

Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan

Vol. 6 No. 1 - April 2025

Design of a Monitoring and Nutrient Management System Based on Internet of Things (IoT) for Hydroponic Method Using MIT App Inventor

Shandy Gilang Priawardana, Atikah Surriani

Rancang Bangun Conveyor Trainer Module Berbasis PLC Omron CJ2M CPU-31 dan Human Machine Interface (HMI) Omron NB7W

Muhammad Rakha Firdaus, Imroatul Hudati

Prototipe Sistem Scheduling dan Monitoring Pemberian Pakan Kucing Otomatis Berbasis Internet of Things

Nia Saputri Utami, Khansa Salsabila Suhaimi, Alya Berliani, Adrian Adli Ramadhan, Brandon SH Silitonga

Navigasi Quadcopter Berbasis ArUco Marker dengan OpenCV

Taufiqul Hakim, Ardy Seto Priambodo

Integrated PV-Farm and Micro Hydro as Distributed Generation in The Distribution Network

Muhaimin Muchti Prabowo, Pandhu Ardi Prasetyo, Lesnanto Multa Putranto, Sarjiya Sarjiya, Jaya Kurniawan

Design of Direct Digital Synthesizer (DDS) Based on Field Programmable Gate Array (FPGA) for Electrical Impedance Tomography (EIT)

Isnan Nur Rifai, Wijayanti Dwi Astuti, Jans Hendry, Ardhi Wicaksono Santoso, Alief Purnomo Aji

Analisis Penerapan Tapis LC pada Inverter Static Tiga Tingkat di PT INKA Madiun

Lailiyana Tri Rahmawati, Hidayat Nur Isnianto, Achmad Sugandi

Department of Electrical Engineering and Informatics
Vocational College, Universitas Gadjah Mada
Jl. Yacaranda, Sekip Unit IV, Yogyakarta, 55281

Editorial Team

Editor-in-Chief

Unan Yusmaniar Oktiawati, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Associate Editor

Ahmad Adhiim Muthahhari, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Candra Febri Nugraha, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Editorial Board

Atikah Surriani, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Esa Prakasa, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia

Fahmizal, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Isnan Nur Rifai, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Kiagus Aufa Ibrahim, Chiba University, Japan

Prima Asmara Sejati, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Rizki Firmansyah Setya Budi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Indonesia

Suhono, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Vooi Voon Yap, Aberystwyth University, United Kingdom

Zainal Arif Burhanuddin, Universiti Teknologi Petronas, Malaysia

Copy Editor

Fitri Puspitasari, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Tika Erna Putri, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Assistant Editor

Andi Fariel, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Yessi Idianingrum Tanu Wijaya, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Foreword

Praise be to God, the Almighty, for His blessings and grace, which have enabled the publication of Vol. 6 No. 1, April 2025 of this journal. This edition is compiled with the aim of enriching knowledge in the field of applied electrical engineering, focusing on electricity, instrumentation, and applied electronics.

We sincerely hope that this journal will make a meaningful contribution to the advancement of these fields. Constructive feedback and suggestions are highly encouraged to help us improve future editions.

In closing, we would like to extend our heartfelt thanks to everyone who contributed to the successful publication of this issue.

Editor-in-Chief

Unan Yusmaniar Oktawati, S.T., M.Sc., Ph.D.

