistensi waktu antar pesan ini adalah karakteristik utama dari komunikasi yang sah dalam jaringan CAN.

C. CLOCK SKEW

Jam komputer menggunakan kristal kuarsa untuk menjaga akurasi waktu, namun perbedaan fisik pada tingkat atom saat pembuatan menyebabkan variasi frekuensi osilasi, sehingga timbul ketidakakuratan waktu yang dikenal sebagai clock skew [51]. Clock skew diukur dalam satuan mikrodetik per detik ($\mu\text{s/s}$), yang sering disebut sebagai parts per million (ppm). Ini menggambarkan seberapa cepat dua jam yang tidak disinkronkan akan bergerak relatif satu sama lain, yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan dalam perangkat jaringan berdasarkan perilaku waktu mereka. Dalam pemanfaatan fitur clock skew pada Intrusion Detection System (IDS), waktu antar-transmisi (inter-transmission times) dari pesan yang secara periodik dikirimkan oleh suatu Electronic Control Unit (ECU) dipengaruhi oleh karakteristik unik dari clock skew-nya [52]. Clock skew menyebabkan setiap ECU memiliki pola waktu antar-transmisi pesan yang unik dan dapat diukur. Fenomena ini memberikan peluang untuk mengidentifikasi sumber pesan dengan memanfaatkan pola clock skew. Karena karakteristik clock skew cenderung stabil untuk setiap ECU, pola waktu antar-transmisi pesan yang dihasilkan oleh ECU tertentu akan konsisten. Dengan menganalisis pola tersebut, IDS dapat memverifikasi keaslian sumber pesan dan mendeteksi anomali, seperti adanya pesan palsu (spoofed messages) yang dikirimkan oleh ECU yang berbeda. Pendekatan ini menjadi penting dalam konteks keamanan, khususnya pada sistem komunikasi seperti Controller Area Network (CAN bus), di mana deteksi dini terhadap anomali sangat penting untuk mencegah serangan siber yang dapat memengaruhi integritas dan kinerja sistem.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kualitatif dengan tujuan utama mengkaji metode deteksi anomali berbasis analisis waktu dalam sistem komunikasi jaringan. Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan pemahaman mendalam mengenai mekanisme deteksi anomali melalui analisis temporal dan dampaknya terhadap keamanan jaringan.



Gambar 2. Skema Penelitian

Gambar 2 merupakan skema dari alur penelitian ini. Pada tahapan awal peneliti melakukan pengumpulan literatur terkait berbagai pendekatan deteksi anomali pada komunikasi CAN Bus pada kendaraan listrik berbasis analisis clock. Literatur yang relevan dikumpulkan dari berbagai database akademik seperti Google Scholar, IEEE Xplore, SpringerLink, dan Science Direct. Pencarian dilakukan menggunakan kata kunci seperti “Anomaly Detection”, “CAN Bus Anomaly Detection”, “Clock based IDS CAN Bus”. Artikel ilmiah yang dikumpulkan merupakan artikel yang dipublikasi dalam kurun waktu 9 tahun terakhir (2015-2024). Setelah pengumpulan, dilakukan penyaringan lebih lanjut.

TABEL I
KRITERIA INKLUSI DAN EKSKLUSI

Tahapan	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Tahap Inisiasi	<ul style="list-style-type: none"> - Studi yang menggunakan metode berbasis analisis waktu (seperti analisis delay, clock skew, timestamp). - Dipublikasikan pada tahun 2015 -2024. - Berasal dari prosiding atau jurnal - Ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa inggris. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hanya membahas anomali berbasis payload atau konten data tanpa mempertimbangkan aspek waktu. - Dipublikasikan diluar tahun 2015 -2024 - Fokus penelitian bukan pada kendaraan listrik. - Tidak menggunakan pendekatan berbasis waktu
Tahap 1 – Berdasarkan judul dan abstrak	<ul style="list-style-type: none"> - Mengusulkan atau mengembangkan metode deteksi anomali pada CAN Bus berbasis waktu. - Menyediakan arsitektur, model, atau framework deteksi. 	<ul style="list-style-type: none"> - Hanya membahas identifikasi serangan tanpa solusi deteksi. - Menggunakan teknik berbasis konten/payload saja tanpa aspek analisis waktu. - Studi tentang jaringan selain CAN Bus (misal: Ethernet)
Tahap 2 – Teks Penuh	<ul style="list-style-type: none"> - Menjelaskan metode deteksi anomali berbasis waktu secara detail (algoritma, eksperimen, atau hasil uji). - Mencantumkan hasil evaluasi atau validasi sistem deteksi pada CAN Bus kendaraan listrik. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak menyediakan informasi teknis mendetail tentang metode deteksi. - Penelitian berbasis simulasi tanpa validasi terhadap kendaraan listrik nyata atau data nyata.

Setelah tahap penyaringan, artikel diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori topik sesuai dengan tema penelitian, yaitu bagaimana Pemanfaatan fitur waktu pada deteksi anomali, Dataset dan ekstraksi fitur berbasis waktu, Teknik Evaluasi model deteksi anomali serta Tantangan dan peluang lebih lanjut terkait deteksi anomali pada can bus kendaraan listrik berbasis analisis waktu. Pada Analisis dan Sintesis Data, peneliti melakukan eksplorasi menyeluruh terhadap setiap kategori yang telah diidentifikasi untuk menemukan tema-tema utama yang muncul dari data yang ada. Proses ini tidak hanya melibatkan identifikasi tema-tema tersebut, tetapi juga mengupas lebih dalam konteks dan makna yang terkandung dalam setiap tema. Peneliti berusaha memahami bagaimana setiap tema berkontribusi dalam memperkaya pemahaman tentang mekanisme dan efektivitas deteksi anomali pada CAN Bus yang berbasis analisis waktu. Selain itu, peneliti membandingkan temuan dari berbagai sumber literatur untuk mengidentifikasi pola-pola umum serta perbedaan yang signifikan antara pendekatan yang ada, sehingga bisa menarik kesimpulan yang lebih solid. Kemudian pada tahap akhir dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan analisis yang sudah dilakukan tentang deteksi anomali berbasis fitur waktu.

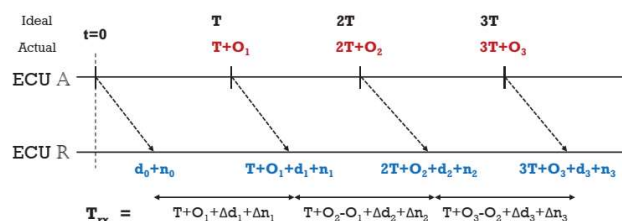
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. EKSTRAKSI FITUR BERBASIS WAKTU

Ekstraksi fitur berbasis waktu adalah proses identifikasi dan pemanfaatan informasi berbasis waktu dari suatu aliran data untuk menggambarkan karakteristik atau perilaku sistem yang sedang dianalisis. Dalam jaringan seperti Controller Area Network (CAN) pada kendaraan, fitur berbasis waktu digunakan untuk mengevaluasi pola komunikasi antar pesan yang dikirimkan oleh Electronic Control Units (ECUs). Proses ekstraksi fitur berbasis waktu ini sangat penting dalam mendeteksi anomali atau serangan yang dapat mempengaruhi integritas dan keandalan sistem kendaraan.

1) PENGUKURAN INTERVAL WAKTU ANTAR PESAN

Interval waktu antar pesan adalah salah satu fitur paling mendasar dalam jaringan CAN, di mana setiap pesan memiliki timestamp yang menunjukkan kapan pesan tersebut dikirim. Dengan mengukur interval antar pesan (misalnya, seberapa cepat atau lambat pesan-pesan tersebut dikirim), kita dapat mengidentifikasi pola komunikasi normal dan mengamati perubahan yang mungkin mengindikasikan adanya masalah atau serangan. Penelitian [42,54,56] memanfaatkan periodisitas pesan untuk mengekstrak dan memperkirakan clock skew pengirim, yang kemudian digunakan untuk fingerprint ECU pengirim tersebut.



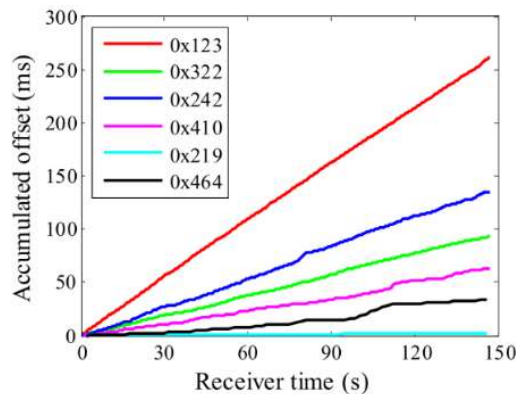
Gambar 3. Analisis Waktu Kedatangan

Pada Gambar 1, ECU A mengirimkan pesan secara periodik setiap T ms, yang seharusnya terjadi pada interval waktu yang tetap, yaitu T, 2T, 3T, dan seterusnya. Namun, pada kenyataannya, ECU R yang menerima pesan tersebut hanya memiliki informasi

waktu dari timestamp yang dimilikinya. Hal ini menyebabkan adanya clock skew yang akan menghasilkan sedikit pergeseran atau offset antara waktu pengiriman yang ideal dengan waktu pengiriman yang tercatat oleh ECU R [42]. Dalam hal ini, pengukuran terhadap interval waktu antara pesan-pesan yang diterima ECU R akan mengalami sedikit perubahan karena perbedaan antara jam ECU A dan ECU R. Persamaan $Tr_{x,i} = T + \Delta O_i + \Delta d_i + \Delta n_i$ menggambarkan perhitungan interval kedatangan pesan pada sistem, seperti jaringan CAN. Dimana T adalah interval ideal antara pesan, ΔO_i adalah pergeseran jam pada ECU penerima, Δd_i adalah delay transmisi pesan, dan Δn_i adalah variasi atau gangguan dalam waktu kedatangan pesan [56]. Dengan menghitung $Tr_{x,i}$, sistem dapat mendeteksi penyimpangan waktu yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti clock skew, delay jaringan, atau noise, yang dapat menunjukkan adanya serangan atau gangguan dalam jaringan. Analisis ini sangat penting untuk sistem deteksi intrusi yang mengandalkan pengamatan pola waktu pesan untuk mendeteksi anomali. Pendekatan berbasis waktu ini memberikan fondasi penting bagi sistem deteksi intrusi yang tidak bergantung pada isi pesan, melainkan pada perilaku waktu pengirimannya—menjadikannya pertahanan yang halus namun efektif terhadap potensi serangan siber.

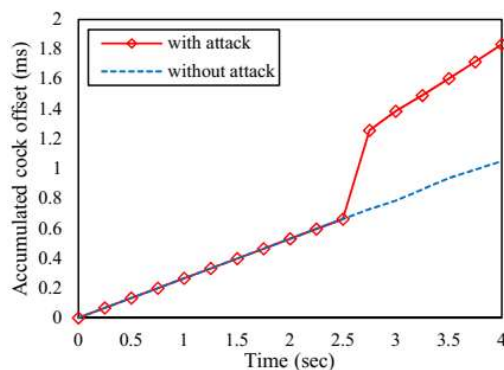
2) ANALISIS DISTRIBUSI WAKTU

Dengan memantau waktu antar pesan, kita dapat menggambarkan distribusi waktu pesan-pesan yang dikirimkan pada CAN bus. Jika terdapat anomali dalam distribusi ini—misalnya, pesan dikirim lebih cepat atau lebih lambat dari yang seharusnya—sistem dapat mengidentifikasi potensi masalah. Analisis distribusi waktu berfokus pada bagaimana waktu antar pesan dikirimkan dan diterima, serta mengidentifikasi perbedaan-perbedaan waktu (seperti clock skew) yang dapat menunjukkan anomali atau masalah dalam komunikasi antar ECU. Dalam konteks ini, analisis tersebut mengamati distribusi offset waktu antar pesan yang dikirim dan diterima, serta bagaimana perbedaan waktu tercermin dalam kemiringan garis pada grafik. Hal ini memberikan wawasan mengenai ketepatan dan konsistensi sinkronisasi waktu antar perangkat di jaringan CAN, yang penting untuk mendeteksi potensi masalah atau serangan. Salah satu tahapan analisis distribusi waktu dilakukan analisis hubungan antara akumulasi offset dan waktu penerima pesan dalam jaringan CAN, seperti yang dijelaskan dalam contoh salah satu kendaraan pada penelitian sebelumnya [42, 61].



Gambar 4. Hubungan antara Akumulasi Offset dan Waktu Penerima untuk Pesan-pesan pada Jaringan CAN [61]

Pada gambar di atas, setiap garis mewakili hubungan yang berbeda dari setiap pesan, dan kemiringan (*slope*) setiap garis menunjukkan *clock skew* dari ECU relatif yang terlibat. Clock skew ini mencerminkan perbedaan waktu antara jam ECU pengirim dan jam ECU penerima, yang dapat digunakan untuk menganalisis sinkronisasi waktu antar ECU dalam jaringan CAN. Selain pada data normal, analisis perbandingan hubungan antara akumulasi *offset* dan waktu penerima pesan dilakukan juga pada data yang terkontaminasi anomali atau intrusi dan data normal.



Gambar 5. Perbandingan Hubungan antara Akumulasi Offset dan Waktu Penerima untuk Pesan-Pesan pada Jaringan CAN pada Data Terkontaminasi Anomali dan Data Normal [42]

Grafik pada Gambar 3 menggambarkan bagaimana nilai offset jam yang terakumulasi berfluktuasi baik dalam kondisi normal (tanpa serangan) maupun ketika serangan DoS (*Denial of Service*) dilancarkan. Dalam kondisi normal, nilai offset jam biasanya berubah secara perlahan dan stabil, mencerminkan keakuratan komunikasi antar ECU dalam jaringan. Namun, ketika ECU Z melancarkan serangan DoS, terdapat perubahan yang sangat tajam dan tiba-tiba pada nilai offset jam yang terakumulasi, yang langsung bergerak ke arah positif. Pola perubahan akumulasi offset waktu bukan hanya merefleksikan performa sinkronisasi antar

ECU, tetapi juga dapat berfungsi sebagai indikator sensitif terhadap serangan siber seperti DoS. Dengan memanfaatkan perubahan kemiringan dan pola distribusi offset secara cermat, sistem deteksi dapat mengidentifikasi deviasi dari perilaku komunikasi normal, menjadikan analisis temporal sebagai komponen penting dalam strategi keamanan jaringan CAN yang responsif dan presisi.

B. EVALUASI MODEL DETEKSI ANOMALI

Model evaluasi penting untuk menilai sejauh mana model deteksi berbasis clock dapat secara akurat mendeteksi gangguan atau perubahan yang mencurigakan dalam waktu yang dikirimkan antar perangkat dalam jaringan. Tabel III merangkum beberapa model evaluasi yang digunakan untuk menilai kinerja sistem deteksi atau klasifikasi. Cross Validation digunakan untuk menguji model dengan membagi dataset menjadi beberapa subset untuk memastikan generalisasi model. F1-score menggabungkan precision dan recall untuk mengevaluasi keseimbangan antara keduanya, terutama pada dataset yang tidak seimbang. Confusion Matrix Evaluation memberikan gambaran yang lebih rinci tentang kinerja model dengan menghitung TP, FP, TN, dan FN untuk memperoleh metrik lain seperti akurasi dan sensitivitas. Average Deviation Error (ADE) mengukur kesalahan rata-rata dalam prediksi, yang sangat berguna dalam model prediksi berbasis waktu. Sedangkan False Alarm Rate (FAR) mengukur tingkat alarm palsu yang dihasilkan oleh sistem, yang penting untuk menghindari prediksi positif palsu. Secara keseluruhan, model-model evaluasi ini memberikan alat yang komprehensif untuk menilai dan membandingkan kinerja sistem deteksi intrusi atau klasifikasi berdasarkan berbagai metrik.

TABEL III
TEKNIK EVALUASI MODEL DETEKSI ANOMALI CAN BUS

No.	Metrik Evaluasi	Ref
1.	Cross Validation	[59]
2.	F1-score	[19], [53], [58], [59], [50]
3.	Confusion Matrix Evaluation	[35], [57], [60] [61], [55]
4.	Average Deviation Error (ADE)	[54]
5.	False Alarm Rate (FAR)	[56],[74]
6.	Missed Detection Rate (MDR)	[74]

C. PEMANFAATAN FITUR WAKTU DALAM DETEKSI ANOMALI

Pemanfaatan waktu dalam deteksi anomali merupakan aspek krusial dalam meningkatkan efektivitas dan akurasi sistem deteksi, terutama dalam sistem yang melibatkan data waktu nyata seperti pada sistem komunikasi kendaraan listrik atau jaringan IoT. Informasi waktu dapat memberikan konteks tambahan yang sangat berharga. Dengan memanfaatkan timestamp atau informasi waktu, algoritma deteksi anomali dapat mengidentifikasi pola yang tidak biasa atau peristiwa yang terjadi pada interval waktu tertentu, yang mungkin menunjukkan adanya gangguan atau ancaman. Misalnya, dalam konteks kendaraan listrik, perbedaan waktu antara pesan yang dikirim dan diterima pada sistem CAN bus dapat mengindikasikan masalah komunikasi atau bahkan potensi intrusi. Dengan demikian, pemanfaatan informasi waktu memungkinkan model deteksi anomali untuk lebih sensitif terhadap perubahan yang mungkin tidak tampak dalam analisis berbasis data statis, meningkatkan kemampuan sistem dalam mendeteksi masalah lebih cepat dan lebih akurat. Terdapat dua pendekatan deteksi anomali pada CAN bus berdasarkan waktu, yaitu pendekatan berbasis clock skew dan Inter-Arrival Time.

1) CLOCK SKEW SEBAGAI FITUR EKSTRAKSI

Clock skew mengacu pada perbedaan kecil dalam frekuensi clock antara perangkat dalam jaringan CAN Bus. Dalam kondisi normal, clock skew relatif stabil untuk setiap perangkat. Perubahan mendadak pada pola clock skew dapat mengindikasikan adanya manipulasi atau serangan pada jaringan. Salah satu pendekatan untuk mendeteksi anomali berdasarkan clock skew adalah analisis statistik. Metode ini memanfaatkan distribusi statistik dari clock skew untuk mengidentifikasi pola yang tidak biasa atau perubahan signifikan yang menunjukkan adanya potensi ancaman. Selain itu, time series analysis juga dapat digunakan untuk mempelajari perubahan dinamis dalam clock skew. Dengan menggunakan model time series, pola perubahan clock skew dapat dipelajari secara lebih rinci untuk mendeteksi fluktuasi yang tidak wajar, yang mungkin mencerminkan adanya manipulasi atau gangguan dalam sistem komunikasi. Pendekatan ini memungkinkan deteksi anomali yang lebih sensitif dan adaptif terhadap kondisi waktu nyata, meningkatkan keandalan dan respons sistem terhadap potensi ancaman.