Table of Contents

1. Design of a Monitoring and Nutrient Management System Based on Internet of Things (IoT) for Hydroponic Method Using MIT App Inventor Shandy Gilang Priawardana, Atikah Surriani	1 - 8
2. Rancang Bangun Conveyor Trainer Module Berbasis PLC Omron CJ2M CPU-31 dan Human Machine Interface (HMI) Omron NB7W Muhammad Rakha Firdaus, Imroatul Hudati	9 - 21
3. Prototipe Sistem Scheduling dan Monitoring Pemberian Pakan Kucing Otomatis Berbasis Internet of Things Nia Saputri Utami, Khansa Salsabila Suhaimi, Alya Berliani, Adrian Adli Ramadhan, Brandon SH Silitonga	22 - 27
4. Navigasi Quadcopter Berbasis ArUco Marker dengan OpenCV Taufiqul Hakim, Ardy Seto Priambodo	28 - 39
5. Integrated PV-Farm and Micro Hydro as Distributed Generation in The Distribution Network Muhaimin Muchti Prabowo, Pandhu Ardi Prasetyo, Lesnanto Multa Putranto, Sarjiya Sarjiya, Jaya Kurniawan	40 - 47
6. RDesign of Direct Digital Synthesizer (DDS) Based on Field Programmable Gate Array (FPGA) for Electrical Impedance Tomography (EIT) Isnan Nur Rifai, Wijayanti Dwi Astuti, Jans Hendry, Ardhi Wicaksono Santoso, Alief Purnomo Aji	48 - 54
7. Analisis Penerapan Tapis LC pada Inverter Static Tiga Tingkat di PT INKA Madiun Lailiyana Tri Rahmawati, Hidayat Nur Isnianto, Achmad Sugandi	55 - 63

Design of a Monitoring and Nutrient Management System Based on Internet of Things (IoT) for Hydroponic Method Using MIT App Inventor

Shandy Gilang Priawardana^{1*}, Atikah Surriani¹

¹ Department of Electrical and Informatics Engineering, Universitas Gadjah Mada;
atikah.surriani.sie13@mail.ugm.ac.id

*Correspondence: shandygilang@mail.ugm.ac.id

Intisari – Hidroponik adalah metode pertanian yang menggunakan media tanam dengan kandungan nutrisi yang rendah. Dalam hidroponik, diperlukan nutrisi. Nutrisi ini sangat penting untuk pertumbuhan tanaman pada hidroponik. Jika tanaman hidroponik kekurangan nutrisi maka tanaman hidroponik akan mati. Kebutuhan air pada Tandon hidroponik juga perlu diperhatikan, sehingga air pada hidroponik tetap stabil. Faktor lain seperti suhu air juga penting pada metode hidroponik. Suhu yang tinggi dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan dapat mempengaruhi tanaman untuk tumbuh lebih cepat (bolting). Oleh karena itu, dibuatlah perancangan monitoring suhu, serta manajemen nutrisi dan ketinggian air pada tandon hidroponik berbasis Internet of Things (IoT). Alat ini dapat mengelola sistem hidroponik secara efisien, serta mudah dioperasikan karena berbasis IoT, sehingga petani dapat melakukan monitoring dan manajemen hanya lewat Smartphone pada aplikasi MIT App Inventor. Metode penelitian ini ada beberapa tahapan penting, yaitu analisis kebutuhan alat dan bahan, perancangan alat, pengujian fungsional alat, dan analisis data. Pada sistem akan mengukur nilai nutrisi, suhu air, dan ketinggian air. Dari data tersebut maka akan diolah dan diatur untuk monitoring dan manajemen pada hidroponik. Hasil proyek akhir ini adalah rata - rata error sensor TDS (Total Dissolved Solids) yaitu 3,9232 %, rata - rata error sensor ultrasonik HC-SR04 yaitu 3,53 %, rata - rata error sensor suhu DS18B20 yaitu 2,7513 %. Alat ini mampu untuk melakukan monitoring dan manajemen nutrisi pada hidroponik yang terintegrasi IoT dengan baik, karena error yang dihasilkan di bawah 5 % dan sistem berjalan dengan baik.