X. Ying et al.[54] memperkenalkan serangan baru yang disebut cloaking attack dan memberikan analisis formal terhadap sistem deteksi intrusi (IDS) berbasis clock skew yang dirancang untuk mendeteksi serangan masquerade di Controller Area Network (CAN) pada kendaraan bermotor. Serangan cloaking ini merupakan upaya penyerang untuk menyembunyikan identitas asli mereka dengan memanipulasi waktu antar-transmisi pesan dari pesan palsu yang dikirimkan, dengan cara menambahkan penundaan yang terkontrol. Tujuannya adalah untuk meniru clock skew tertentu, sehingga menyamarkan pola waktu yang tidak biasa dan menghindari deteksi oleh IDS yang memanfaatkan clock skew untuk mendeteksi intrusi. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa serangan cloaking efektif dalam melewati kedua IDS yang kami uji, yaitu IDS berbasis SOTA dan NTP. Kami juga membandingkan kurva probabilitas keberhasilan serangan yang diprediksi dengan kurva yang diperoleh dari eksperimen lapangan. Temuan kami menunjukkan bahwa prediksi yang kami buat memiliki kesalahan rata-rata yang sangat kecil, yaitu 3,0% untuk IDS berbasis SOTA dan 5,7% untuk IDS berbasis NTP. Ini menunjukkan bahwa model formal yang kami kembangkan dapat memberikan prediksi yang akurat mengenai keberhasilan serangan, dan oleh karena itu dapat digunakan untuk lebih memahami potensi risiko yang terkait dengan serangan cloaking dalam sistem CAN.

Sebuah sistem deteksi intrusi berbasis anomali yang disebut Clock-based IDS (CIDS) pada penelitian [56]. Dengan menggunakan algoritma Recursive Least Squares (RLS) dilakukan menganalisis sidik jari yang diperoleh ini kemudian digunakan

untuk membangun dasar perilaku jam ECU. Berdasarkan dasar perilaku ini, CIDS menggunakan Cumulative Sum (CUSUM) untuk mendeteksi perubahan abnormal pada kesalahan identifikasi yang merupakan tanda jelas adanya intrusi. Evaluasi menunjukkan bahwa Clock-based IDS (CIDS) mampu mendeteksi berbagai jenis intrusi pada jaringan kendaraan dengan tingkat false-positive yang sangat rendah, yaitu 0,055%.

J. Zhou et al. [59] mengembangkan sebuah IDS berbasis clock skew. Dimana proses estimasi clock skew dalam pendekatan kami hanya bergantung pada pengukuran waktu dari satu frame CAN tunggal, sehingga gangguan dari lapisan data-link dapat dihindari. Penerapan pendekatan ambang batas dinamis secara signifikan meningkatkan False Positive Rate (FPR) pada semua algoritma klasifikasi. Pada SVM, FPR turun dari 7.78% menjadi 2.16% saat jumlah sampel data 200 dan berkurang sekitar 16.59% saat jumlah sampel data 50. Selain NB, perubahan FPR pada algoritma lain relatif kecil meskipun jumlah sampel data bervariasi, menunjukkan FPR yang stabil dan rendah bahkan untuk data sample kecil. Pada NB, FPR menurun seiring peningkatan jumlah sampel data dan stabil mulai $N=200$. Selain itu, tingkat kecurigaan pada semua algoritma tetap rendah dan stabil.

Penelitian berbasis clock drift dengan mengadopsi algoritma CUSUM (Cumulative Sum) untuk mendeteksi perubahan kesalahan identifikasi berdasarkan akumulasi penyimpangan dilakukan oleh H. Ji et al. [61]. Algoritma CUSUM berbasis drift jam memiliki keterbatasan, seperti deteksi pesan palsu yang lemah dan tingginya false positive pada data tidak stabil. Meskipun terus dioptimalkan, kasus false negative tetap tidak terhindarkan. Selain itu, deteksi pesan aperiodik sulit dilakukan karena sulitnya memperoleh ECU dengan clock skew tetap pada kendaraan nyata.

Berdasarkan kajian dari berbagai penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa clock skew merupakan fitur waktu yang relatif stabil dan unik dari setiap ECU dalam jaringan CAN, sehingga potensial digunakan untuk mendeteksi anomali dan melakukan fingerprinting perangkat. Namun, keberhasilan serangan seperti cloaking attack menunjukkan bahwa clock skew juga rentan dimanipulasi oleh penyerang canggih untuk menghindari deteksi. Metode deteksi berbasis analisis statistik dan time series, seperti Recursive Least Squares (RLS) dan Cumulative Sum (CUSUM), telah menunjukkan efektivitas dalam mengenali perubahan abnormal dalam pola clock skew, dengan tingkat false positive yang rendah dalam banyak kasus. Meskipun demikian, tantangan tetap ada dalam menghadapi kondisi nyata, seperti pesan aperiodik, noise tinggi, dan keterbatasan sumber daya komputasi untuk sistem real-time. Oleh karena itu, pengembangan Intrusion Detection System (IDS) berbasis clock skew perlu mempertimbangkan ketepatan model, efisiensi komputasi, serta ketahanan terhadap manipulasi temporal, guna memastikan sistem keamanan kendaraan yang adaptif dan tangguh terhadap evolusi ancaman siber.

2) WAKTU ANTAR PESAN (INTER-ARRIVAL TIME) SEBAGAI FITUR EKSTRAKSI

Waktu antar pesan merupakan parameter krusial dalam komunikasi Controller Area Network (CAN) Bus, yang menggambarkan interval antara pengiriman pesan dari satu perangkat ke perangkat lain. Setiap ECU dalam jaringan CAN diharapkan mengikuti pola waktu tertentu dalam pengiriman pesan, yang bisa dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kondisi lalu lintas data dan prioritas pesan. Penyimpangan dari pola waktu antar pesan yang diharapkan dapat mengindikasikan adanya serangan, seperti injection attack atau replay attack, yang berusaha mengganggu komunikasi antar ECU. Salah satu pendekatan untuk mendeteksi penyimpangan ini adalah dengan menggunakan Threshold-Based Detection, di mana sistem menetapkan ambang batas waktu antar pesan yang normal. Ketika waktu antar pesan melebihi atau kurang dari batas tersebut secara signifikan, maka sistem akan menandai hal ini sebagai potensi intrusi.

D. Stabili et al. [53] mengusulkan algoritma yang dapat mendeteksi pesan-pesan yang hilang dari bus CAN kendaraan akibat masalah serangan bus-off. Serangan bus-off terjadi ketika mikrokontroler dalam jaringan CAN dipaksa untuk memasuki mode bus-off, sehingga tidak dapat lagi berpartisipasi dalam komunikasi jaringan. Dalam eksperimen ini, serangan tersebut disimulasikan dengan cara menghapus pesan-pesan dari jejak-jejak CAN yang valid, yang sebelumnya telah direkam dari kendaraan berlisensi yang tidak dimodifikasi. Evaluasi eksperimental yang kami lakukan terhadap usulan algoritma ini menunjukkan hasil yang menggembirakan. Algoritma yang diusulkan terbukti mampu mendeteksi pesan yang hilang dengan akurasi tinggi, mencapai deteksi hampir sempurna dengan nilai F-score yang mendekati 1.0 pada berbagai pengujian. Keunggulan utama dari algoritma ini adalah kemampuannya untuk mendeteksi hilangnya pesan secara efektif tanpa terganggu oleh fluktuasi jaringan CAN yang wajar. Selain itu, algoritma kami dapat beradaptasi dengan berbagai jenis serangan bus-off, bahkan ketika serangan dilakukan dalam skenario yang lebih kompleks, seperti dalam kendaraan dengan arsitektur jaringan yang lebih dinamis.

Selain Threshold-Based Detection, Machine Learning dan Statistic Models, seperti Long Short-Term Memory (LSTM), dapat digunakan untuk mempelajari dan memahami pola waktu antar pesan secara lebih adaptif. Algoritma LSTM memiliki kemampuan untuk menangkap hubungan jangka panjang dalam data waktu yang dapat membantu mendeteksi perubahan pola yang lebih halus dan tidak terduga, memberikan solusi yang lebih fleksibel dan akurat dalam deteksi anomali pada jaringan CAN.

Pendekatan deteksi anomali berbasis CNN (Convolutional Neural Network) dan GRU (Attention-Based Gated Recurrent Unit) digunakan oleh A. R. Javed et al. [19]. CNN digunakan untuk mengekstrak fitur spasial dari data, sementara GRU dengan mekanisme perhatian mempelajari pola temporal dan memberikan bobot lebih besar pada sekuens relevan. Output diklasifikasikan melalui lapisan fully connected dengan aktivasi sigmoid atau softmax. Model dilatih menggunakan dataset CAN dengan metrik evaluasi seperti Accuracy, Recall, Precision, dan F1 Score, lalu dibandingkan dengan pendekatan baseline. Pendekatan ini dapat diimplementasikan sebagai sistem pendeteksian intrusi real-time tanpa mengubah protokol CAN, meningkatkan keamanan kendaraan dengan deteksi serangan yang lebih akurat dan respons cepat.

Peneliti [35] mengusulkan Long Short-Term Memory (LSTM) untuk mendeteksi anomali pada jaringan CAN. Setelah dilatih, sistem kami mampu mendeteksi anomali secara real-time dengan penggunaan sumber daya yang minimal. Hasil penelitian kami menunjukkan bahwa mesin deteksi anomali yang diusulkan berhasil mendeteksi anomali dengan akurasi lebih dari 98% dan tingkat false-positive antara 1% hingga 2%. Kinerja ini menunjukkan efektivitas tinggi dalam mengenali perilaku abnormal dalam jaringan CAN kendaraan, sambil meminimalkan kesalahan deteksi yang dapat mengganggu sistem.

Subir Halder et al. [42] mengusulkan Clock Offset-based Intrusion Detection System (COIDS) menggunakan metode Cumulative Sum (CUSUM) untuk mendeteksi deviasi abnormal pada clock offset. CUSUM adalah metode yang efektif untuk mendeteksi perubahan bertahap atau tiba-tiba dalam data yang memerlukan pemantauan terus-menerus. Jika deviasi clock offset melebihi ambang batas yang tidak terduga, baik positif maupun negatif. COIDS secara otomatis menganggapnya sebagai indikasi intrusi. Ini adalah sinyal bahwa komunikasi antara ECUs mungkin telah dimanipulasi atau disusupi oleh pihak yang tidak berwenang. COIDS terbukti lebih cepat dalam mendeteksi intrusi dibandingkan dengan solusi deteksi intrusi lainnya yang ada saat ini. Keunggulan ini memberikan keuntungan besar dalam aplikasi dunia nyata, di mana deteksi intrusi yang cepat dan tepat sangat penting untuk menghindari kerusakan lebih lanjut pada sistem kendaraan. Dengan demikian, COIDS tidak hanya menawarkan pendekatan yang lebih tepat dan efisien untuk mendeteksi serangan pada CAN bus, tetapi juga memberikan solusi yang lebih responsif dan handal dalam menjaga keamanan kendaraan modern.

Zixiang Bi et al. [50] mengusulkan sebuah metode deteksi intrusi inovatif yang berbasis pada matriks transfer pesan dan waktu untuk mengatasi berbagai tantangan yang dihadapi dalam deteksi intrusi kendaraan bermotor modern, khususnya pada Electronic Control Unit (ECU). Matriks transfer pesan dan waktu bekerja dengan memanfaatkan pola komunikasi antar pesan dalam jaringan CAN dan interval waktu antar transmisi pesan tersebut, yang dapat mengungkapkan adanya penyimpangan atau anomali yang mengindikasikan serangan. Metode ini tidak hanya menawarkan akurasi tinggi dan efisiensi sumber daya tetapi juga keunggulan dalam skala besar, menjadikannya solusi yang sangat ideal untuk diterapkan pada sistem CAN kendaraan masa depan. Dengan kemampuan deteksi real-time dan ketahanan terhadap serangan yang semakin kompleks, pendekatan ini berpotensi menjadi fondasi untuk pengembangan sistem keamanan kendaraan yang lebih canggih dan handal.

Sebuah metode baru diperkenalkan oleh Seyoung Lee et al. [55] bernama Transmission-resuming Time-based IDS (TTIDS) bekerja dengan mendeteksi serangan masquerade pada jaringan Controller Area Network (CAN) dengan memanfaatkan informasi waktu dan pola periodik transmisi pesan pada Electronic Control Units (ECUs) kendaraan. Dimana hasil eksperimen secara keseluruhan menunjukkan tingkat kesalahan yang rendah, dengan tingkat false positive sebesar 0,213% dan tingkat false negative sebesar 0,027%. Kesimpulannya, TTIDS mampu mendeteksi serangan masquerade secara efektif, memberikan solusi yang lebih handal dalam menghadapi serangan yang sulit dideteksi oleh metode deteksi yang ada.

TABEL II
PENELITIAN TERKAIT DETEKSI ANOMALI BERBASIS WAKTU

No.	Ref	Tahun	Metode	Log Datasheet	Hasil
1.	[56]	2016	Clock-based IDS (CIDS), Recursive Least Squares (RLS), Cumulative Sum (CUSUM)	Toyota Camry 2010 [62], Dodge Ram Pickup 2010 - Daily [63]	Recall : 97% FAR : 0.055%
2.	[61]	2018	Clock Drift, Cumulative Sum (CUSUM)	<i>Real Data capture</i>	TPR : 100% FPR : 7.4 %
3.	[60]	2018	ARIMA, Z-score, Time-defined window approach	<i>Real Data capture</i>	Sensitifitas: <ul style="list-style-type: none"> • ARIMA: ~0.8 • Z-score: ~0.8 • Supervised: ~0.95 Specificity: <ul style="list-style-type: none"> • ARIMA: ~0.95 • Z-score: ~0.9 • Supervised: ~0.8 Akurasi: <ul style="list-style-type: none"> • ARIMA: ~0.9 • Z-score: ~0.85 • Supervised: ~0.82
4.	[54]	2019	Clock Skew-based IDS	<i>Real Data capture</i>	-
5.	[53]	2019	Inter-Arrival Time Analysis	VTC2019Fall Dataset (2019) [64]	F-measure : 0.99964
6.	[58]	2019	Bit-time-based Intrusion Detection and Attacker Identification	<i>Real Data capture</i>	Akurasi : 99%
7.	[35]	2020	Long Short-Term Memory (LSTM)	<i>Real Data capture</i>	Akurasi : 98%
8.	[42]	2020	Clock Offset-based Intrusion Detection System (COIDS), Cumulative Sum (CUSUM)	CAN Dataset for intrusion detection (OTIDS) 2018 [65]	-
9.	[57]	2020	Recurring patterns and time interval of individual CAN ID	Mattia Zago et al. ReCAN Data [66]	FPR : 0.2% - 5.2%

10.	[19]	2021	CANintelliIDS	CAN Dataset for intrusion detection (OTIDS) 2018 [65]	Akurasi : 93.79% - 94.38%
11.	[59]	2021	Clock-Based Sender Identification and Attack Detection	<i>Real Data capture</i>	Akurasi > 99.7%
12	[72]	2021	Signature-Based Intrusion Detection System (IDS) for In-Vehicle CAN Bus Network	<i>Real Data capture</i>	Drop attack : 100% Replay attack : 98.2%. tempering attack : 66.2%.
13.	[50]	2022	Intrusion detection method based on the message and time transfer matrix	<i>Real Data capture</i>	Skema terbaik : Message & time transfer matrix Akurasi deteksi DoS : 100% Akurasi deteksi Fuzzy Attack : 99% Akurasi deteksi Ulterior Fuzzy Attack : 95% Akurasi deteks Replay Attack : 93%
14.	[55]	2022	Transmission-resuming Time-based IDS (TTIDS)	<i>Real Data capture</i>	FPR : 0.213% FNR : 0.027%
15.	[74]	2024	Quantile L1 Regression	CAN Dataset for intrusion detection (OTIDS) 2018 [65]	FAR : 0% MDR : 1.29%

Peneliti [57] mengusulkan sebuah metode hibrida menggunakan pola berulang dan interval waktu dari setiap CAN ID untuk mendeteksi anomali. Dimana Sistem ini tidak memerlukan informasi khusus tentang fungsi dari masing-masing pesan CAN serta tidak membutuhkan perubahan atau modifikasi pada protokol CAN yang ada, sehingga dapat diterapkan tanpa perlu pemahaman mendalam terhadap fungsi spesifik dari setiap ID CAN dan menjadi solusi yang praktis. Hasil eksperimen menunjukkan FPR meningkat seiring dengan bertambahnya ukuran jendela. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis pola berulang cenderung menghasilkan jumlah false positive yang konstan di semua skenario.

Sebuah sistem deteksi intrusi dengan memantau waktu bit dari setiap pesan yang diterima di bus CAN diusulkan oleh Jia Zhou et al. [58]. Jika ada penyimpangan signifikan dari profil normal ECU yang teridentifikasi, sistem menandainya sebagai potensi intrusi. BTMonitor menggunakan pola waktu bit unik untuk menentukan asal pesan yang mencurigakan. Dengan demikian, sistem dapat mengidentifikasi ECU yang berperilaku tidak normal atau ECU palsu yang disisipkan oleh penyerang. Setiap perangkat pada bus memiliki tanda waktu bit tertentu yang membuatnya dapat diidentifikasi, sehingga penyerang sulit menyembunyikan identitasnya.

Pendekatan berbasis jendela waktu digunakan pada penelitian [60]. Penelitian ini menguji tiga metode deteksi berbeda yaitu ARIMA, Z-score, dan ambang batas terawasi yang menggunakan jendela waktu terdefinisi dan membandingkan kinerjanya dalam deteksi anomali waktu pesan CAN serta mengeksplorasi bagaimana evaluasi metode deteksi anomali waktu CAN ini, atau metode potensial lainnya, memerlukan pertimbangan terhadap akurasi, spesifisitas, dan sensitivitas. Pendekatan Unsupervised (seperti ARIMA dan Z-score) menawarkan solusi yang kemungkinan lebih independen terhadap analisis spesifik dari CAN yang digunakan.

Penelitian [72] menggunakan pendekatan berbasis analisis interval waktu kedatangan pesan dengan menggunakan periode transmisi pesan dan worst-case response time (WCRT). Interval waktu kedatangan pesan dengan ID tertentu mencerminkan karakteristik waktu yang spesifik, yang seharusnya konsisten dalam kondisi normal. Peneliti memilih lima tanda (signatures) berikut untuk mendeteksi serangan manipulasi (tamper), pemutaran ulang (replay), dan penghilangan (drop): ID, interval waktu, korelasi, amplitudo perubahan konteks, dan rentang nilai.

Maliha et al. [74] mengusulkan model deteksi intrusi berbasis anomali dua tingkat yang melacak penyimpangan jangka pendek dan jangka panjang dalam ruang laten deret waktu, menciptakan apa yang disebut sebagai 'ruang laten berstatus' (stateful latent space). Model ini membantu mengidentifikasi serangan dengan mendefinisikan batasan ruang laten berstatus yang baik, yang menetapkan kriteria untuk deteksi serangan. Aspek unik dari model yang diusulkan adalah penggunaan masalah optimisasi multi-objektif berbasis preferensi untuk menemukan hyperparameter yang optimal. Optimisasi ini menyeimbangkan tujuan keamanan utama seperti jumlah alarm palsu, waktu deteksi, dan tingkat deteksi yang terlewat, memastikan bahwa sistem deteksi intrusi efektif dan efisien.

Waktu antar pesan pada jaringan CAN merupakan indikator penting untuk mendeteksi anomali atau serangan terhadap sistem komunikasi kendaraan. Metode ini mudah diimplementasikan tanpa memerlukan perubahan pada protokol CAN yang ada, memberikan keuntungan praktis untuk kendaraan yang sudah ada. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk memanfaatkan pola waktu ini, mulai dari metode threshold-based detection hingga model cerdas berbasis machine learning seperti LSTM, CNN-GRU, dan attention-based models, yang mampu mendeteksi anomali secara adaptif dan real-time. Penelitian juga menunjukkan efektivitas algoritma seperti CUSUM dan metode berbasis matriks waktu dalam mengidentifikasi penyimpangan temporal akibat serangan seperti bus-off dan masquerade attack. Meskipun hasil evaluasi menunjukkan tingkat akurasi tinggi dan false positive rendah, tantangan seperti deteksi pesan aperiodik, efisiensi sumber daya, dan generalisasi ke berbagai kondisi kendaraan tetap menjadi fokus pengembangan selanjutnya.