Kata kunci – Hidroponik, internet of things, MIT App Inventor, monitoring dan manajemen

Abstract – Hydroponics is an agricultural method that uses a growing medium with low nutrient content. In hydroponics, nutrients are required. These nutrients are very important for plant growth in hydroponics. If hydroponic plants lack nutrients, they will die. Water needs in hydroponic reservoirs also need to be considered, so that the water in hydroponics remains stable. Other factors such as water temperature are also important in the hydroponic method. High temperatures can inhibit plant growth and can cause plants to grow faster (bolting). Therefore, the design of temperature monitoring, as well as nutrient management and water level in hydroponic reservoirs based on the Internet of Things (IoT) is made. This tool can manage hydroponic systems efficiently and is easy to operate because it is IoT-based, so that farmers can monitor and manage only via Smartphone on the MIT App Inventor application. This research method has several important stages, namely analysis of the needs of tools and materials, tool design, functional testing of tools, and data analysis. The system will measure the value of nutrients, water temperature, and water level. From this data, it will be processed and arranged for monitoring and management in hydroponic. The results of this final project are the average TDS sensor error of 3.9232%, the average HC-SR04 ultrasonic sensor error of 3.53%, the average DS18B20 temperature sensor error of 2.7513%. This tool can perform monitoring and nutrient management in IoT-integrated hydroponics well, because the resulting error is below 5% and the system runs well.

Keywords – Hydroponic, internet of things, MIT App Inventor, monitoring and management

I. INTRODUCTION

Hydroponics is an agricultural method that uses a growing medium with low nutrients [1]. If hydroponic plants experience nutrient deficiencies, they may fail to thrive or even die [2]. Not only nutrition, the water needs in the reservoir in hydroponics also needs to be considered. This can keep the water demand in hydroponic reservoirs stable [3]. Therefore, an effective management system is required to ensure a balanced supply of nutrients and stable water levels in hydroponic reservoirs.

Additionally, other factors, such as water temperature, must also be considered in hydroponic cultivation. Ideally, you should maintain the hydroponic nutrient solution's temperature above 18–20 °Celsius and below 28 °Celsius. High temperatures can inhibit plant growth and may cause plants to bolt, leading to rapid flowering. Rapid chemical reactions at elevated temperatures can disrupt physiological

processes in plants, resulting in poor growth and a bitter taste in vegetables such as lettuce [4].

The implementation of monitoring and nutrient management systems in hydroponics has been the subject of extensive research. Researchers [2] used TDS meter sensors and an ESP8266 module to control and monitor the water nutrient conditions in hydroponic plants. This study resulted in a successful nutrient monitoring and control system, accessible through a Things Board website. Additionally, studies [5-7] focused on the control and monitoring of nutrients in hydroponics, making it easier for hydroponic farmers to manage their systems. The Blynk application received the results from the TDS meter sensor, which measures the part per million (ppm) value. Meanwhile, research [8] involved controlling nutrient levels, monitoring pH, and observing temperature around the hydroponic setup using the Blynk application.

Research [9] developed a pH control and monitoring system for water using an ESP32 microcontroller and the Blynk application. Research [10] focused on pH and water temperature monitoring in aquaponics with IoT. This system uses Firebase and the MIT App Inventor application as a sensor data viewer. Research [11] used a DHT11 sensor, a 4502C pH sensor, and an HC-SR04 ultrasonic sensor to keep an eye on and change the nutrients and temperature in NFT (Nutrient Film Technique) hydroponic systems. Research [12] focused on monitoring nutrient and water availability in hydroponic reservoirs with the MIT App Inventor application. Research [13] developed an IoT-based water monitoring automation system for hydroponics, which allows hydroponic plant owners to automatically regulate and control pH, nutrients, temperature, and water levels.

Therefore, this article will discuss the design of temperature monitoring as well as nutrient management and water levels in hydroponic reservoirs based on the Internet of Things (IoT). The Internet of Things (IoT) is a technology that allows objects around us to be connected to the internet [14]. In making this tool using the MIT App Inventor application. Mit App Inventor is a platform that makes it easy for users to create simple applications without using many programming languages [15]. Using the MIT App Inventor as an interface allows for interactive data visualization, making it easier for users to operate and control the hydroponic system remotely.