TABEL III
TABEL PERBANDINGAN PENDEKATAN BERBASIS CLOCK SKEW DAN PENDEKATAN BERBASIS WAKTU ANTAR PESAN

Aspek	Pendekatan Berbasis Clock Skew	Pendekatan Berbasis Waktu Antar Pesan (Inter-Arrival Time)
Fokus Deteksi	Penyimpangan dalam sinkronisasi waktu antar ECU.	Penyimpangan dalam interval waktu antar pesan.
Keunggulan Utama	Deteksi terhadap serangan yang memanipulasi sinkronisasi waktu.	Deteksi pola komunikasi abnormal dengan kecepatan respons tinggi.
Kemampuan Adaptasi	Mampu mendeteksi serangan yang mencoba menyembunyikan manipulasi waktu.	Lebih fleksibel dan adaptif dalam mendeteksi perubahan kecil dalam pola waktu antar pesan.
Kecepatan Deteksi	Deteksi cepat terhadap penyimpangan besar dalam sinkronisasi jam.	Deteksi cepat terhadap perubahan interval waktu antar pesan.
Tantangan	Rentan terhadap serangan yang menyinkronkan jam antar perangkat.	Kesulitan mendeteksi fluktuasi normal dalam trafik jaringan yang sangat tinggi.
Sumber Daya yang Dibutuhkan	Mungkin memerlukan pengelolaan sinkronisasi waktu yang lebih kompleks.	Cenderung lebih ringan dan bisa diterapkan dengan sedikit perubahan.

D. TANTANGAN

Deteksi anomali berbasis waktu berfokus pada menganalisis interval atau pola waktu pengiriman pesan yang diterima dalam sistem. Setiap pesan yang dikirim dalam jaringan biasanya disertai dengan timestamp, yang mencatat waktu pengirimannya. Dengan menganalisis timestamp dan interval antar pesan, sistem dapat mendeteksi jika ada pesan yang dikirim lebih cepat atau lebih lambat dari biasanya, yang dapat menjadi indikasi adanya serangan seperti Denial of Service (DoS) atau Replay Attacks. Namun terdapat beberapa tantangan yang dihadapi dalam pendekatan ini. Pertama, ketergantungan parameter pada periodisitas pesan menjadi masalah utama. Pendekatan dengan analisis waktu bekerja dengan mengandalkan periodisitas pesan untuk mengidentifikasi ketidakwajaran dalam perilaku jam, mengasumsikan bahwa setiap pesan dikirim dengan interval waktu yang teratur [73]. Namun, dalam jaringan dengan pesan yang dikirim secara aperiodik, seperti yang sering terjadi pada jaringan CAN, ketergantungan pada periodisitas ini dapat menyebabkan deteksi yang tidak akurat atau bahkan gagal dalam mengidentifikasi serangan, seperti serangan spoofing atau replay attacks, yang memanfaatkan pengiriman pesan yang tidak teratur. Hal ini menunjukkan keterbatasan pendekatan berbasis analisis waktu dalam mendeteksi intrusi pada jaringan yang tidak sepenuhnya terstruktur.

Deteksi anomali berbasis analisis waktu sangat terkait dengan keterbatasan waktu nyata pada sistem CAN kendaraan, karena sistem ini mengharuskan pengolahan data secara langsung tanpa menyebabkan penundaan yang mengganggu kinerja kendaraan [75]. Teknik ini memanfaatkan pola dan interval waktu pesan antar ECU untuk mendeteksi anomali yang mungkin menunjukkan adanya serangan, seperti replay, spoofing, atau DOS. Karena pengolahan data harus cepat, deteksi anomali harus dilakukan dengan efisien agar tidak menambah latensi yang dapat mempengaruhi respons sistem kendaraan, seperti pengaktifan pengereman atau perubahan arah. Dengan demikian, deteksi anomali berbasis waktu harus dapat memastikan keamanan tanpa mengorbankan performa real-time kendaraan.

E. PELUANG

Pendekatan berbasis analisis waktu, terutama CIDS menawarkan pendekatan yang sangat efektif dan fleksibel dalam mendeteksi intrusi dan menjaga integritas sistem komunikasi kendaraan, yang sangat penting dalam menghadapi ancaman di era kendaraan terhubung dan otonom [56]. Karena CIDS memanfaatkan sifat periodik dari pesan-pesan yang dikirimkan dalam jaringan kendaraan. Setiap ECU biasanya mengirimkan pesan secara periodik dengan interval waktu yang teratur, yang dapat diamati oleh penerima pesan. Dengan memonitor interval waktu antar pesan ini, CIDS mampu memperkirakan *clock skew* antara transmitter dan receiver tanpa memerlukan timestamp eksplisit dalam pesan. Selain itu Keunggulan utama dari pendekatan CIDS (*Clock Skew Detection System*) adalah kemampuannya untuk mendeteksi intrusi tanpa bergantung pada informasi pengirim pesan yang biasanya tidak ada dalam protokol CAN [53]. Dalam protokol CAN, pesan-pesan yang dikirimkan tidak menyertakan identitas pengirimnya, sehingga serangan yang bertujuan untuk menyamar sebagai pengirim sah, seperti serangan masquerade, sulit untuk dideteksi. CIDS mengatasi kelemahan ini dengan memanfaatkan informasi tentang frekuensi pesan dan pola waktu pengiriman pesan untuk mengidentifikasi fingerprint dari pengirim, yang bersifat unik bagi setiap ECU dalam kendaraan.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa deteksi anomali berbasis analisis waktu dalam jaringan CAN Bus, menggunakan teknik seperti Clock Skew Analysis dan Inter-Arrival Time Analysis, sangat efektif dalam mendeteksi berbagai jenis serangan di kendaraan terhubung dan otonom, termasuk spoofing, replay attacks, dan DoS. Teknik ini mampu mengidentifikasi perubahan pola komunikasi yang tidak wajar dengan efisiensi tinggi dan tingkat false positive yang rendah. Meskipun serangan dapat disembunyikan melalui manipulasi waktu dan pola pengiriman pesan, metode berbasis waktu memberikan sensitivitas yang kuat terhadap perubahan tersebut, menjadikannya alat yang andal dalam mengidentifikasi potensi ancaman dalam sistem kendaraan modern. Berikut ringkasan

Pendekatan berbasis clock skew lebih efektif dalam mendeteksi serangan yang berfokus pada manipulasi waktu antar perangkat, seperti MITM dan serangan replay. Namun, pendekatan ini lebih sensitif terhadap perbedaan sinkronisasi jam dan bisa kurang efektif jika penyerang dapat menyinkronkan jam dengan baik. Pendekatan berbasis waktu antar pesan lebih efektif dalam mendeteksi perubahan pola komunikasi yang mencurigakan, seperti serangan spoofing, dengan sensitivitas yang tinggi terhadap fluktuasi waktu antar pesan. Meskipun begitu, pendekatan ini bisa terhambat oleh fluktuasi jaringan yang alami dan sulit mendeteksi serangan yang sangat terstruktur. Sebagai validasi, beberapa metode deteksi telah diuji pada penelitian sebelumnya, seperti algoritma Cumulative Sum (CUSUM) yang efektif untuk mendeteksi perubahan bertahap dalam offset waktu, serta aplikasi Long Short-Term Memory (LSTM) dan Convolutional Neural Networks (CNN) yang mampu mendeteksi pola serangan yang lebih kompleks dan tersembunyi dalam data waktu nyata. Eksperimen menunjukkan bahwa kombinasi teknik ini memberikan hasil yang menggembirakan dalam hal akurasi deteksi serangan dan kecepatan respons, bahkan dalam skenario yang melibatkan perubahan waktu yang cepat atau serangan yang lebih tersembunyi. Namun, tantangan yang signifikan tetap ada terkait dengan deteksi serangan yang lebih tersembunyi, termasuk serangan masquerade atau cloaking attack, di mana penyerang berusaha menyamarkan identitas mereka dengan memanipulasi waktu pengiriman pesan.

Meskipun algoritma pembelajaran mesin, seperti Reinforcement Learning, mampu secara adaptif mempelajari pola serangan baru dan meningkatkan ketahanan terhadap ancaman yang berkembang, tantangan penerapannya dalam skala besar tetap ada, terutama dalam pengolahan data real-time. Pendekatan berbasis Edge Computing menawarkan solusi yang menjanjikan, memungkinkan analisis data secara lokal tanpa membebani jaringan atau sumber daya kendaraan, serta memungkinkan respons cepat dalam deteksi dan mitigasi ancaman di lapangan. Selain itu, pengembangan sistem deteksi anomali ini berpotensi diperluas ke arah ekosistem transportasi cerdas, memperkuat keamanan komunikasi antara kendaraan dan infrastruktur jalan raya (V2I), yang akan menjadi fondasi penting untuk transportasi masa depan yang lebih aman dan efisien.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam hasil penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Bari, B.S., Yelamarthi, K., Ghafoor, S. Intrusion Detection in Vehicle Controller Area Network (CAN) Bus Using Machine Learning: A Comparative Performance Study. *Sensors* 2023, 23, 3610. <https://doi.org/10.3390/s23073610>.
- [2] T. C. M. Dönmez, "Anomaly Detection in Vehicular CAN Bus Using Message Identifier Sequences," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136243-136252, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3117038.
- [3] Q. Luo and J. Liu, "Wireless Telematics Systems in Emerging Intelligent and Connected Vehicles: Threats and Solutions," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 6, pp. 113-119, December 2018, doi: 10.1109/MWC.2018.1700364.
- [4] C. Wang, Z. Zhao, L. Gong, L. Zhu, Z. Liu and X. Cheng, "A Distributed Anomaly Detection System for In-Vehicle Network Using HTM," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9091-9098, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2799210.
- [5] X. Zhao and W. Zhang, "An Anomaly Intrusion Detection Method Based on Improved K-Means of Cloud Computing," 2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC), Harbin, China, 2016, pp. 284-288, doi: 10.1109/IMCCC.2016.108.
- [6] Z. Wang, Y. Zhou and G. Li, "Anomaly Detection by Using Streaming K-Means and Batch K-Means," 2020 5th IEEE International Conference on Big Data Analytics (ICBDA), Xiamen, China, 2020, pp. 11-17, doi: 10.1109/ICBDA49040.2020.9101212.
- [7] R. Kumari, Sheethanshu, M. K. Singh, R. Jha and N. K. Singh, "Anomaly detection in network traffic using K-mean clustering," 2016 3rd International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT), Dhanbad, India, 2016, pp. 387-393, doi: 10.1109/RAIT.2016.7507933.
- [8] Maazalahi, M., Hosseini, S. K-means and meta-heuristic algorithms for intrusion detection systems. *Cluster Comput* 27, 10377-10419 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04510-7>.
- [9] E. H. Budiarto, A. Erna Permanasari and S. Fauziati, "Unsupervised Anomaly Detection Using K-Means, Local Outlier Factor and One Class SVM," 2019 5th International Conference on Science and Technology (ICST), Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICST47872.2019.9166366.
- [10] K. Peng, V. C. M. Leung and Q. Huang, "Clustering Approach Based on Mini Batch Kmeans for Intrusion Detection System Over Big Data," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 11897-11906, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2810267.
- [11] Ravale, Ujwala, Nilesh Marathe, and Pujya Padiya. "Feature selection based hybrid anomaly intrusion detection system using K means and RBF kernel function." *Procedia Computer Science* 45 (2015): 428-435.
- [12] E. Khaledian, S. Pandey, P. Kundu and A. K. Srivastava, "Real-Time Synchronophasor Data Anomaly Detection and Classification Using Isolation Forest, KMeans, and LoOP," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 12, no. 3, pp. 2378-2388, May 2021, doi: 10.1109/TSG.2020.3046602.
- [13] W. O. K. Putra, Y. Purwanto and F. Y. Suratman, "Modified K-means algorithm using timestamp initialization in sliding window to detect anomaly traffic," 2015 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC), Bandung, Indonesia, 2015, pp. 19-23, doi: 10.1109/ICCEREC.2015.7337042.
- [14] S. D. D. Anton, S. Sinha and H. Dieter Schotten, "Anomaly-based Intrusion Detection in Industrial Data with SVM and Random Forests," 2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, Croatia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.23919/SOFTCOM.2019.8903672.
- [15] Simon Duque Anton, Suneetha Kanoor, Daniel Fraunholz, and Hans Dieter Schotten. 2018. Evaluation of Machine Learning-based Anomaly Detection Algorithms on an Industrial Modbus/TCP Data Set. In Proceedings of the 13th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 41, 1-9. <https://doi.org/10.1145/3230833.3232818>.
- [16] C. Ioannou and V. Vassiliou, "Classifying Security Attacks in IoT Networks Using Supervised Learning," 2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), Santorini, Greece, 2019, pp. 652-658, doi: 10.1109/DCOSS.2019.00118.
- [17] K. S. Sahoo et al., "An Evolutionary SVM Model for DDOS Attack Detection in Software Defined Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 132502-132513, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3009733.
- [18] Mittal, M.; de Prado, R.P.; Kawai, Y.; Nakajima, S.; Muñoz-Expósito, J.E. Machine Learning Techniques for Energy Efficiency and Anomaly Detection in Hybrid Wireless Sensor Networks. *Energies* 2021, 14, 3125. <https://doi.org/10.3390/en14113125>.
- [19] R. Javed, S. u. Rehman, M. U. Khan, M. Alazab and T. R. G, "CANintelliIDS: Detecting In-Vehicle Intrusion Attacks on a Controller Area Network Using CNN and Attention-Based GRU," in *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 1456-1466, 1 April-June 2021, doi: 10.1109/TNSE.2021.3059881.
- [20] Zhou, A.; Li, Z.; Shen, Y. Anomaly Detection of CAN Bus Messages Using a Deep Neural Network for Autonomous Vehicles. *Appl. Sci.* 2019, 9, 3174. <https://doi.org/10.3390/app9153174>.
- [21] Mahmoud Said Elsayed, Nhien-An Le-Khac, Soumyabrata Dev, and Anca Delia Jurcut. 2020. Network Anomaly Detection Using LSTM Based Autoencoder. In Proceedings of the 16th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks (Q2SWinet '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 37-45. <https://doi.org/10.1145/3416013.3426457>.

- [22] Z. Chen, C. K. Yeo, B. S. Lee and C. T. Lau, "Autoencoder-based network anomaly detection," 2018 Wireless Telecommunications Symposium (WTS), Phoenix, AZ, USA, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/WTS.2018.8363930.
- [23] S. Afroz, S. M. Ariful Islam, S. Nawer Rafa and M. Islam, "A Two Layer Machine Learning System for Intrusion Detection Based on Random Forest and Support Vector Machine," 2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), Bhubaneswar, India, 2020, pp. 300-303, doi: 10.1109/WIECON-ECE52138.2020.9397945.
- [24] Malaiya, Ritesh K., et al. "An empirical evaluation of deep learning for network anomaly detection." *IEEE Access* 7 (2019): 140806-140817.
- [25] Alshammari, A., Zohdy, M.A., Debnath, D. and Corser, G. (2018) Classification Approach for Intrusion Detection in Vehicle Systems. *Wireless Engineering and Technology*, 9, 79-94. <https://doi.org/10.4236/wet.2018.94007>.
- [26] Khan, J.; Lim, D.-W.; Kim, Y.-S. Intrusion Detection System CAN-Bus In-Vehicle Networks Based on the Statistical Characteristics of Attacks. *Sensors* 2023, 23, 3554. <https://doi.org/10.3390/s23073554>.
- [27] He, Qiyi. (2021). A machine learning-based anomaly detection framework for connected and autonomous vehicles cyber security.
- [28] U. Dincalp, M. S. Güzel, O. Sevine, E. Bostanci and I. Askerzade, "Anomaly Based Distributed Denial of Service Attack Detection and Prevention with Machine Learning," 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkey, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISMSIT.2018.8567252.
- [29] Kwak, B. I., Han, M. L., & Kim, H. K. (2021). Cosine similarity based anomaly detection methodology for the CAN bus. *Expert Systems with Applications*, 166, 114066.
- [30] M. Marchetti and D. Stabili, "Anomaly detection of CAN bus messages through analysis of ID sequences," 2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Los Angeles, CA, USA, 2017, pp. 1577-1583, doi: 10.1109/IVS.2017.7995934.
- [31] Tanksale, "Design of Anomaly Detection Functions for Controller Area Networks," in *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 2, pp. 312-321, 2021, doi: 10.1109/OJITS.2021.3104495.
- [32] S. Boumiza and R. Braham, "An Anomaly Detector for CAN Bus Networks in Autonomous Cars based on Neural Networks," 2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Barcelona, Spain, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/WiMOB.2019.8923315.
- [33] Mee Lan Han, Byung Il Kwak, Huy Kang Kim, Anomaly intrusion detection method for vehicular networks based on survival analysis, *Vehicular Communications*, Volume 14, 2018, Pages 52-63, ISSN 2214-2096, <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2018.09.004>.
- [34] Taylor, S. Leblanc and N. Japkowicz, "Anomaly Detection in Automobile Control Network Data with Long Short-Term Memory Networks," 2016 IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 130-139, doi: 10.1109/DSAA.2016.20.
- [35] V. Tanksale, "Anomaly Detection for Controller Area Networks Using Long Short-Term Memory," in *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 1, pp. 253-265, 2020, doi: 10.1109/OJITS.2020.3043066.
- [36] Hongmao Qin, Mengru Yan, Haojie Ji, Application of Controller Area Network (CAN) bus anomaly detection based on time series prediction, *Vehicular Communications*, Volume 27, 2021, 100291, ISSN 2214-2096, <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2020.100291>.
- [37] J. Ning, J. Wang, J. Liu and N. Kato, "Attacker Identification and Intrusion Detection for In-Vehicle Networks," in *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 1927-1930, Nov. 2019, doi: 10.1109/LCOMM.2019.2937097.
- [38] Y. Linghu, M. Xu, X. Li and H. Qian, "Weighted Local Outlier Factor for Detecting Anomaly on In-Vehicle Network," 2020 16th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN), Tokyo, Japan, 2020, pp. 479-487, doi: 10.1109/MSN50589.2020.00082.
- [39] van Wyk, Y. Wang, A. Khojandi and N. Masoud, "Real-Time Sensor Anomaly Detection and Identification in Automated Vehicles," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1264-1276, March 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2906038.
- [40] Lee, S. H. Jeong and H. K. Kim, "OTIDS: A Novel Intrusion Detection System for In-vehicle Network by Using Remote Frame," 2017 15th Annual Conference on Privacy, Security and Trust (PST), Calgary, AB, Canada, 2017, pp. 57-5709, doi: 10.1109/PST.2017.00017.
- [41] F. Amato, L. Coppolino, F. Mercaldo, F. Moscato, R. Nardone and A. Santone, "CAN-Bus Attack Detection With Deep Learning," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 8, pp. 5081-5090, Aug. 2021, doi: 10.1109/TITS.2020.3046974.
- [42] Subir Halder, Mauro Conti, and Sajal K. Das. 2020. COIDS: A Clock Offset Based Intrusion Detection System for Controller Area Networks. In *Proceedings of the 21st International Conference on Distributed Computing and Networking (ICDCN '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 22, 1–10. <https://doi.org/10.1145/3369740.3369787>
- [43] T. Moulahi, S. Zidi, A. Alabdulatif and M. Atiqzaman, "Comparative Performance Evaluation of Intrusion Detection Based on Machine Learning in In-Vehicle Controller Area Network Bus," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 99595-99605, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3095962.
- [44] S. Katragadda, P. J. Darby, A. Roche and R. Gottumukkala, "Detecting Low-Rate Replay-Based Injection Attacks on In-Vehicle Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 54979-54993, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2980523.
- [45] E. Seo, H. M. Song and H. K. Kim, "GIDS: GAN based Intrusion Detection System for In-Vehicle Network," 2018 16th Annual Conference on Privacy, Security and Trust (PST), Belfast, Ireland, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/PST.2018.8514157.
- [46] Lokman, SF., Othman, A.T. & Abu-Bakar, MH. Intrusion detection system for automotive Controller Area Network (CAN) bus system: a review. *J Wireless Com Network* 2019, 184 (2019). <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1484-3>.
- [47] Fusheng Jin, Mengnan Chen, Weiwei Zhang, Ye Yuan, Shuliang Wang, Intrusion detection on internet of vehicles via combining log-ratio oversampling, outlier detection and metric learning, *Information Sciences*, Volume 579, 2021, Pages 814-831, ISSN 0020-0255, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.08.010>.
- [48] S. Purohit and M. Govindarasu, "ML-based Anomaly Detection for Intra-Vehicular CAN-bus Networks," 2022 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR), Rhodes, Greece, 2022, pp. 233-238, doi: 10.1109/CSR54599.2022.9850292.
- [49] . Avatefipour et al., "An Intelligent Secured Framework for Cyberattack Detection in Electric Vehicles' CAN Bus Using Machine Learning," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127580-127592, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937576.
- [50] Bi, Z., Xu, G., Xu, G., Tian, M., Jiang, R., & Zhang, S. (2022). Intrusion Detection Method for In-Vehicle CAN Bus Based on Message and Time Transfer Matrix. *Security and Communication Networks*, 2022(1), 2554280. <https://doi.org/10.1155/2022/2554280>.
- [51] POLCÁK, Libor; FRANKOVÁ, Barbora. Clock-Skew-Based Computer Identification: Traps and Pitfalls. *J. Univers. Comput. Sci.*, 2015, 21:9: 1210-1233.
- [52] S. U. Sagong, X. Ying, A. Clark, L. Bushnell and R. Poovendran, "Cloaking the Clock: Emulating Clock Skew in Controller Area Networks," 2018 ACM/IEEE 9th International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPs), Porto, Portugal, 2018, pp. 32-42, doi: 10.1109/ICCPs.2018.00012.
- [53] D. Stabili and M. Marchetti, "Detection of Missing CAN Messages through Inter-Arrival Time Analysis," 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall), Honolulu, HI, USA, 2019, pp. 1-7, doi: 10.1109/VTCFall.2019.8891068.
- [54] X. Ying, S. U. Sagong, A. Clark, L. Bushnell and R. Poovendran, "Shape of the Cloak: Formal Analysis of Clock Skew-Based Intrusion Detection System in Controller Area Networks," in *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 14, no. 9, pp. 2300-2314, Sept. 2019, doi: 10.1109/TIFS.2019.2895957.
- [55] S. Lee, H. J. Jo, A. Cho, D. H. Lee and W. Choi, "TTIDS: Transmission-Resuming Time-Based Intrusion Detection System for Controller Area Network (CAN)," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 52139-52153, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3174356.
- [56] Kyong-Tak Cho and Kang G. Shin. 2016. Fingerprinting electronic control units for vehicle intrusion detection. In *Proceedings of the 25th USENIX Conference on Security Symposium (SEC'16)*. USENIX Association, USA, 911–927.
- [57] Sunny, S. Sankaran and V. Saraswat, "A Hybrid Approach for Fast Anomaly Detection in Controller Area Networks," 2020 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), New Delhi, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ANTS50601.2020.9342791.
- [58] Zhou, P. Joshi, H. Zeng, and R. Li, "Btmonitor: Bit-time-based intrusion detection and attacker identification in controller area network," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)*, vol. 18, no. 6, pp. 1–23, 2019.