This research is different from previous studies. This research uses the ESP32 microcontroller, which offers better capabilities, and more input/output options compared to other microcontrollers. This research uses a combination of several sensors. The sensors used include a TDS meter to measure nutrient levels, an HC-SR04 ultrasonic sensor to measure water levels, and a DS18B20 temperature sensor to measure the water temperature. This study uses the MIT App Inventor application that researchers have created with a simple display. The goal is to make it easier for farmers to operate the system. The appearance of this application displays TDS values, water levels, and water temperature and is equipped with features to control nutrient and water levels by setting upper and lower limit values. System testing was carried out for three days to evaluate the performance and reliability of the system in real conditions. The results of the study showed that the system successfully reads sensor data in real time and displayed it on the MIT App Inventor application.

II. METHODOLOGY

The design of the final project tool, titled "Design of a Monitoring and Nutrient Management System Based on Internet of Things (IoT) for Hydroponic Method Using MIT App Inventor," is detailed in this chapter. The discussion covers the creation of block diagram designs, hardware design, software design, mechanical box design, hydroponic installation design, and data analysis methods. The following sections provide a detailed explanation of the stages involved in developing this tool:

A. Block Diagram Design

This block diagram design illustrates the workflow of the Internet of Things (IoT)-based monitoring and nutrient management system for hydroponic methods. It explains the working principle of the tool. In the block diagram, there is an explanation of the components used. The diagram also details the system's input, process, and output stages. The system input serves as data input for the microcontroller, the process stage handles data processing, and the system output presents the results of this data processing. This device has several inputs. The TDS sensor checks the amount of nutrients (variable x) in parts per million (ppm), the HC-SR04 ultrasonic sensor checks the level of water (variable y) in centimeters (cm), and the DS18B20 temperature sensor checks the temperature (variable z) in degrees Celsius ($^{\circ}\text{C}$) in the hydroponic reservoir. Figure 1 shows the block diagram design.

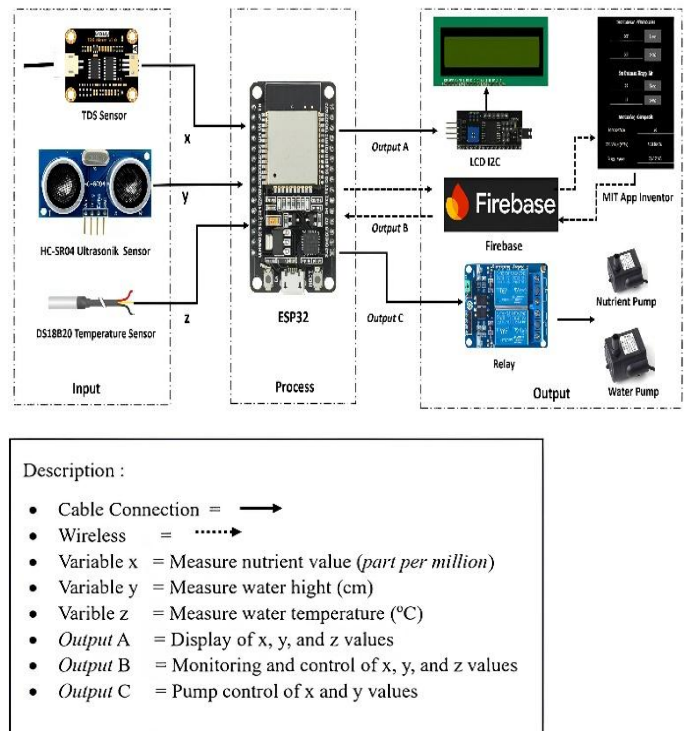


Figure 1. Block diagram design

B. Hardware Design

This section describes the electronic system design of the IoT-based hydroponic nutrient monitoring and management system. The design details the wiring of the sensors for the ESP32 microcontroller and specifies the pins used. This system connects its sensors to the ESP32 on a PCB board. The system output consists of two pumps, which function to add nutrients and water to the reservoir. A 16x2 LCD screen displays the sensor readings. Additionally, Firebase and the MIT App Inventor application display data from the ESP32 readings online. This hardware design integrates all components onto a PCB board to strengthen their connections and prevent disconnection. Figure 2 shows the system circuit.