- [59] Zhou, G. Xie, S. Yu and R. Li, "Clock-Based Sender Identification and Attack Detection for Automotive CAN Network," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 2665-2679, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3046862.
- [60] Tomlinson, J. Bryans, S. A. Shaikh and H. K. Kalutarage, "Detection of Automotive CAN Cyber-Attacks by Identifying Packet Timing Anomalies in Time Windows," 2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W), Luxembourg, Luxembourg, 2018, pp. 231-238, doi: 10.1109/DSN-W.2018.00069.
- [61] H. Ji, Y. Wang, H. Qin, X. Wu and G. Yu, "Investigating the Effects of Attack Detection for In-Vehicle Networks Based on Clock Drift of ECUs," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 49375-49384, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2841884.
- [62] RUTH, R., BARTLETT, W., AND DAILY, J. Accuracy of event data in the 2010 and 2011 Toyota camry during steady state and braking conditions. In *SAE International Journal on Passenger Cars* (2012).
- [63] DAILY, J. Analysis of critical speed yaw scuffs using spiral curves. In *SAE Technical Paper 2012-01-0606* (2012).
- [64] D. Stabili and M. Marchetti. (2019) VTC2019Fall Dataset. [Online]. Available: <https://weblab:ing.unimore.it/people/stabili/resources>.
- [65] H. Lee, S. H. Jeong and H. K. Kim. 2018. CAN Dataset for intrusion detection (OTIDS). [Online]: <http://ocslab.hksecurity.net/Dataset/CAN-intrusion-dataset>. (2018). Accessed on October 15, 2018.
- [66] Mattia Zago et al. ReCAN Data - Reverse engineering of Controller Area Networks", Mendeley Data, v2. 2020. URL:<http://dx.doi.org/10.17632/76knkx3fvz.2#folder3d76230-b403-4d8-972e-9fcd3cd30c>.
- [67] Han ML, Kwak BI, Kim HK. Anomaly intrusion detection method for vehicular networks based on survival analysis. *Vehicular Comms*. 2018;doi:10.1016/j.vehcom.2018.09.004.
- [68] Seo E, Song HM, Kim HK. GIDS: GAN based Intrusion Detection System for In-Vehicle Network. In: *PST*; 2018.
- [69] Song HM, Woo J, Kim HK. In-vehicle network intrusion detection using deep convolutional neural network. *Vehicular Communications*. 2020;doi:10.1016/j.vehcom.2019.100198.
- [70] Dupont G, Lekidis A, Den Hartog J, Etalle S. Automotive Controller Area Network (CAN) Bus Intrusion Dataset v2; 2019.
- [71] Verma, M.E., Iannacone, M.D., Bridges, R.A., Hollifield, S.C., Moriano, P., Kay, B., & Combs, F.L. (2020). A comprehensive guide to CAN IDS data and introduction of the ROAD dataset. *PLOS ONE*, 19.
- [72] S. Jin, J. -G. Chung and Y. Xu, "Signature-Based Intrusion Detection System (IDS) for In-Vehicle CAN Bus Network," 2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Daegu, Korea, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISCAS51556.2021.9401087.
- [73] Tayyab, M., Hafeez, A., & Malik, H. (2018, August). Spoofing attack on clock-based intrusion detection system in controller area networks. In *NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium*, Novi, Michigan (pp. 1-13).
- [74] Maliha, Maisha, and Shameek Bhattacharjee. "A Unified Time Series Analytics based Intrusion Detection Framework for CAN BUS Attacks." *Proceedings of the Fourteenth ACM Conference on Data and Application Security and Privacy*. 2024.
- [75] Lokman, SF., Othman, A.T. & Abu-Bakar, MH. Intrusion detection system for automotive Controller Area Network (CAN) bus system: a review. *J Wireless Com Network* 2019, 184 (2019). <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1484-3>.

Rancang Bangun Sistem Throttle Brushless DC Motor pada Kursi Roda Elektrik

Design of Throttle System for a Brushless DC Motor in an Electric Wheelchair

Ferdinand Natanael¹, Bagus Made Arthaya², Faisal Wahab^{3*}

^{1,2,3} Universitas Katolik Parahyangan; email: faisal.wahab@unpar.ac.id

[Dikirimkan: 16 Januari 2025, Direvisi: 28 Mei 2025, Diterima: 31 Mei 2025]

Corresponding Author: Faisal Wahab

INTISARI — Kursi roda elektrik merupakan alat bantu mobilitas yang dirancang untuk mendukung aktivitas individu dengan disabilitas fisik, khususnya mereka yang mengalami keterbatasan dalam bergerak. Alat ini terdiri dari beberapa komponen utama, seperti rangka mekanis dengan empat roda dua roda penggerak yang dikendalikan oleh motor listrik dan dua roda caster di bagian depan, serta sistem pengendali berupa *joystick*, baterai sebagai sumber daya, dan tempat duduk yang dirancang untuk kenyamanan pengguna. Dengan semakin berkembangnya teknologi, penting untuk mengintegrasikan sistem kontrol yang lebih efisien dan akurat dalam kursi roda elektrik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan sistem *throttle* dan tachometer berbasis sensor Hall pada kursi roda elektrik, guna meningkatkan kemampuan kontrol dan akurasi pergerakan kursi roda. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk menggerakkan kursi roda ke depan, belok ke kanan, dan belok ke kiri hanya dengan menggunakan *joystick*. Metodologi yang digunakan mencakup modifikasi kerangka kursi roda konvensional, integrasi motor BLDC, perancangan sistem *throttle*, serta penerapan sensor Hall untuk pengukuran kecepatan rotasi roda secara real time. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem takometer berbasis sensor Hall memiliki tingkat akurasi yang tinggi, dengan kesalahan pengukuran hanya sebesar 0,32% jika dibandingkan dengan alat ukur standar. Motor BLDC yang digunakan mampu menghasilkan kecepatan putaran maksimum sebesar 450 RPM. Temuan ini membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan dapat meningkatkan kinerja dan keandalan kursi roda elektrik, serta memberikan kenyamanan dan kemandirian yang lebih baik bagi penggunanya.

KATA KUNCI — *Joystick*, Kursi Roda Elektrik, Motor BLDC, Sensor Hall, Tachometer, *Throttle*.

ABSTRACT — An electric wheelchair is a mobility aid designed to support the activities of individuals with physical disabilities, particularly those who have difficulty moving independently. This device consists of several main components, including a mechanical frame with four wheels two drive wheels powered by electric motors and two caster wheels at the front as well as a control system in the form of a joystick, a battery as the power source, and a seat designed for user comfort. With the advancement of technology, it is essential to integrate more efficient and accurate control systems into electric wheelchairs. This study aims to design and develop a throttle and tachometer system based on a Hall-effect sensor for electric wheelchairs to enhance movement control and accuracy. The system allows users to operate the wheelchair to move forward, turn right, and turn left using only the joystick. The methodology includes modifying a conventional wheelchair frame, integrating a BLDC motor, designing the throttle system, and implementing a Hall-effect sensor for real-time wheel rotation speed measurement. The results show that the Hall-effect sensor-based tachometer system demonstrates a high level of accuracy, with a measurement error of only 0.32% compared to standard measuring instruments. The BLDC motor used in the system is capable of reaching a maximum rotational speed of 450 RPM. These findings prove that the developed system improves the performance and reliability of electric wheelchairs while providing better comfort and independence for users.

KEYWORDS — Joystick, Electric Wheelchair, BLDC Motor, Hall Sensor, Tachometer, Throttle.

I. PENDAHULUAN

Penyandang disabilitas adalah individu yang mengalami keterbatasan atau kehilangan kesempatan untuk berpartisipasi dalam kehidupan masyarakat sehari-hari akibat gangguan fisik (kecacatan), psikis atau adanya halangan sosial [1]. Salah satu contohnya adalah kesulitan berjalan yang dapat diatasi dengan menggunakan alat bantu mobilitas seperti tongkat berjalan atau kursi roda [2]. Penggunaan kursi roda tidak hanya membantu individu bersosial, tetapi juga mendukung mereka untuk bersosialisasi, mendapatkan edukasi dan mengembangkan kemandirian. Kursi roda manual pada umumnya digerakkan menggunakan tangan sebagai penggerak utama, sehingga dalam kondisi tertentu pengguna mungkin memerlukan bantuan orang lain untuk mengoperasikan kursi roda tersebut [3]. Pengembangan kursi roda telah mencakup penambahan komponen elektrik, seperti motor yang berfungsi sebagai penggerak utama [4]. Kursi roda elektrik (*power wheelchair*) dirancang untuk penyandang disabilitas yang mengalami kesulitan berjalan dan kekurangan kekuatan atau koordinasi untuk mengoperasikan kursi roda manual tetapi memiliki kemampuan kognitif yang cukup baik untuk navigasi. Kondisi ini ditemukan pada para penderita *cerebral palsy*.

Kursi roda elektrik memiliki komponen dasar berupa rangka mekanik (*chassis*) dengan empat roda, terdiri dari dua roda penggerak yang terhubung dengan motor listrik dan dua buah roda kastor yang terpasang pada kanan dan kiri kursi. Komponen lainnya meliputi baterai sebagai sumber daya, pengontrol yang berfungsi sebagai pengendali motor dan sebagai antarmuka antara manusia dan mesin (umumnya berupa *joystick*), dan tempat duduk untuk kenyamanan pengguna. Penelitian terkait kursi roda elektrik ini telah banyak dilakukan, seperti pada studi [5] [6] yang sebagian besar masih berupa purwarupa atau dalam bentuk robot mobil (*mobile robot*). Selain itu, penelitian lain umumnya motor penggerak berupa motor DC magnet tetap [7], [8], yang dipasang pada rangka kursi dan dihubungkan ke roda melalui mekanisme roda gigi cacing (*worm gear*) [9]. Namun, sistem gerak ini memiliki keterbatasan dalam hal akselerasi, dan efisiensi [10]. Sebagai solusi untuk mengatasi masalah tersebut, motor DC tanpa sikat (*brushless DC motor*) dapat digunakan, karena menawarkan efisiensi yang lebih tinggi dan performa yang lebih baik dibandingkan dengan motor DC konvensional [11].

Pada beberapa tahun terakhir, penggunaan motor arus searah tanpa sikat, atau disebut motor *Brushless DC* (BLDC) telah berkembang secara pesat. Perkembangan ini didorong oleh meningkatnya kebutuhan dalam berbagai industri, seperti otomotif [12], robotika [13], penerbangan, eksplorasi luar angkasa, hingga peralatan rumah tangga. Motor BLDC termasuk dalam kategori motor arus searah (*direct current, DC*), dengan perbedaan utama dibandingkan motor DC konvensional terletak pada komponen yang dinamakan sikat (*brush*). Pada motor DC konvensional, sikat berfungsi sebagai media penghubung arus listrik menuju komutator dan kumparan. Namun, penggunaan sikat ini memiliki sejumlah kelemahan, seperti menimbulkan gesekan yang memperpendek usia motor, serta menghasilkan *noise*. Untuk mengatasi hal keterbatasan tersebut, dikembangkanlah motor DC tanpa sikat (*brushless*) motor BLDC [14]. Selain tidak menggunakan sikat, motor BLDC memiliki perbedaan lain dibandingkan motor DC biasa, yaitu membutuhkan sistem kontrol yang lebih kompleks [15]. Sistem ini diperlukan untuk mengatur pengalihan arus listrik secara elektronik, menggantikan fungsi sikat pada motor DC konvensional, sehingga motor BLDC mampu memberikan efisiensi dan keandalan yang lebih tinggi. Berdasarkan Tabel I, perbandingan performa antara jenis motor DC konvensional dengan motor BLDC menunjukkan bahwa motor BLDC memiliki keunggulan signifikan. Keunggulan tersebut meliputi efisiensi yang lebih tinggi, masa pakai lebih panjang, tingkat kebisingan rendah, dan karakteristik torsi-kecepatan yang baik [16].

TABEL I
PERBANDINGAN MOTOR DC DENGAN MOTOR BLDC

Performa	Jenis Motor	
	Motor DC	Motor BLDC
Efisiensi (%)	<90	95-97
Keandalan	Baik	Sangat Baik
Disipasi panas	Kurang baik	Baik
Ukuran motor	Besar, berat	Kecil, ringan
Performa (kecepatan tinggi)	Kurang Baik	Baik

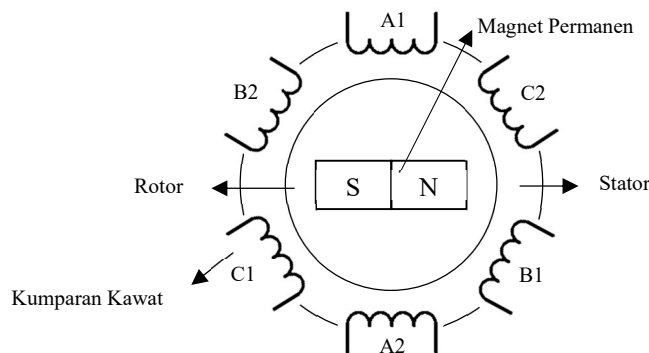
Pada motor BLDC, diperlukan rangkaian tambahan berupa modul inverter tiga fasa untuk memungkinkan motor beroperasi dengan baik [17]. Dalam aplikasi kendaraan seperti sepeda motor dan mobil listrik, pengaturan kecepatan biasanya dilakukan melalui sistem *throttle* [18][19]. Namun, untuk kebutuhan kursi roda elektrik, diperlukan sistem *throttle* yang dirancang khusus agar dapat menyesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan spesifik pengguna. Sistem *throttle* yang dirancang harus mampu mengatur kecepatan motor secara digital dan memberikan kemudahan kendali bagi pengguna dengan keterbatasan fisik. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem *throttle* untuk motor BLDC pada kursi roda elektrik. Untuk menguji kinerja sistem *throttle* yang dikembangkan, diperlukan pemrosesan data dari sensor Hall yang terletak di bagian internal motor BLDC. Sensor ini digunakan untuk mendapatkan informasi kecepatan motor secara real-time dan akurat, sehingga sistem dapat memberikan umpan balik yang sesuai dalam pengaturan kecepatan. Hasil pengolahan data ini menjadi dasar evaluasi efektivitas sistem *throttle* dalam mendukung kinerja kursi roda elektrik secara keseluruhan.

II. METODE PENELITIAN

A. MOTOR BRUSHLESS

Motor *Brushless DC* (BLDC) terdiri dari dua komponen utama, yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian motor yang bersifat statis dan terdiri dari kumparan kawat, sedangkan rotor merupakan bagian motor yang berputar dan terdiri dari magnet permanen. Jumlah magnet pada rotor mempengaruhi performa torsi serta kecepatan maksimum motor [17]. Rotasi pada motor BLDC dihasilkan melalui interaksi antara magnet permanen pada rotor dan medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan kawat pada stator yang terinduksi arus listrik. Kutub magnet yang berbeda akan menghasilkan gaya tarik-menarik, sementara kutub yang sama akan menghasilkan gaya tolak-menolak. Kecepatan rotasi motor dapat dikendalikan dengan mengatur aliran arus listrik yang melewati stator.

Pada Gambar 1 menunjukkan konstruksi motor BLDC. Ketika kumparan B1 dan B2 dialiri arus listrik, keduanya menghasilkan medan magnet dengan kutub selatan (S) dan utara (N) secara berurutan. Medan magnet ini kemudian menarik kutub berlawanan dari magnet permanen yang terpasang pada rotor, sehingga menyebabkan rotor bergerak. Proses yang sama terjadi secara bergantian pada kumparan A1-A2 dan C1-C2, membentuk pola medan magnet berurutan yang terus berubah. Pergantian arus pada kumparan-kumparan tersebut dikendalikan secara presisi oleh rangkaian inverter tiga fasa. Dengan pengaturan arus yang tepat, medan magnet yang dihasilkan oleh stator akan selalu berada sedikit di depan posisi rotor, sehingga rotor terus tertarik dan berputar. Pola kerja ini menghasilkan gerakan rotasi yang kontinu dan efisien pada motor BLDC [20].