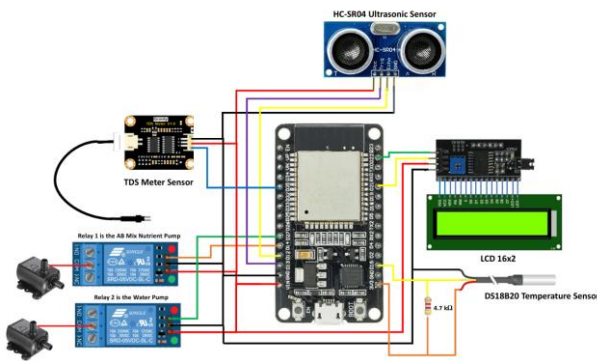


Figure 2. System circuit

C. Software Design

This section describes the software design of the IoT-based monitoring and nutrient management system for hydroponic methods. The discussion focuses on developing programs in the Arduino IDE. The Arduino IDE program gathers data from the TDS sensor, HC-SR04 ultrasonic sensor, and DS18B20 temperature sensor. The results of sensor readings are sent online to Firebase (as a database) and then forwarded to the MIT App Inventor application for display. Figure 3 shows the system flowchart.

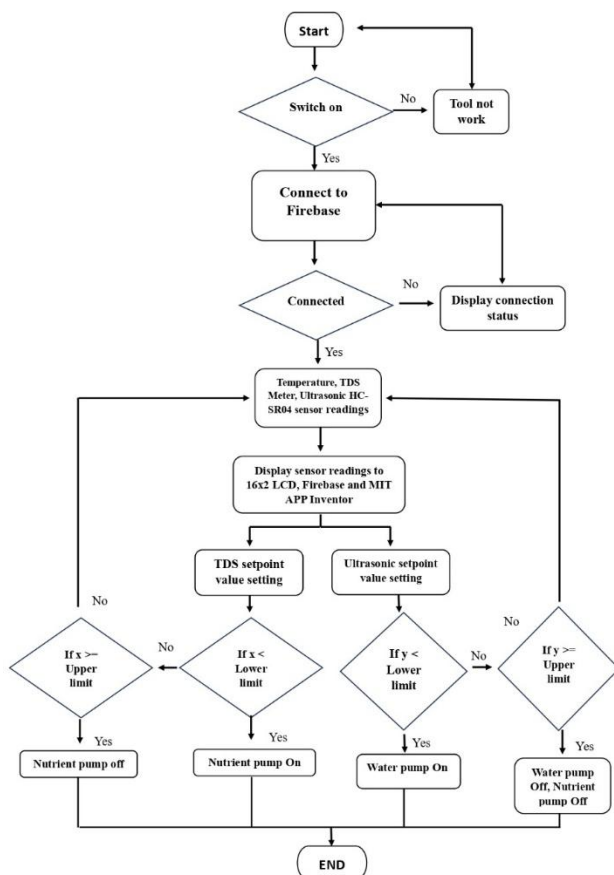


Figure 3. System flowchart

1) *Realtime Database*: At this stage, a Realtime Database is created on Firebase. The purpose of creating this Realtime Database is to facilitate data transfer between the ESP32 microcontroller and MIT App Inventor application. The ESP32 microcontroller collects sensor reading data and sends it to the Realtime Database. The MIT App Inventor application can then read the sensor data stored in the Realtime Database. When there is a change in the sensor data, the MIT App Inventor application automatically receives an update. The sensor data read includes the variables x, y, and z. Figure 4 shows the Realtime Database.