Gambar 1. Konstruksi Motor BLDC

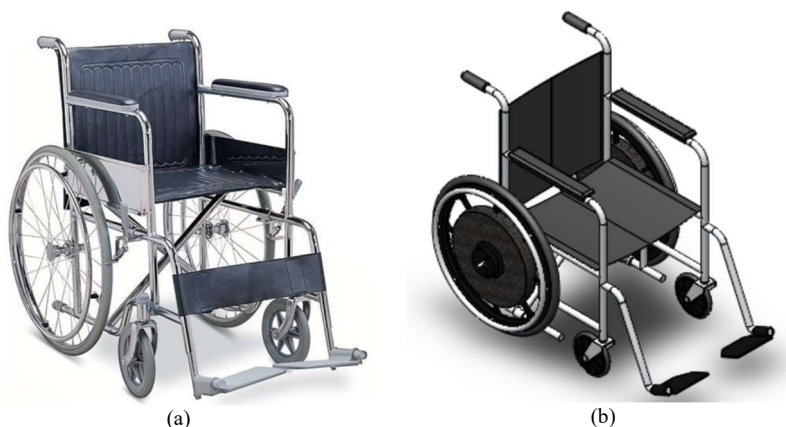
B. PERANCANGAN SISTEM MEKANIK

Kursi roda konvensional digunakan sebagai basis dalam perancangan kursi roda elektrik pada penelitian ini. Kursi roda yang dipilih adalah kursi roda merek Sella dengan tipe KY-809 yang ditampilkan pada Gambar 2 (a). Spesifikasi kursi roda Sella KY-809 yang disajikan pada Tabel II.

TABEL II
 SPESIFIKASI KURSI RODA

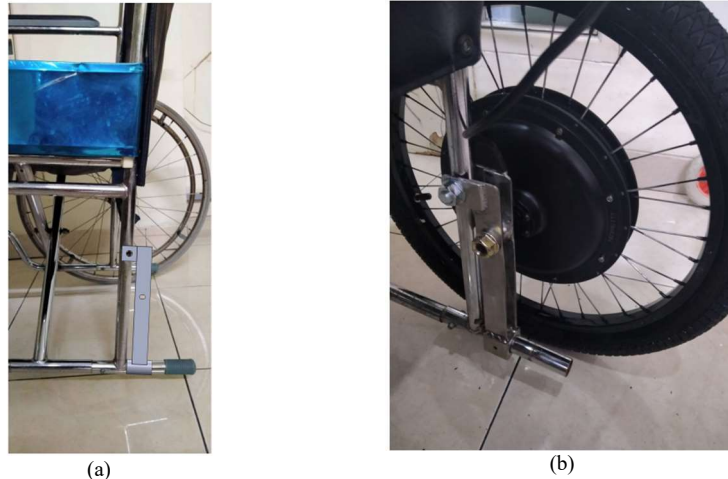
Spesifikasi	Nilai	Satuan
Panjang kursi roda	1060	mm
Lebar kursi roda	650	mm
Tinggi kursi roda	870	mm
Jari-jari roda penggerak	295	mm
Jari-jari roda kastor	100	mm
Maksimum beban	100	kg
Massa kursi roda	20	kg

Spesifikasi minimum motor yang digunakan dalam perancangan kursi roda elektrik ditentukan melalui proses perhitungan berdasarkan beban total yang harus digerakkan. Kursi roda elektrik dirancang untuk mampu menggerakkan massa total sebesar 130 kg, yang terdiri dari: massa kursi roda sebesar 20 kg, massa pengguna sebesar 100 kg, dan massa dua buah motor BLDC masing-masing 5 kg. Rancangan kursi roda elektrik yang telah dimodifikasi dengan penambahan motor BLDC ditampilkan pada Gambar 2(b).



Gambar 2. (a) Kursi roda Sella KY-809, (b) Rancangan kursi roda elektrik

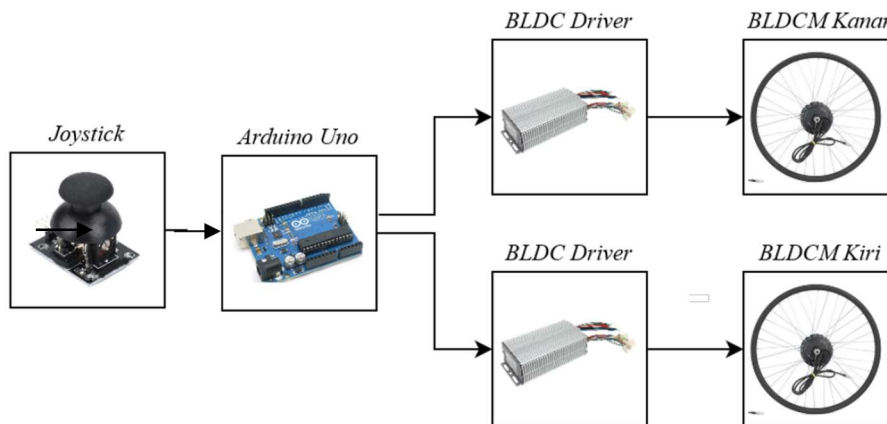
Sistem mekanis pada perancangan ini terdiri dari kursi roda konvensional yang dimodifikasi dengan menambahkan sistem penggerak differensial, menggunakan dua motor BLDC. Kecepatan linier maksimum masing-masing roda, baik roda kanan (V_R) maupun roda kiri (V_L), mencapai 1,4 m/s, yang setara dengan rata-rata kecepatan berjalan manusia normal. Dalam penelitian ini, kursi roda elektrik dikembangkan dari kursi roda manual yang umum digunakan di masyarakat. Untuk meminimalkan perubahan pada struktur asli kursi roda, dirancang sebuah adaptor khusus yang memungkinkan pemasangan motor BLDC secara praktis tanpa modifikasi besar. Adaptor ini dirancang agar kompatibel dengan berbagai model kursi roda standar, sehingga mendukung kemudahan replikasi dan penerapan di lapangan. Rancangan dan implementasi adaptor tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 berikut:



Gambar 3. (a) Rancangan adaptor BLDC, (b) Implementasi adaptor BLDC

C. PERANCANGAN SISTEM ELEKTRIK

Sistem elektrik pada kursi roda elektrik tersusun atas komponen-komponen seperti: *microcontroller* arduino Uno, dua buah motor BLDC 48V 400W yang dipasangkan pada roda kiri dan kanan kursi roda, *joystick shield*, dan *Brushless Motor Controller* yang didalamnya telah terdapat sensor *hall*. Komponen-komponen tersebut akan terhubung seperti skematik rangkaian pada Gambar 4. *Joystick* berfungsi sebagai input pada kursi roda elektrik. *Joystick* merupakan antarmuka manusia dengan mesin, dimana gerakan pada *joystick* akan ditranslasikan menjadi putaran motor BLDC. *Joystick* yang digunakan adalah *joystick* KY-023. Arduino Uno berfungsi sebagai pusat kontrol analog-digital dari keseluruhan sistem. BLDC driver merupakan pengontrol motor BLDC, termasuk di dalamnya terdapat sensor *hall* dan aktivator *hall* (*throttle*)



Gambar 4. Rancangan sistem elektrik

Joystick digunakan sebagai antarmuka manusia-mesin. *Joystick* yang digunakan adalah *joystick* KY-023. *Joystick* ini memiliki lima buah pin, yaitu: tegangan masukan, *ground*, tegangan keluaran proporsional dengan posisi *X*, tegangan keluaran proporsional posisi *Y*, dan *key* yang memberikan tegangan keluaran ketika *joystick* ditekan. *Joystick* memerlukan tegangan masukan 5V dengan keluaran berupa data analog (0 - 1023).

TABEL III
PENGATURAN PADA JOYSTICK

Gerakan joystick		Data analog		Gerakan kursi roda elektrik
X	Y	X	Y	
+	0	1023	512	Bergerak maju
-	0	0	512	Berputar pada sumbu putar
0	+	512	1023	Bergerak belok kanan
0	-	512	0	Bergerak belok kiri

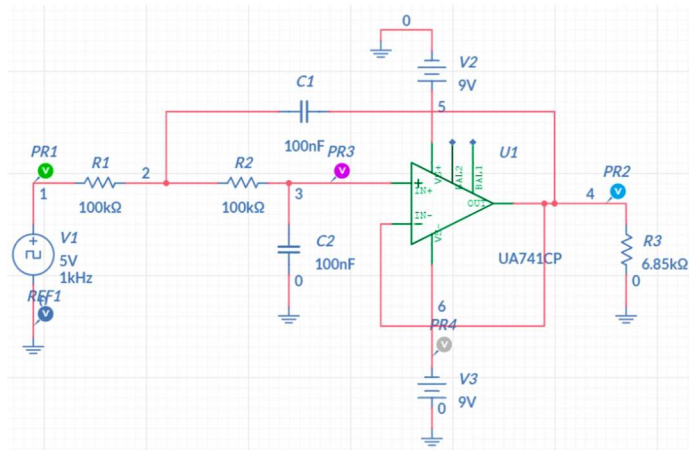
Data keluaran *joystick* bergantung pada posisi *joystick*. Data analog dari *joystick* yang dapat digunakan untuk menentukan pergerakan kursi roda elektrik. Hubungan data analog *joystick* terhadap gerakan kursi roda elektrik dapat dilihat pada Tabel III.

Kursi roda elektrik akan memiliki empat buah gerakan, yaitu: bergerak maju, berputar pada sumbu putar, bergerak belok kanan, dan bergerak belok kiri. Gerakan tersebut diadopsi dari gerakan robot beroda diferensial (DDWMR).

1) SISTEM THROTTLE

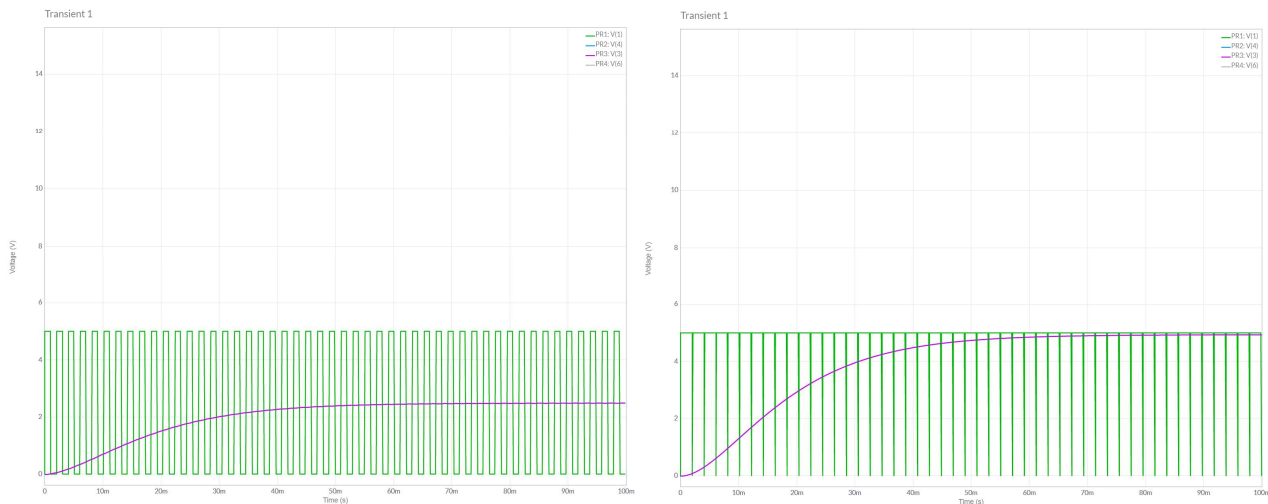
Perangkat vital pada kendaraan saat ini mulai bergeser dari sistem mekanis menjadi sistem elektromekanis. Hal ini berdampak pada perkembangan kendali kendaraan seperti pengereman elektronik, stabilisasi postur, kendali *throttle* elektronik. Salah satu perangkat yang mengalami perubahan adalah *throttle*. *Throttle* adalah perangkat yang mengatur aliran bahan bakar menuju mesin. Pada motor BLDC, *throttle*, mengatur tegangan *input* pada motor BLDC, sehingga pengaturan *throttle* berpengaruh pada kecepatan motor BLDC.

Pada modul Driver BLDC, masukan yang dapat diterima merupakan tegangan analog murni sehingga keluaran PWM dari Arduino tidak dapat berfungsi dengan baik. Oleh karena itu diperlukan rangkaian tapis untuk mengubah keluaran PWM menjadi tegangan analog murni. Perancangan rangkaian tapis untuk PWM ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Skematik rangkaian konversi PWM ke tegangan analog

Hasil simulasi rangkaian dapat dilihat pada Gambar 6 menggunakan perangkat lunak. PWM yang dihasilkan oleh Arduino-Uno memiliki frekuensi 490Hz, ditunjukkan oleh garis berwarna hijau. Sedangkan hasil keluaran rangkaian konverter ditunjukkan oleh garis berwarna ungu. Grafik tersebut menunjukkan bahwa rangkaian konversi PWM ke tegangan telah berhasil mengeluarkan tegangan analog murni.



Gambar 6. Grafik input dan output rangkaian konverter PWM ke tegangan analog

2) CONTROLLER BLDC

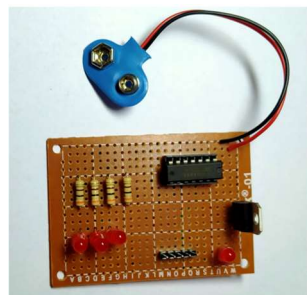
Untuk menggerakkan motor BLDC (Brushless DC), diperlukan modul driver atau kontroler khusus. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik pengoperasian motor BLDC dibandingkan dengan motor DC konvensional, di mana motor BLDC memerlukan pengaturan fase arus secara elektronik agar rotor dapat berputar secara sinkron. Selain itu, driver berfungsi sebagai saklar elektronik untuk mengatur aliran tegangan dan arus dari sumber daya DC ke motor BLDC. Modul driver tidak hanya mengaktifkan putaran motor, tetapi juga dilengkapi dengan berbagai fitur pendukung, seperti: pembacaan sensor Hall untuk menentukan posisi rotor, pengaturan kecepatan (*throttle*), serta fungsi pengereman (*braking*) untuk menghentikan motor dengan

cepat dan aman. Pada penelitian ini, motor yang digunakan adalah motor BLDC 48V, yang dipilih berdasarkan kebutuhan daya dan performa kursi roda elektrik. Spesifikasi teknis dari modul driver yang digunakan ditampilkan pada Tabel IV.

TABEL IV
SPESIFIKASI DRIVER BLDCM

Spesifikasi	Nilai	Satuan
Dimensi	150 × 81 × 40	mm
Tegangan masukan	48	V
Arus maksimum	30	A
Efisiensi	85	%
Rentang kecepatan	0-100	%

Untuk mendapatkan informasi kecepatan dari motor BLDC, diperlukan sebuah sensor yang dapat membaca pulsa-pulsa yang keluar dari motor BLDC, yaitu sensor hall. Sensor hall digunakan sebagai penghitung *Revolution Per Minute* (RPM) dengan cara mendeteksi perubahan medan magnet yang terjadi setiap kali rotor motor berputar. Untuk membaca pulsa-pulsa yang keluar dari sensor Hall, diperlukan sebuah rangkaian antarmuka yang dapat mengonversi sinyal dari bentuk analog atau digital menjadi sinyal yang dapat dibaca oleh mikrokontroler, dalam hal ini Arduino. Pada bagian ini, sistem akan memastikan bahwa kondisi sinyal dari sensor Hall dapat terbaca dengan baik oleh mikrokontroler Arduino, kemudian dilanjutkan dengan proses perhitungan kecepatan putaran motor. Perhitungan dilakukan dengan cara melakukan sampling jumlah pulsa yang diterima dalam satuan waktu tertentu, kemudian dikonversi menjadi nilai RPM menggunakan rumus yang sesuai. Dengan demikian, sistem dapat memantau kecepatan putaran motor secara real-time dan memberikan data yang akurat untuk keperluan kendali pada kursi roda elektrik.



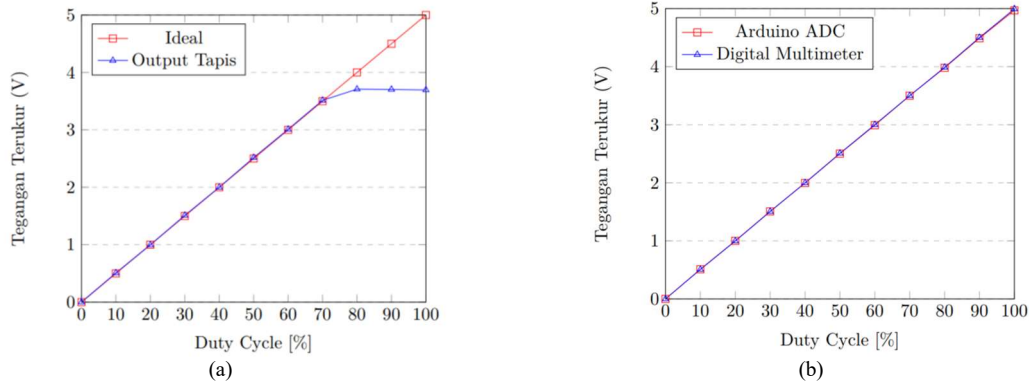
Gambar 7. Rangkaian Pendeteksi Hall

Rangkaian pendeteksi Hall pada Gambar 7 digunakan untuk memastikan bahwa sensor Hall berfungsi dengan baik dan tidak mengalami gangguan. Selain itu, rangkaian ini juga berfungsi untuk mendeteksi pola pergerakan motor BLDC dengan cara mengamati nyala dari tiga buah LED yang terhubung ke masing-masing output sensor Hall. Pola nyala LED akan menunjukkan urutan sinyal dari sensor Hall, yang merepresentasikan posisi rotor motor saat berputar. Dengan demikian, rangkaian ini tidak hanya berperan sebagai alat verifikasi fungsi sensor, tetapi juga sebagai indikator visual untuk memahami urutan kerja motor BLDC.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

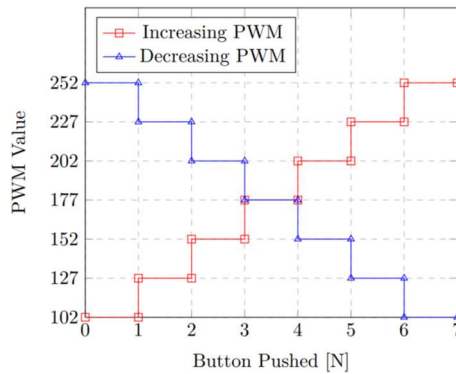
A. SISTEM THROTTLE

Rangkaian tapis PWM berfungsi untuk mengonversi sinyal PWM menjadi tegangan analog murni. Dalam penelitian ini dilakukan dua percobaan untuk mengamati hubungan antara perubahan duty-cycle PWM dan tegangan keluaran rangkaian tapis, menggunakan dua sumber tegangan berbeda, yaitu 5V dan 9V. Pada percobaan pertama, duty cycle PWM ditingkatkan secara bertahap dengan kenaikan sebesar 10%, dimulai dari 0% hingga mencapai 100%. Gambar 8 menunjukkan hubungan antara tegangan keluaran tapis dan perubahan duty-cycle PWM yang dihasilkan oleh Arduino-Uno. Hasilnya menunjukkan bahwa tegangan keluaran rangkaian tapis hanya mampu mencapai nilai maksimum sebesar 3,68V pada duty-cycle 80%. Hal ini disebabkan oleh adanya *offset* pada komponen operational-amplifier LM741 yang digunakan dalam rangkaian tapis. Untuk mengatasi keterbatasan ini, percobaan kedua dilakukan dengan menggunakan sumber tegangan yang lebih tinggi, yaitu 9V.