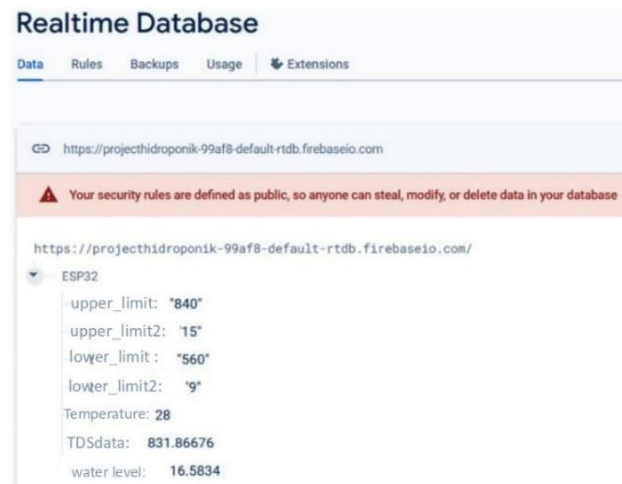


Figure 4. Realtime Database

2) *MIT App Inventor*: The MIT App Inventor application functions as a viewer for the variable, reading values of x, y, and z. This application also includes a feature for setting the lower and upper limits. This feature serves to control the nutrient pump and water pump. Users can use this application remotely to monitor and manage hydroponic systems.

MIT App Inventor features a Designer page that facilitates the design of applications intended for smartphone screens. This Designer page includes a palette, a viewer, component properties, and media features. We can create all these features according to our wishes. Figure 5 shows the Designer page.

In the MIT App Inventor, the Blocks page serves to execute commands or programs within the application. The Blocks page contains the block code. The block code operates similarly to a command within the application. Drag and drop the block code to arrange it according to your desired logic. Figure 6 shows the Blocks Page.

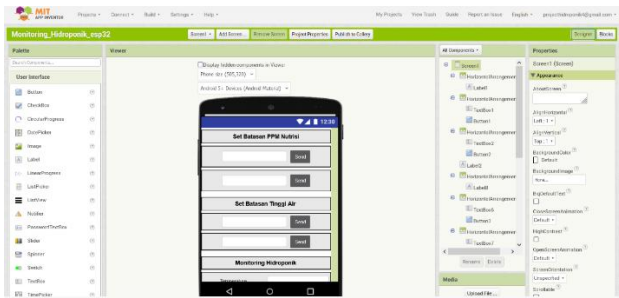


Figure 5. Designer page



Figure 6. Blocks page

D. Mechanical Box Design

This section describes the design of the mechanical box on the IoT-based hydroponic monitoring and management system. The box protects the electronic circuit from water and solid objects. The box is 14 cm long, 10 cm wide, and 5 cm high. This mechanical box is made of plastic that has been made to adjust the size of the LCD and input/output cable holes. The design of this mechanical box using SolidWorks software. Figure 7 shows the mechanical box design.

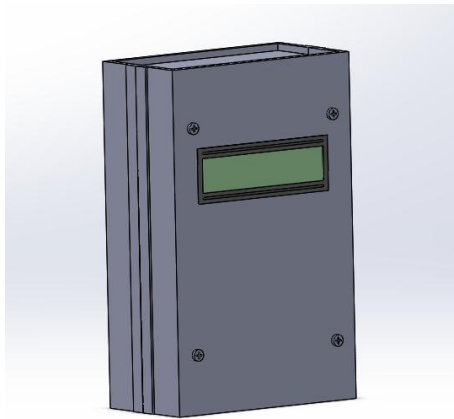


Figure 7. Mechanical box design

E. Hydroponic Installation Design

The hydroponics design uses the NFT (Nutrient Film Technique) method. This method is a way of flowing hydroponic nutrients continuously to the roots of the plants. The initial stage of designing this hydroponic installation involves using SolidWorks software. The design process aims to identify the necessary components, understand the

installation form, and streamline the manufacturing process. Figure 8 shows the hydroponic installation design.