Gambar 8. Hubungan keluaran tapis perubahan duty-cycle PWM, dengan (a) sumber tegangan 5V dan (b) sumber tegangan 9V

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara tegangan keluaran tapis dan perubahan *duty-cycle* PWM Arduino-Uno dengan sumber tegangan 9V. Pada percobaan ini, hasil menunjukkan keluaran rangkaian tapis sesuai dengan nilai ideal yang diharapkan. Tegangan maksimum keluaran rangkaian tapis tercapai pada kondisi *duty-cycle* 100%, yaitu sebesar 5V. Berdasarkan hasil kedua percobaan yang ditunjukkan pada Gambar 8 (a) dan (b), Penelitian ini menetapkan bahwa rangkaian tapis dengan sumber tegangan 9V akan digunakan sebagai input untuk *throttle*.

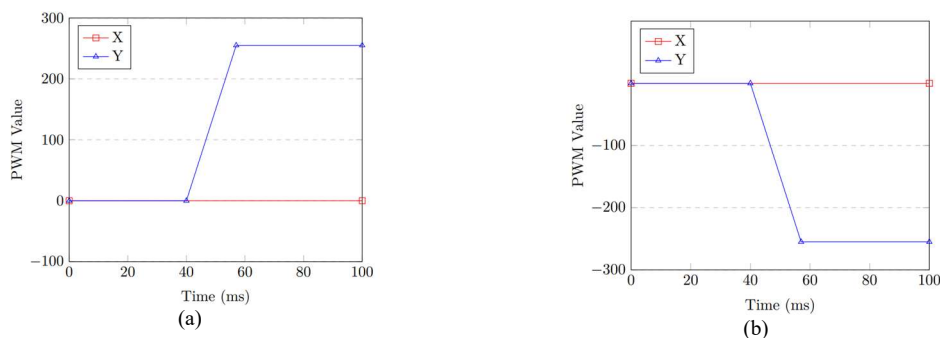


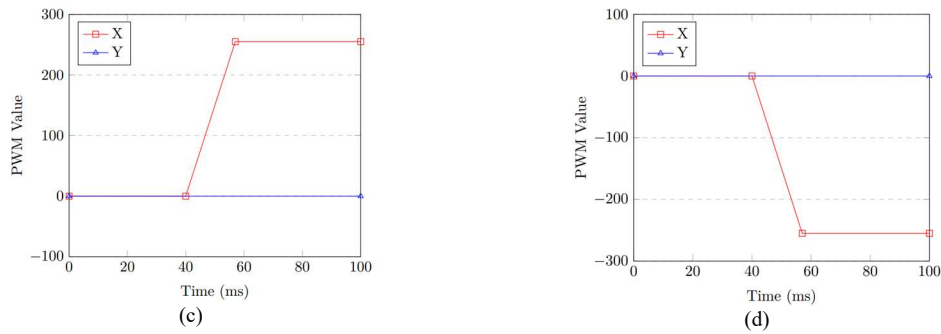
Gambar 9. Pengaturan maksimum pwm dengan dua buah push-button

Gambar 9 menunjukkan dua kondisi yaitu peningkatan dan penurunan nilai PWM berdasarkan jumlah penekanan tombol [N]. Nilai minimum PWM dibatasi pada 102 nilai analog atau setara 40% *duty-cycle*, sedangkan nilai maksimum yang dapat dicapai adalah 252 atau setara 99% *duty-cycle*. Setiap penekanan tombol akan mempengaruhi peningkatan atau penurunan nilai PWM sebesar 25 nilai analog atau setara 10% *duty-cycle* PWM.

B. PEMETAAN JOYSTIK

Pada penelitian ini, PWM yang diperlukan untuk *throttle* BLDC diatur oleh gerakan *joystick*. Gerakan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah gerak maju, gerak belok kanan, dan gerak belok kiri. Gerak mundur dan berputar pada sumbu tidak dilakukan. Namun untuk kedua gerakan tersebut tetap disediakan pemetaan pada *joystick* meskipun gerakan tidak mampu dilakukan. Langkah yang dilakukan adalah dengan melakukan fungsi *mapping* pada Arduino-Uno, sehingga *joystick* (10-bit) menghasilkan nilai analog pada kedua sumbu X dan Y sebesar -255 sampai dengan 255 atau nilai absolutnya setara dengan nilai keluaran PWM (8-bit).





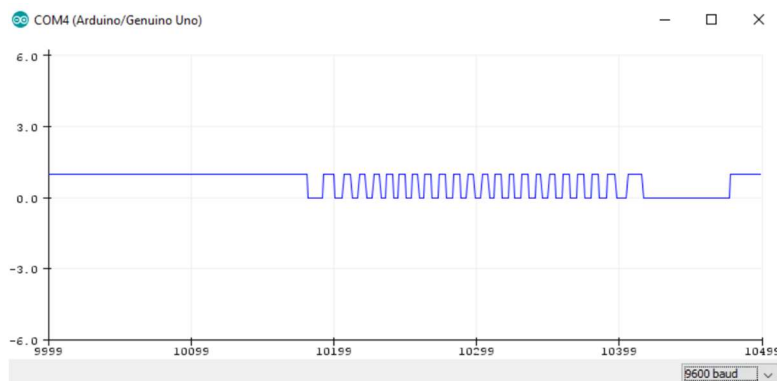
Gambar 10. Peta joystick gerak maju (a), mundur (b), belok kanan (c) dan belok kiri (d)

Gambar 10 (a) menunjukkan pergerakan penuh sumbu Y+ pada *joystick* untuk menghasilkan gerakan maju pada kedua motor BLDC. Selama *joystick* digerakkan dalam area Y+, maka kedua BLDC akan menerima *throttle* sebesar nilai analog *joystick*. Gambar 10 (b) menunjukkan pergerakan penuh sumbu Y- pada *joystick* yang diharapkan dapat digunakan untuk pergerakan mundur pada BLDC. Pada penelitian ini gerakan mundur atau berputar pada sumbu tidak dilakukan. Gambar 10 (c) menunjukkan pergerakan penuh sumbu X- pada *joystick* untuk menghasilkan gerak belok kanan pada kursi roda, yaitu dengan hanya memberikan *throttle* pada BLDC kanan sebesar nilai analog *joystick* pada sumbu X. Gambar 10 (d) menunjukkan pergerakan penuh sumbu X+ pada *joystick* untuk menghasilkan gerak belok kiri pada kursi roda, yaitu dengan hanya memberikan *throttle* pada BLDC kiri sebesar nilai analog *joystick* pada sumbu X.

Perubahan gerakan *joystick* dapat menghasilkan perubahan nilai PWM secara drastis, sehingga memberikan gerakan kejut pada kursi roda elektrik yang mengurangi kenyamanan *user*. Solusi yang diimplementasikan adalah dengan merancang algoritma agar perubahan gerakan *joystick* ditranslasikan menjadi perubahan/peningkatan nilai PWM secara bertahap. Untuk menghasilkan perubahan nilai PWM yang semakin halus (*smooth*) maka menghasilkan *delay* gerak yang semakin tinggi.

C. PEMBACAAN RPM

Untuk mendapatkan nilai RPM, terlebih dahulu dilakukan perhitungan jumlah pulsa yang dihasilkan oleh sensor hall tiap putaran BLDC. Perhitungan pulsa dilakukan dengan menggunakan rangkaian resistor pull-up yang terhubung dengan sensor hall dan Arduino-Uno. Gambar 11 menunjukkan pulsa yang dihasilkan oleh sensor hall ketika BLDC diputar satu putaran penuh. Jumlah pulsa yang dihasilkan adalah 24 pulsa per putaran dihitung pada posisi falling.

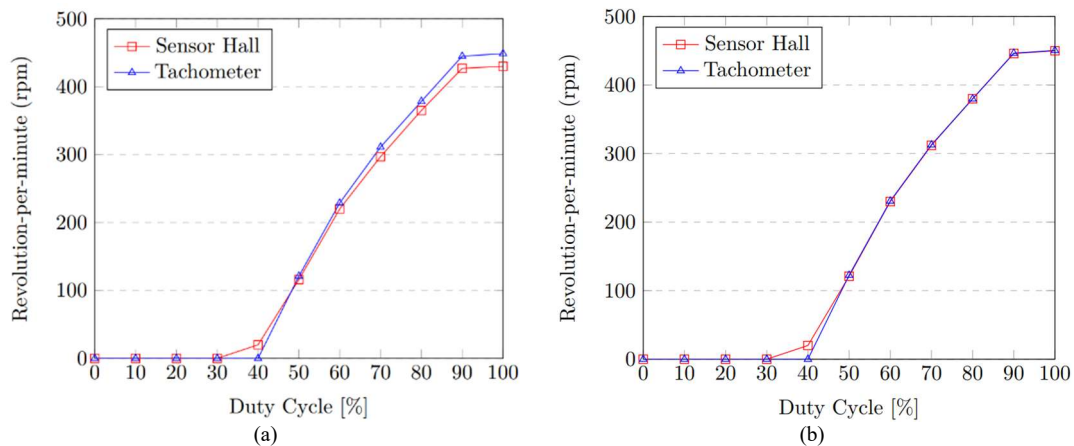


Gambar 11. Pembacaan pulsa pada sensor hall.

Tachometer berbasis sensor hall bekerja dengan menghitung jumlah putaran pulsa sampel dalam satu detik, n_p , dibagi dengan jumlah pulsa per putaran, lalu dikalikan dengan 60 detik, seperti ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$RPM = \frac{n_p}{24} \cdot 60s \quad (1)$$

Kalibrasi tachometer berbasis sensor hall dilakukan dengan membandingkan nilai *revolution-per-minute* (RPM) yang dihasilkan dengan hasil RPM yang terbaca oleh alat ukur *tachometer SANWA SE300* sebagai referensi. Kalibrasi dilakukan tanpa memberikan beban pada BLDC. Gambar 12 merupakan perbandingan data nilai RPM yang didapat oleh sensor hall dan tachometer. Berdasarkan data yang didapatkan, sensor hall memiliki rata-rata *error* sebesar 4,04%. Nilai *error* tersebut akan digunakan sebagai faktor pengali pada proses kalibrasi.



Gambar 12. Grafik pengukuran RPM dengan sensor hall (a) Sebelum kalibrasi dan (b) Setelah dikalibrasi.

Gambar 12 (a) menunjukkan grafik hasil perbandingan nilai RPM yang terbaca sensor hall yang telah dikalibrasi dengan faktor pengali yang telah didapatkan. Pada Gambar 12 dengan menggunakan tachometer. Setelah dilakukan kalibrasi, nilai *error* yang didapat adalah 0,32%. Berdasarkan nilai *error* tersebut, dapat disimpulkan bahwa sensor hall berhasil dikalibrasi mendapatkan *error* yang dihasilkan lebih kecil. Nilai RPM maksimum yang mampu dihasilkan oleh BLDC adalah 450 RPM dengan 100% *duty-cycle* PWM.

IV. KESIMPULAN

Perancangan dan pembangunan sistem *throttle* motor BLDC pada kursi roda elektrik dilakukan dengan memanfaatkan *joystick* sebagai pengendali utama yang mengatur sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) sebagai input *throttle*. Untuk menghasilkan sinyal PWM yang proporsional terhadap pergerakan *joystick*, digunakan fungsi mapping pada mikrokontroler Arduino. Sinyal PWM yang dihasilkan kemudian dilewatkan melalui rangkaian tapis (*filter*) agar dapat dikonversi menjadi tegangan analog murni, yang selanjutnya digunakan sebagai sinyal masukan *throttle* untuk motor BLDC. Sensor Hall berhasil membaca nilai putaran motor (RPM) secara akurat dan sesuai dengan referensi pengukuran dari tachometer Sanwa SE300. Setelah dilakukan proses kalibrasi, diperoleh tingkat kesalahan (*error*) sebesar 0,32%. Berdasarkan hasil pembacaan tachometer berbasis sensor Hall, kecepatan putaran maksimum yang dapat dicapai pada *duty-cycle* PWM 100% adalah sebesar 450 RPM. Dalam penelitian ini, kursi roda elektrik mampu menjalankan tiga gerakan dasar, yaitu gerak maju, belok ke kanan, dan belok ke kiri, yang seluruhnya dapat dikendalikan secara responsif melalui *joystick*. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem *throttle* dan pengukuran kecepatan berbasis sensor Hall dapat berfungsi dengan baik dan mendukung pengoperasian kursi roda secara efektif. Sebagai kesimpulan, sistem *throttle* yang dikembangkan tidak hanya berhasil secara teknis, tetapi juga memiliki potensi ilmiah dan aplikatif dalam meningkatkan efisiensi serta kenyamanan penggunaan kursi roda elektrik dalam jangka panjang. Teknologi ini membuka peluang integrasi dengan sistem navigasi otomatis, penambahan sensor untuk keselamatan atau kontrol lanjutan, serta pengujian lebih lanjut dengan pengguna sesungguhnya untuk mengevaluasi aspek ergonomis dan fungsional.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

REFERENSI

- [1] W. Waspiyah, R. Arifin, N. M. Putri, M. H. A. F. Safarin, and D. D. P. Putri, "Student Edited Law Journals: Strengthening the Creativity of Law Students in a Challenging Era," *Journal of Creativity Student*, vol. 7, no. 2, pp. 133–154, Dec. 2022, doi: 10.15294/jcs.v7i2.38493.
- [2] A. Syakura, S. Nurhosifah, and R. W., "Pengembangan Kursi Roda yang Efektif dalam Menurunkan Dampak Negatif Imobilisasi Lama pada Penyandang Disabilitas Fisik dengan Kelumpuhan : Sistematis Review," *PROFESSIONAL HEALTH JOURNAL*, vol. 3, pp. 1–8, May 2021, doi: 10.54832/phj.v3i1.168.
- [3] N. Kholis, Y. Pratama, H. Tokomadoran, V. Galuh, F. Sains, and D. Teknologi, "Perancangan Kursi Roda Ergonomis Untuk Penunjang Disabilitas," *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan (JTMIT)*, vol. 1, no. 4, pp. 267–276, 2022.
- [4] S. Annirohman, F. D. Puspitarini, D. Natalia, and F. Yulvaniya, "RANCANGAN KURSI RODA ELEKTRIK DENGAN REMOT DAN TUAS ELECTRIC WHEELCHAIR DESIGN WITH REMOTE AND LEVER," *Jurnal Teknik*, vol. 12, pp. 89–99, Mar. 2023, [Online]. Available: <http://jurnal.umt.ac.id/index.php/jt/index>
- [5] A. S. Junior and F. Arifin, "Prototipe Kursi Roda Elektrik Dengan Kendali Joystick Dan Smartphone," *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, vol. 4, no. 1, pp. 62–68, Nov. 2019, doi: 10.21831/elinvo.v4i1.28259.
- [6] N. Jayasekera, B. Kulathunge, H. Premaratne, I. Nilam, S. Rajapaksha, and J. Krishara, "Revolutionizing Accessibility: Smart Wheelchair Robot and Mobile Application for Mobility, Assistance, and Home Management," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 5, no. 1, pp. 27–53, 2024, doi: 10.18196/jrc.v5i1.20057.
- [7] S. Setiawan, D. Darlis, and A. Rusdinar, "IMPLEMENTASI PENGENDALI MOTOR DC PADA KURSI RODA OTOMATIS BERBASIS ARDUINO IMPLEMENTATION OF ARDUINO-BASED DC MOTOR CONTROLLER FOR AUTOMATIC WHEELCHAIR", doi: 10.25124/jett.v8i2.4149.
- [8] A. Akbar, G. A. Nasser Masikki, A. N. Aliansyah, and N. Z. D. L. Mulyawati, "Perancangan Sistem Monitoring Navigasi Kursi Roda Berbasis Mikrokontroler," *JTEV (Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional)*, vol. 7, no. 1, p. 45, Mar. 2021, doi: 10.24036/jtev.v7i1.111958.
- [9] C. Mayort Sailana, T. S. Sollu, and A. Alamsyah, "RANCANG BANGUN KURSI RODA ELEKTRIK BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT)," *Foristek*, vol. 11, no. 1, Oct. 2021, doi: 10.54757/fs.v11i1.34.
- [10] Rifan Arif, "PERANCANGAN WORM GEAR MAINFERMENTOR POMPA SENTRIFUGAL DI PT. CHAIL JEDANG INDONESIA," *Journal Mechanicaland Manufacture Technology*, vol. 5, no. 1, 2024.

- [11] D. C. Putro and E. Samsul Ma'arif, "EFISIENSI PENGGUNAAN MOTOR BLDC TERHADAP BEBAN DAN KECEPATAN SEPEDA MOTOR LISTRIK," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, Jakarta: Universitas Muhammadiyah Jakarta, Apr. 2024, pp. 1-6.
- [12] D. Harjono *et al.*, "Analisis Sistem Penggerak Motor BLDC Pada Mobil Listrik Poncar," *Electrotechnics And Information Technology*, vol. 2, pp. 11-22, Apr. 2021.
- [13] A. S. Habibie, N. Kholis, and F. Baskoro, "Studi literatur : Pengaruh penggunaan Brushless Direct Current (BLDC) Motor terhadap kinerja Robot Lengan," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 11, pp. 255-261, 2022.
- [14] MUHAMMAD HAMZAH ABDURRAHMAN AS-SALAF and SYAHRIAL, "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor BLDC menggunakan Software PSIM," *Journal MIND Journal | ISSN*, vol. 6, no. 1, pp. 103-117, 2021, doi: 10.26760/mindjournal.v6i1.103.
- [15] ANDI FAUZAN ALIM, "SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC (BLDC) DENGAN PENGENDALI PI," UNIVERSITAS HASANUDDIN, Gowa, 2020.
- [16] Nurdamayanti, L. Sartika, and A. Muis Prasetya, "PENGATURAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MENGGUNAKAN METODE FIELD ORIENTED CONTROL (FOC)," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 143-148, Nov. 2022, [Online]. Available: <https://journal.uny.ac.id/index.php/jee>
- [17] C. R. Harahap, E. Komalasari, and A. A. Clinton, "Sistem Pengendalian Kecepatan Dua Motor Brushless DC (BLDC) dengan Nine Switch Inverter Menggunakan Metode PWM," *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 16, no. 3, Sep. 2022.
- [18] R. Nurhalim, H. Abizar, D. Sulaeman, and D. Ramdani, "PENGUJIAN MOTOR BLDC 48 VOLT-2KW TERHADAP PERFORMA PROTOTYPE MOBIL LISTRIK KAIBON KAPASITAS SATU PENUMPANG," *Jurnal Sains dan Teknologi*, pp. 43-48, 2021.
- [19] E. Samsul Ma, E. Dermawan, and P. Gagani Chamdareno, "Studi Perencanaan Pengaturan Kecepatan Motor BLDC pada Gerobak Listrik dengan Driver Votol EM-30S," *RESISTOR*, vol. 5, no. 2, 2022.
- [20] I. Prastyaningrum and P. Ardi, "Project Based Learning For Brush Less DC Motor," in *Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya*, 2020, pp. 112-118.