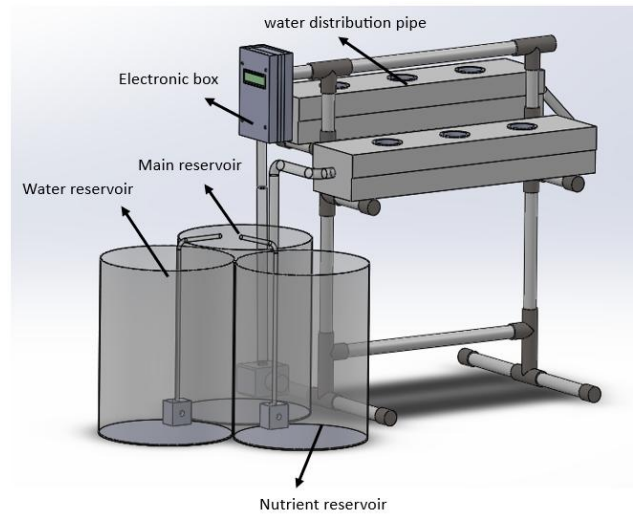


Figure 8. Hydroponic installation design

F. Data Analysis Method

1) *Calibrate The TDS Meter Sensor*: TDS sensors need to be calibrated. The purpose of calibration is that the TDS meter sensor has the same value as the standard TDS meter. The calibrated sensor is a TDS V1.0 sensor made by DF Robot. To calibrate the TDS meter sensor by inserting it into the calibration solution with a value of 500 ppm. To calibrate the value of the TDS meter sensor with a calibration solution, follow these steps: Open the serial monitor on the Arduino IDE and type "enter." Then, enter the command "cal:500" (where 500 is the calibration solution value of 500 ppm). Next, type "exit" to save the reading data in the ESP32 EEPROM. After the calibration is complete, the TDS meter sensor value will be the same as the calibration solution and standard TDS meter. Figure 9 shows the TDS meter sensor calibration result.



Figure 9. TDS meter sensor calibration result

2) *Calculation of The Error Value:* The aim of testing the IoT-based hydroponic nutrient monitoring and management system is to ensure its functionality as expected and analyze any errors that arise. Use the manufacturer's sensor or a standard tool to compare the sensor error reading. The TDS meter sensor reading should be as accurate as the standard TDS meter. Equation (1) contains the sensor error reading formula.

$$\%error = \left| \frac{\text{sensor value} - \text{standard value}}{\text{standard value}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

The read value is the sensor value, which is the measured value of x, y, and z variables. The manufacturer's TDS meter sensor yields the standard value. Divide the result of subtraction between the read value and the standard value by the standard value. Next, multiply the result by 100%.

After reading the error on each sensor, then the average error is read. The average error sensor is an important parameter in assessing the performance and reliability of the sensors used. The average error is calculated by taking several sensor readings, calculating the error for each reading, and taking the average by dividing each sensor error and then dividing by the total number of readings. The formula for calculating the average error is in (2).

$$\overline{\%error} = \frac{\sum_{i=1}^n \%error_i}{n} \quad (2)$$

III. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the results of hardware design, software design, hydroponic design, and testing of the tool will be shown. The data obtained will be a reference for whether this tool can function properly. Testing is done with the functional testing method of the tool. This test aims to verify the readiness and expected functionality of the manufactured tools in a hydroponic installation. With the functional testing of this tool, conclusions can be drawn about the working system of the tool that has been made.

A. Hardware Design Result

This section describes the hardware design, namely the manufacture of electronic circuits. This electronic circuit is placed in a box to protect it from water splashes during the hydroponic system operation. This electronic circuit consists of several important components, namely the TDS meter sensor, DS18B20 temperature sensor, HC-SR04 ultrasonic sensor, ESP32, MH Mini 360, relay, and 16x2 LCD with I2C. The ESP32, serving as system control, connects all these components. Figure 10 shows the hardware design result.