Deep Learning and Traditional Models for Wind Speed Forecasting in Saudi Arabia

Deep Learning dan Model Tradisional untuk Peramalan Kecepatan Angin di Arab Saudi

Ikhsan Hidayat¹, Mohammad A. Abido²,

¹ Universitas Negeri Gorontalo; email: ikhsan_hidayat@ung.ac.id

² Electrical Engineering Department, King Fahd University of Petroleum and Minerals; email: mabido@kfupm.edu.sa

[Received: 14 February 2025, Revised: 28 May 2025, Accepted: 31 May 2025]

Corresponding Author: Ikhsan Hidayat

ABSTRACT — This study evaluates the performance of traditional statistical methods, specifically the Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA), in comparison to advanced deep learning models—Long Short-Term Memory (LSTM), Bidirectional LSTM (BiLSTM), and Convolutional Neural Network (CNN)—for wind speed forecasting across various regions in Saudi Arabia: Al-Jouf, Abha, Al-Ahsa, and Al-Dawadami. The historical wind speed dataset covering the year 2018 was utilized, with data preprocessing conducted using the Exploratory Data Analysis (EDA) method to ensure consistency and quality. The models were assessed based on three primary error metrics: Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), and Root Mean Square Error (RMSE). Results show that CNN consistently outperforms SARIMA and the other deep learning models, particularly when forecasting stable wind speed patterns. LSTM demonstrates an ability to handle fluctuating wind speeds effectively, while BiLSTM offers advantages in capturing complex bidirectional temporal dependencies. On the other hand, SARIMA generally exhibits lower performance compared to deep learning approaches. The superior performance of CNN is likely attributed to its strength in local feature extraction and handling spatial patterns effectively, which are beneficial for short-term forecasting. These findings provide valuable insights into model selection for wind energy forecasting and can contribute to optimizing renewable energy integration and planning strategies. Future work may explore hybrid model approaches to further enhance forecasting accuracy.

KEYWORDS — SARIMA, CNN, LSTM, BiLSTM, Wind Speed, Forecasting.

INTISARI — Penelitian ini mengevaluasi kinerja metode statistik tradisional, khususnya *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA)*, dibandingkan dengan model deep learning lanjutan—*Long Short-Term Memory (LSTM)*, *Bidirectional LSTM (BiLSTM)*, dan *Convolutional Neural Network (CNN)*—dalam peramalan kecepatan angin di berbagai wilayah di Arab Saudi: Al-Jouf, Abha, Al-Ahsa, dan Al-Dawadami. Dataset historis kecepatan angin sepanjang tahun 2018 digunakan dalam studi ini, dengan data mentah yang telah dibersihkan menggunakan metode *Exploratory Data Analysis (EDA)* untuk memastikan konsistensi dan kualitas. Model dievaluasi menggunakan tiga metrik kesalahan utama: *Mean Absolute Error (MAE)*, *Mean Squared Error (MSE)*, dan *Root Mean Square Error (RMSE)*. Hasil menunjukkan bahwa CNN secara konsisten mengungguli *SARIMA* dan *model deep learning* lainnya, terutama dalam meramalkan pola kecepatan angin yang stabil. LSTM menunjukkan kemampuan dalam menangani data angin yang berfluktuasi, sedangkan BiLSTM unggul dalam menangkap ketergantungan temporal dua arah yang kompleks. Di sisi lain, SARIMA umumnya menunjukkan performa prediksi yang lebih rendah dibandingkan pendekatan *deep learning*. Keunggulan CNN kemungkinan besar disebabkan oleh kemampuannya dalam mengekstraksi fitur lokal dan menangani pola spasial dengan lebih efektif, yang sangat bermanfaat untuk peramalan jangka pendek. Temuan ini memberikan wawasan berharga dalam pemilihan model untuk peramalan energi angin dan dapat berkontribusi pada optimalisasi integrasi energi terbarukan. Studi selanjutnya dapat mengeksplorasi pendekatan model hibrida untuk meningkatkan akurasi prediksi.

KATA KUNCI — SARIMA, CNN, LSTM, BiLSTM, Wind Speed, Forecasting.

I. INTRODUCTION

Forecasting has gained significant traction in various domains today, ranging from predicting stock market trends [1], [2], marketing outcomes [3], seasonal decomposition [4], and electric load projections [5], to wind speed [6], [8], [9], [20] and tidal forecasting [7]. A plethora of forecasting methods have been applied, including classical statistical approaches such as ARIMA [10] and seasonal ARIMA for dealing with seasonal data [11]. Nevertheless, the integration of artificial intelligence (AI), machine learning (ML), and deep learning (DL) techniques has not only accelerated the forecasting process but also substantially reduced the likelihood of errors, thanks to iterative training and testing procedures [12]. Precise wind speed prediction plays a vital role in enhancing the efficiency of wind energy systems and safeguarding the public during severe weather conditions [13]. Previous studies have utilized deep learning models such as LSTM and CNN for wind speed forecasting; however, comprehensive comparisons that include BiLSTM alongside CNN, LSTM, and classical SARIMA models across multiple geographically diverse

regions remain limited. This study addresses that gap by critically evaluating and comparing the predictive capabilities of SARIMA, LSTM, BiLSTM, and CNN models for wind speed forecasting.

Furthermore, the study focuses on four distinct regions in Saudi Arabia: Al-Jouf, Abha, Al-Ahsa, and Al-Dawadami. These regions were selected due to their varying geographical and climatic characteristics, which present different wind behavior patterns and forecasting challenges, making them ideal testbeds for evaluating model generalization and robustness. While emphasizing the refinement of the ARIMA model for optimized outcomes [10], this research also explores hybrid methodologies that combine classical techniques with contemporary deep learning strategies [3].

II. METHODOLOGY AND FORMULATION

In the realm of time series forecasting, Conventional ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) and its extension SARIMA (Seasonal ARIMA) have long stood as cornerstones. These models offer powerful tools to analyze and predict time-dependent data, distinguishing between non-seasonal and seasonal components within a series. However, the emergence of ML methodologies has sparked a paradigm shift, introducing models like CNN, LSTM, and Bidirectional LSTM into the forecasting landscape.

A. ARIMA AND SARIMA METHOD

An ARIMA model helps predict future values by examining patterns in past data. It does this through three main elements: Autoregressive (AR): This part looks at how past values can predict what comes next. It considers a certain number of past values denoted as 'p.' Differencing (I): This step is about making the data more predictable by removing trends or patterns. It does this a number of times indicated as 'd.' Moving Average (MA): Here, past prediction errors are used to forecast future values. It considers a number of past errors marked as 'q.' The general formula for an ARIMA method is:

$$Y(t) = c + \phi_1 Y(t-1) + \phi_2 Y(t-2) + \dots + \phi_p Y(t-p) - \theta_1 e(t-1) - \theta_2 e(t-2) - \dots - \theta_q e(t-q) + e(t) \quad (1)$$

$Y(t)$ represents the time series value at time t , where c is a constant. The coefficients $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ correspond to the autoregressive terms, while $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ denote the moving average coefficients. The term $e(t)$ represents the white noise error at time t . For seasonal data, the SARIMA model with key variables $(p,d,q) \times (P,D,Q)$ is mathematically defined by the following equations:

$$\Phi_p(B) \nabla^d P_P(B) y(t) = \theta_q(B) v Q(B) \epsilon_t \quad (2)$$

The model's objective is to find the best combination of these elements to make accurate forecasts based on historical data. In this context, c is a constant, $y(t)$ represents the time series value at time t , e_t denotes the white noise error, y_{t-p} indicates the lagged value of $y(t)$ by p steps. The parameters ' θ ' and ' ϕ ' belong to the ARMA method. within the ARMA

at a lag of ' p ', and both ' θ ' and ' ϕ ' are key variables within the ARMA model. The ARIMA model of level (p,d,q) is mathematically expressed in Equation 3.

$$y'(t) = c + e_t + \phi_1 y_{t-1} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 e_{t-1} + \dots + \theta_q e_{t-q} \quad (3)$$

Here, $y'(t)$ is defined as $y'(t) = y'(t) - y(t-1)$. And is represented in equation 4.

$$y'(t) = y(t) - B1(y(t)) \quad (4)$$

where $B1$ is referred to as the backward shift operator of level 1. The SARIMA model of level $(p, d, q) \times (P, D, Q)L$ can be expressed using the following equations :

$$\Phi_p(B) \phi^P(BL) y(t) = \theta_q(B) v Q(BL) \epsilon_t \quad (5)$$

And the seasonal period is represented by L , then

$$\Phi_p(B) = 1 - \phi B \dots - \phi^p B^p, \quad (6)$$

$$\phi^p(B) = 1 - \theta_1 B \dots - \theta_q B^q, \quad (7)$$

$$\Phi_p(BL) = 1 - \phi_1 L B L \dots - \phi^p L^p B^p L^p, \quad (8)$$

$$\phi^q(BL) = 1 - \phi_1 L B L \dots - \phi^q L^q B^q L^q, \quad (9)$$

Here, ϕ, θ, ϕ, v become key variables of the SARIMA model that we have.

B. LONG SHORT TERM MEMORY (LSTM)

Unlike conventional recurrent networks, LSTM introduces cell states, allowing the model to selectively retain or discard information, thereby improving its ability to capture long-term dependencies in sequential data. For LSTM training, we employ three advanced techniques using Keras.

An LSTM network consists of an input layer, hidden layers, and an output layer [3]. The input layer contains neurons corresponding to the number of input features, while the output layer represents the target output, such as two neurons indicating wind speed at $t + 1$ relative to the cross-sectional median. The core functionality of LSTM lies in its hidden layers, which contain memory cells controlled by three key gates: the forget gate (f_t), input gate (i_t), and output gate (o_t). These gates regulate the cell state (s_t), allowing the network to effectively retain and update information over time.

At each time step t , the three gates receive inputs: x_t (a single element of the input sequence) and the previous timestep's memory cell output, h_{t-1} . These gates operate as filters, serving distinct roles: The forget gate decides what information should be discarded from the cell state. The input gate determines the information to be added to the cell state. The output gate regulates the selection of information from the cell state for output purposes.

A. BIDIRECTIONAL LONG SHORT TERM MEMORY (BI-LSTM)

BiLSTM network, a configuration integrating both backward and forward LSTMs, demonstrates robustness in processing time series data. Illustrated in the diagram is the architectural structure of the BiLSTM [15]. This integration of forward and backward LSTMs enhances feature extraction while capturing temporal dependencies [16]. The computations of $U*1$ in the forward pass and I_U in the backward pass jointly contribute to the network's output, y .

B. CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS (CNN)

CNNs originated from Fukushima's work in 1980 but were significantly refined by Yann LeCun in 1998, making them powerful tools in areas like object detection, medical imaging, and image classification [17]. As deep multilayer perceptrons (MLPs), CNNs extract local features at higher layers and combine them into more complex patterns at lower layers. While primarily designed for visual data, CNNs can process non-visual data by encoding it to resemble visual structures [17].

III. DATASET AND BENCHMARK

To evaluate the effectiveness of the forecasting methods, wind speed time series data from the Saudi Arabia Hourly Climate Integrated Surface Data [18] was used. This dataset, provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration, covers regions such as Abha, Al Ahsa, Al-Jouf, and Al-Dawadami for the year 2018. This dataset consists of 365 daily measurements of wind speed recorded at a height of 30 meters. Figure 1 visually depicts the specific wind speed time series of these distinct Saudi Arabian locations.

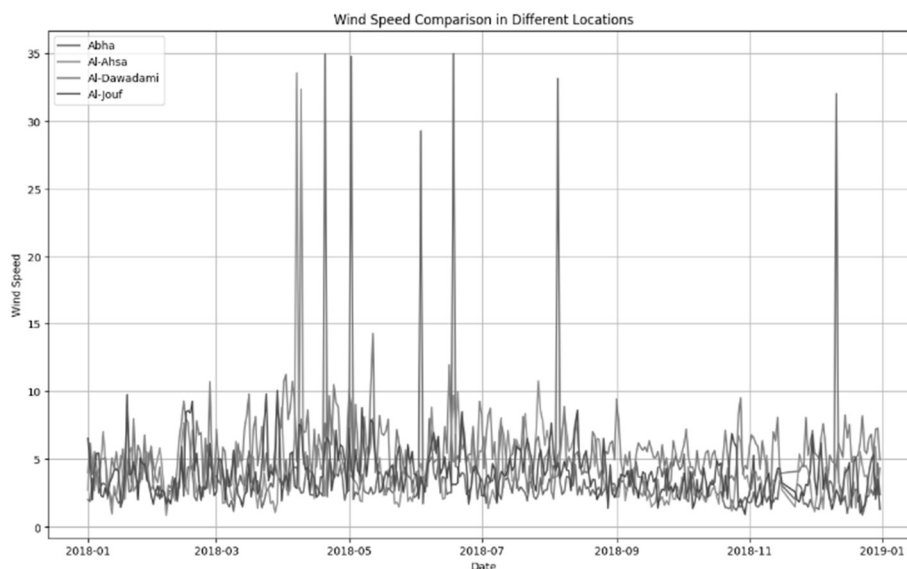


Figure 1. Wind Speed is Measured in Knots Across Four Regions in Saudi Arabia

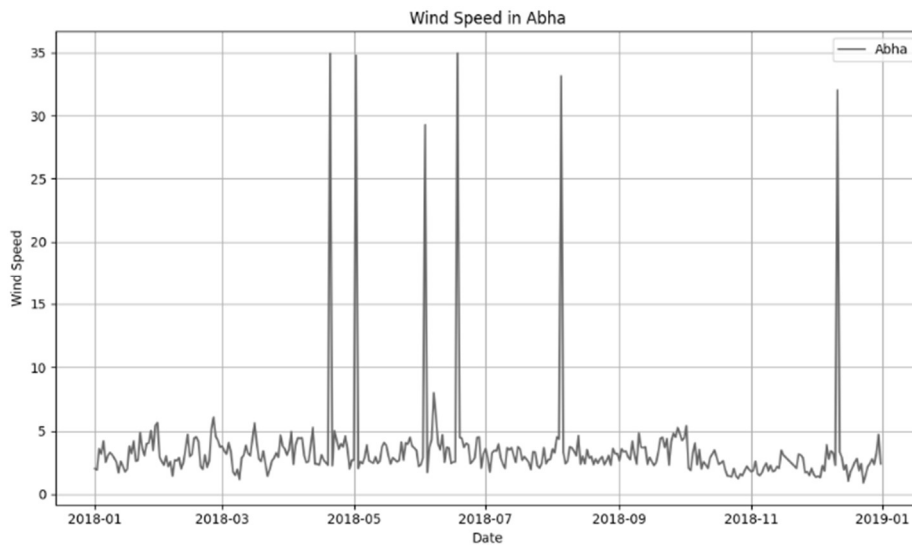


Figure 2. Wind Speed in Knots at the Abha Area

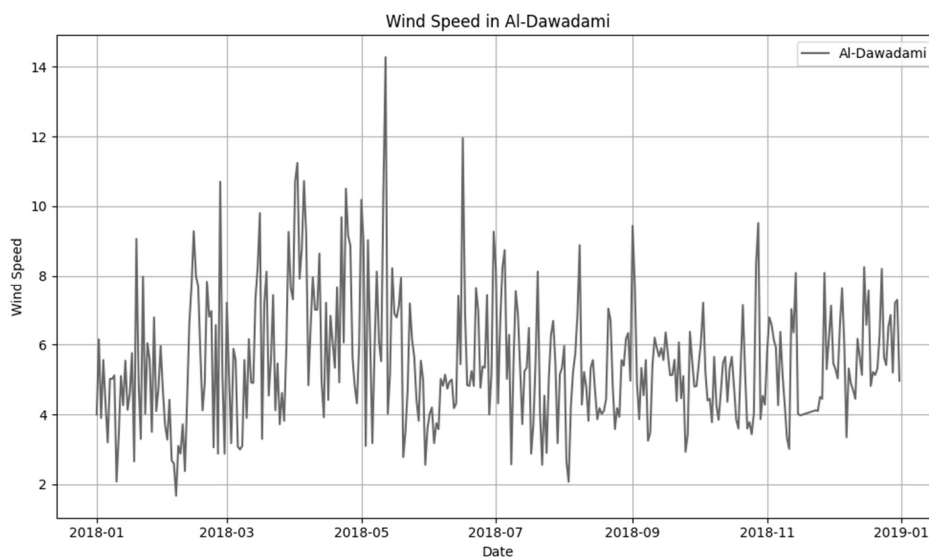


Figure 3. Wind Speed in Knots at the Al-Dawadami Area

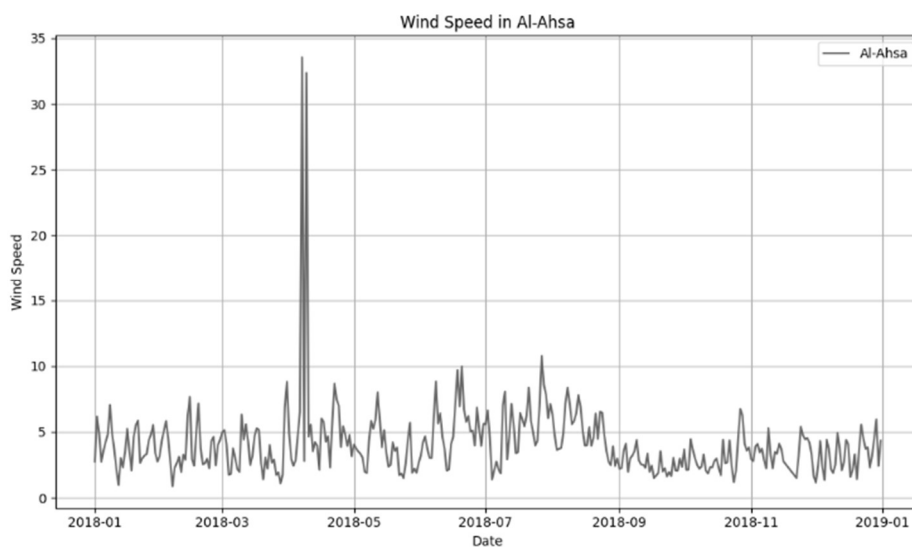


Figure 4. Wind Speed in Knots at the Al-Ahsa Area

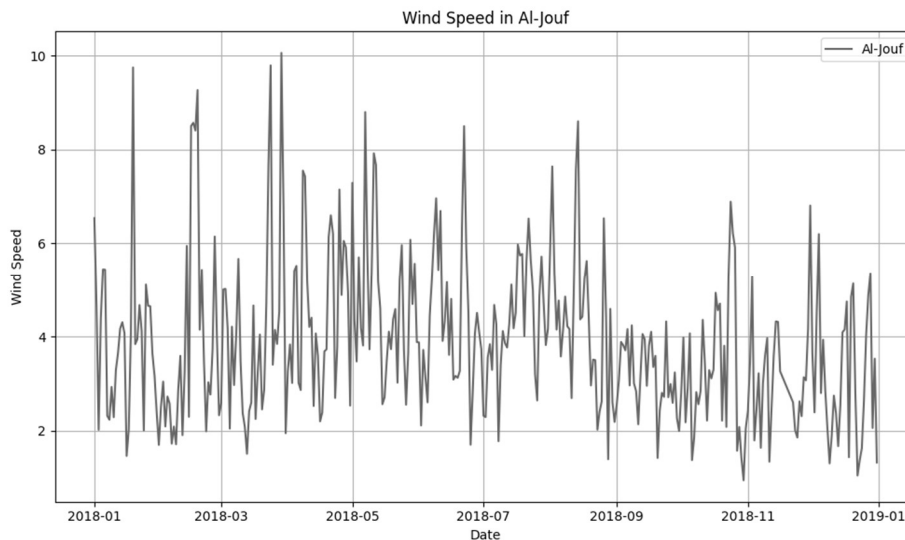


Figure 5. Wind Speed in Knots at Al-Jouf Area

The process commences with the meticulous collection, cleansing, and structuring of wind speed data, followed by partitioning it into training and testing sets. Subsequently, normalization of the data ensures uniformity in scale for effective analysis. The data is utilized to develop predictive models by employing sophisticated modeling methods, like machine learning algorithms. These models generate forecasts that are evaluated against real-world wind speed observations, enabling a comprehensive assessment of their accuracy and reliability.

Our evaluation framework utilizes three key metrics: Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Squared Error (MSE), and Mean Absolute Error (MAE). These metrics provide valuable insights into the forecasting models' performance and accuracy, ensuring a thorough assessment of their predictive capabilities.

IV. SIMULATION AND RESULTS

In this phase of the study, the wind speed will be analyzed using SARIMA, LSTM, BiLSTM, and CNN models, as detailed in the preceding sections. The historical wind speed dataset, sourced from [18], covers the entirety of 2018. Before modeling, the raw data were cleaned and preprocessed using the Exploratory Data Analysis (EDA) method [19] to ensure data quality and consistency. For modeling purposes, the historical data from January 1st to December 15th will be used, with the results presented in Figures 6–10 based on the data from November 2018, while forecasting will be conducted for the subsequent 15 days, from December 16th to December 30th, 2018.

Tables I to III showcase the hyper key variables employed in the forecasting techniques investigated in this study, detailing the spectrum of values examined during the optimization phase.

TABLE I

KEY VARIABLES OF THE SARIMA MODEL

KEY VARIABLES	Value
Autoregressive level (p)	1
Differencing level (d)	1
Periodic autoregressive Stage (P)	2
Periodic differencing Stage (D)	1
Periodic Moving Average Stage (Q)	2
Seasonal period (s)	12
Forecast Horizon	12 - 15

^a For the SARIMA method, we use the same key variables of 4 cities (Al-ahsa, Abha, Al-jouf, and Al-dawadami).

TABLE II

KEY VARIABLES OF THE BiLSTM AND LSTM MODEL

KEY VARIABLES	Value			
	Al-Ahsa	Abha	Al-Jouf	Al-Dawadami
Units	160	160	180	150
Compact Layer, units	1	1	1	1

Activation function	'relu' (Rectified Linear Activation Function)			
Optimizer	'adam' (Adaptive Moment Estimation)			
Training epochs	250	150	180	150

TABLE III

KEY VARIABLES OF THE CNN METHOD

KEY VARIABLES	Value			
	Al-Ahsa	Abha	Al-Jouf	Al-Dawadami
Filters	54	54	54	54
Kernel Size	4	4	4	4
Max Polling Layer	2	2	2	2
Compact Layer, Units	1	1	1	1
Activation function	'relu' (Rectified Linear Activation Function)			
Compiler optimizer	'adam' (Adaptive Moment Estimation)			
Batch size	32	50	32	32
Epochs of training	250	300	150	150

Based on the key variables from Tables I to III, we used the Python program to find the value of the forecast from the data, and we got the results in Figures 6-10.

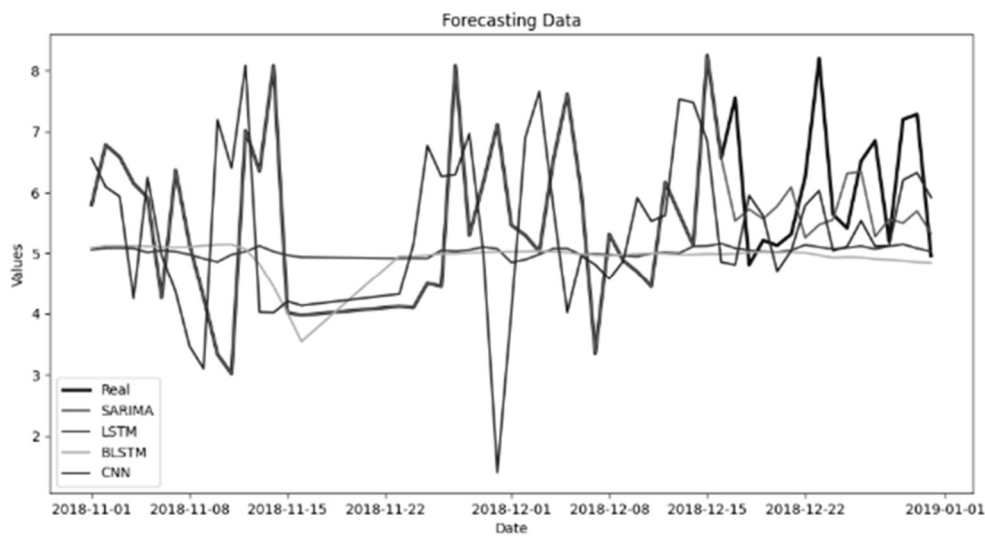


Figure 6. Wind Speed in Knots at Area Al-Dawadami

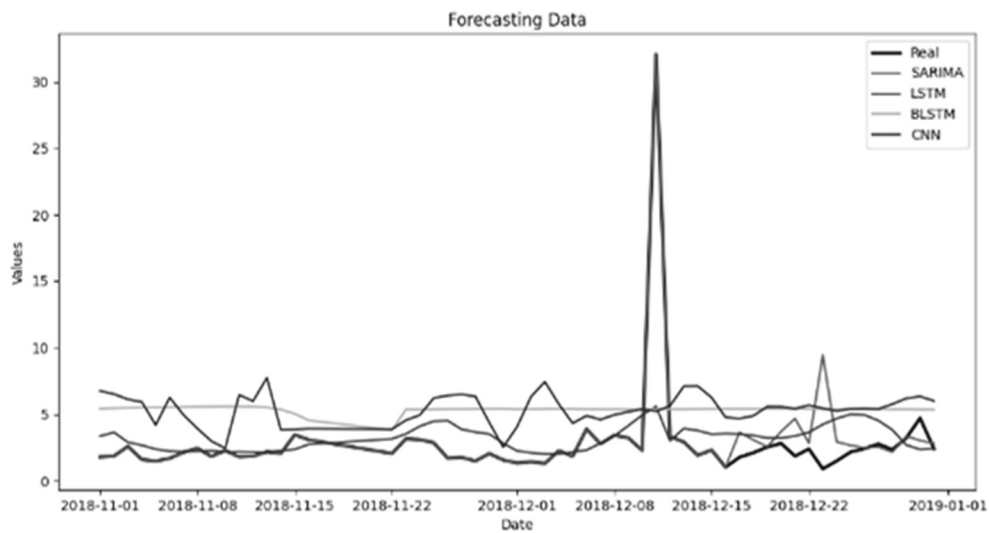


Figure 7. Wind Speed in Knots at Abha

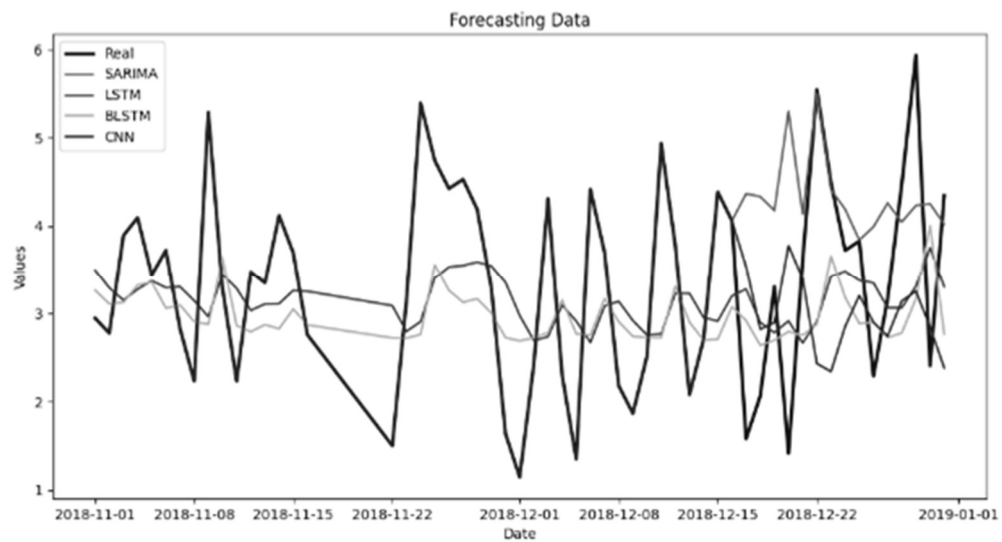


Figure 8. Wind Speed in Knots at Al-Ahsa

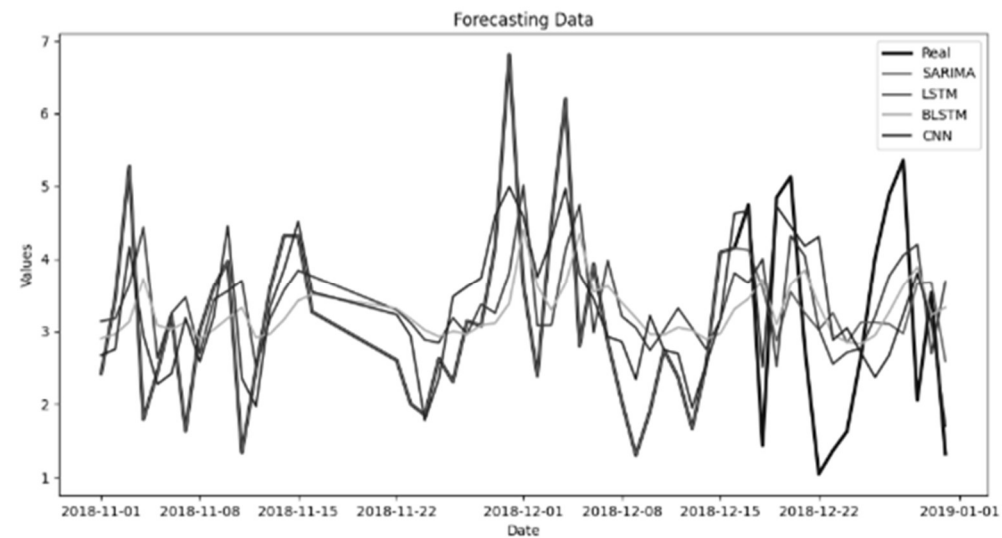


Figure 9. Wind Speed in Knots at Al-Jouf

From four samples of wind speed data in knots taken from different locations using the key variables in Tables 1-4, the results of the MAE, MSE, and RMSE formulations from equations (10 - 12) are presented in Table IV.

TABLE IV
FORECASTING RESULTS

Location	Error	SARIMA	LSTM	BLSTM	CNN	BEST
Al-Ahsa	MSE	0.311	1.182	3.579	0.280	CNN
	MAE	0.142	0.887	1.159	0.050	
	RMSE	0.529	1.087	1.896	0.333	
Abha	MSE	0.329	1.933	1.909	0.254	CNN
	MAE	0.262	1.060	1.047	0.056	
	RMSE	0.573	1.390	1.381	0.504	
Al-Jouf	MSE	0.640	1.882	2.057	0.096	CNN
	MAE	0.606	1.059	1.092	0.056	
	RMSE	0.800	1.372	1.434	0.310	
Al-Dawadami	MSE	0.397	1.997	2.003	0.065	CNN
	MAE	0.306	1.071	1.058	0.042	
	RMSE	0.630	1.413	1.415	0.255	

This study provides a comparative analysis between deep learning models (LSTM, BiLSTM, and CNN) and the traditional SARIMA model for wind speed forecasting across four locations in Saudi Arabia: Al-Ahsa, Abha, Al-Jouf, and Al-Dawadami. Across all locations, deep learning models generally outperform SARIMA, with CNN achieving the most notable improvements. For example, in Al-Ahsa, CNN reduced the MAE by approximately 65% compared to SARIMA (from 0.142 to 0.050) and lowered the RMSE by about 37% (from 0.529 to 0.333). Similar trends are observed in Abha and Al-Jouf, where CNN consistently records lower MSE, MAE, and RMSE values than SARIMA.

Among the deep learning models, CNN significantly outperforms both LSTM and BiLSTM. In Al-Ahsa, CNN reduces the MAE by around 94% compared to LSTM and RMSE by approximately 82% compared to BiLSTM. LSTM and BiLSTM occasionally show competitive performance but still exhibit higher errors than CNN, and in some cases, their errors approach or exceed those of SARIMA. This indicates that while deep learning provides a clear advantage over traditional methods, model selection within deep learning architectures remains critical. CNN's superior performance can be attributed to its strength in capturing local temporal patterns through convolutional operations, allowing it to better manage the short-term variability and noise typical of wind speed data. Compared to SARIMA, which assumes linearity and stationary behavior, CNN can model complex, nonlinear relationships inherent in meteorological time series.

Moreover, CNNs generally require fewer parameters and training time than LSTM or BiLSTM, enhancing both efficiency and generalization, particularly when the dataset size is moderate. These findings confirm that deep learning, especially CNN, offers a more robust and accurate solution for wind speed forecasting compared to traditional statistical models.

V. CONCLUSION

The comparative evaluation of wind speed forecasting models—SARIMA, LSTM, BLSTM, and CNN—across Al-Ahsa, Abha, Al-Jouf, and Al-Dawadami demonstrates that CNN consistently achieves the best performance. For instance, in Al-Ahsa, CNN reduces the MAE by approximately 65% compared to SARIMA (from 0.142 to 0.050) and achieves a 37% reduction in RMSE (from 0.529 to 0.333). In Abha, CNN also lowers the MAE by nearly 79% compared to SARIMA (from 0.262 to 0.056). While SARIMA occasionally performs competitively, especially in locations with more linear wind patterns, it generally lags behind CNN. LSTM and BLSTM models, although promising, show consistently higher error rates compared to CNN and sometimes even compared to SARIMA, indicating a need for further optimization.

These findings suggest that CNN's superior accuracy can significantly enhance the reliability of wind speed forecasting, with potential practical benefits for optimizing wind energy generation and improving grid stability in regions like Saudi Arabia, where wind resources are increasingly important. Future work could explore hybrid architectures combining CNN with recurrent layers or attention mechanisms to capture both local and long-term temporal patterns more effectively. Additionally, evaluating model robustness across seasonal variations and extreme weather events would further strengthen real-world applicability.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest with any parties regarding the data published in this research manuscript. Should any conflict of interest be identified in the future, the authors take full responsibility for it.

ACKNOWLEDGMENT

Special thanks to the faculty and colleagues of Intelligent Control 556 and EE 467 (KFUPM): Power Systems Planning and Operations for their invaluable guidance and insights, which were instrumental in shaping this work.

REFERENCES

- [1] D. M. Q. Nelson, A. C. M. Pereira and R. A. de Oliveira, "Stock market's price movement prediction with LSTM neural networks," 2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Anchorage, AK, USA, 2017.
- [2] E. Rokhsatyazdi, S. Rahnamayan, H. Amirinia and S. Ahmed, "Optimizing LSTM Based Network For Forecasting Stock Market," 2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Glasgow, UK, 2020, pp. 1-7,
- [3] T. Fischer and C. Krauss, "Deep learning with long short-term memory networks for financial market predictions," *European Journal of Operational Research*, vol. 270, no. 2, pp. 654-669, Oct. 2018. [Online].
- [4] D. Chen, J. Zhang and S. Jiang, "Forecasting the Short-Term Metro Ridership With Seasonal and Trend Decomposition Using Loess and LSTM Neural Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91181-91187, 2020.
- [5] W. Deng et al., "Medium-Term Rolling Load Forecasting Based on Seasonal Decomposition and Long Short-Term Memory Neural Network," 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), Shanghai, China, 2022, pp. 1627-1632.
- [6] R. Peña-Gallardo and A. Medina-Rios, "A comparison of deep learning methods for wind speed forecasting," 2020 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, 2020, pp. 1-6.
- [7] T. Zhou, W. Zhang and S. Ma, "Tidal Forecasting Based on ARIMA-LSTM Neural Network," 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Kunming, China, 2021.
- [8] C. Wang et al., "A Multi-dimensional Copula Wind Speed Correction Method for Ultra-Short-Term Wind Power Prediction," 2022 4th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), Chengdu, China, 2022, pp. 219-225.
- [9] P. Arora, H. Kumar and B. K. Panigrahi, "A Comparative Study for Short Term Wind Speed Forecasting using Statistical and Machine Learning Approaches," 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, 2018, pp. 200-205.
- [10] H. Abdellatif, A. E. Hussein, A. T. Alawami and M. A. Abido, "Real-time Electricity Market Price Prediction using Improved ARIMA Model," 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, Spain, 2023, pp. 1-6.
- [11] S. A. Dwivedi, A. Attry, D. Parekh and K. Singla, "Analysis and forecasting of Time-Series data using S-ARIMA, CNN and LSTM," 2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS), Greater Noida, India, 2021, pp. 131-136.
- [12] H. -J. Kang, C. Kallas, M. -H. Park and J. Kim, "A Scalable Learning Model for Multi-seasonal Time Series Forecasting," 2021 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC), Jeju, Korea (South), 2021.
- [13] P. Arora, H. Kumar and B. K. Panigrahi, "A Comparative Study for Short Term Wind Speed Forecasting using Statistical and Machine Learning Approaches," 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, 2018, pp. 200-205.
- [14] Y. Fu, W. Hu, M. Tang, R. Yu and B. Liu, "Multi-step Ahead Wind Power Forecasting Based on Recurrent Neural Networks," 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Kota Kinabalu, Malaysia, 2018, pp. 217-222.
- [15] Z. Liu, X. Wang, J. Xing, M. Ren and X. Xu, "Short-Term Power Load Forecasting Based on IWOA-Attention-BiLSTM," 2022 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing and Intelligent Systems (CCIS), Chengdu, China.
- [16] W. Shi, "Enhanced GJO-BiLSTM Wind Power Prediction Model," 2023 IEEE PELS Students and Young Professionals Symposium (SYPS), Shanghai, China, 2023, pp. 1-5.
- [17] S. Chan, I. Oktavianti and V. Puspita, "A Deep Learning CNN and AI-Tuned SVM for Electricity Consumption Forecasting: Multivariate Time Series Data," 2019 IEEE 10th Annual IEMCON, Vancouver, BC, Canada, 2019, pp. 0488-0494.
- [18] <https://datasource.kapsarc.org/explore/dataset/saudi-hourly-weather-data/information/>
- [19] Hidayat, I., Tolago, A. I., Dako, R. D. R., & Ilham, J. (2023). Analisis Data Eksploratif Capaian Indikator Kinerja Utama 3 Fakultas Teknik. *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 5(2), 185-191.
- [20] Shang, Z., Wen, Q., Chen, Y., Zhou, B., & Xu, M. (2022). Wind Speed Forecasting Using Attention-Based Causal Convolutional Network and Wind Energy Conversion. *Energies*, 15(8), 2881. <https://doi.org/10.3390/en15082881>

ISSN 2830-523X



Alamat Redaksi & Tata Usaha

Gedung Dharma Penelitian
Jurusan Teknik Elektro - Fakultas Teknik
Kampus Terpadu Universitas Bangka Belitung
Balunijuk, Kab. Bangka, Prov. Kep. Bangka Belitung
Laman : <http://journal.ubb.ac.id/index.php/electron>
e-mail : jurnalelectron@gmail.com