B. Hydroponic Installation Design Result

The design of this hydroponic installation employs two PVC gutter pipes arranged in stages, each measuring 53 cm in length, 12 cm in width, and 8 cm in height, with a spacing of

15 cm between each hole. This hydroponic installation uses 1/2-size PVC pipes. The pipe functions to channel nutrients to the plants. The design of this hydroponic installation utilizes the NFT system, a hydroponic method that continuously distributes hydroponic nutrients to the plant roots. The NFT system distributes water from the main reservoir to the plant roots via a pump before returning it to the main reservoir. Inside the main reservoir, there are several sensors that will measure the x, y, and z variables. The main reservoir will carry out the nutrient management process, ensuring that the water pump and nutrients operate in accordance with the specified setpoints. This NFT system ensures proper plant nutrition. Figure 11 shows the hydroponic installation result.

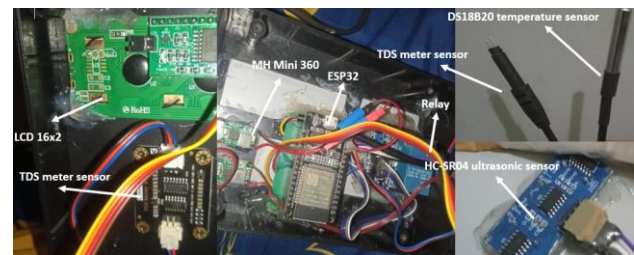


Figure 10. Hardware design result

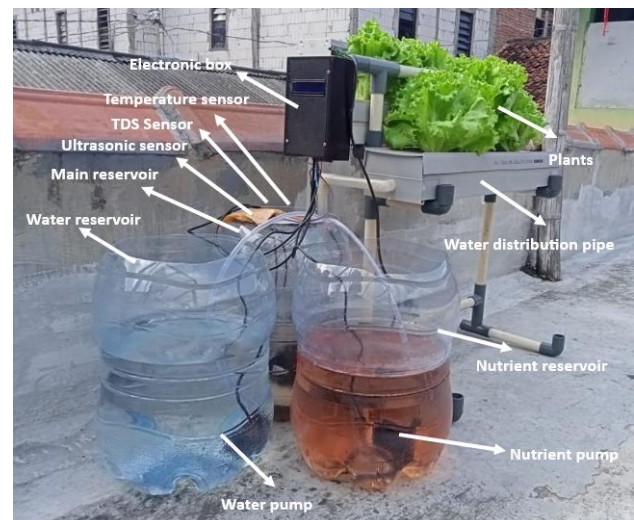


Figure 11. Hydroponic installation result

C. Testing Firebase View

Testing the ESP32 display with Firebase to confirm its online connection and readiness for use in the MIT App Inventor application. The ESP32 communicates with Firebase through Wi-Fi media by inputting the SSID address and Wi-Fi password. To be able to connect with Firebase, a Web API Key and Firebase URL are required, which are obtained from Firebase and then written in the Arduino IDE. When ESP32 and Firebase are connected, Firebase displays the real-time results of each sensor reading. Figure 12 shows the results of sensor readings in Firebase.

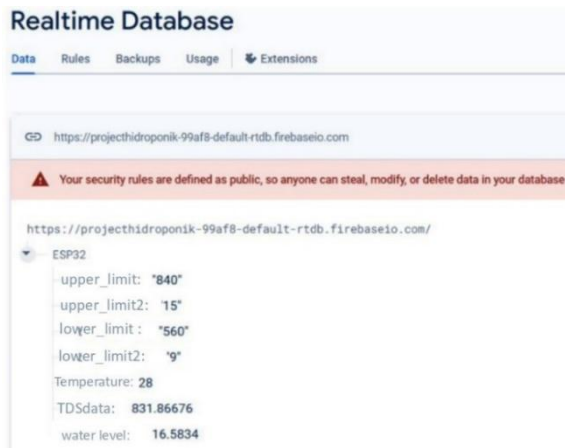


Figure 12. Sensor readings in firebase

D. Testing MIT App Inventor View

Firestore displays the reading results of each sensor. The next step is to create the MIT App Inventor application. After creating the MIT App Inventor app, proceed to connect it to Firestore. Firestore and MIT APP Inventor can be connected by writing a Firestore token, Firestore URL, and Project bucket contained in Firestore. Once connected, the Firestore displays real-time sensor reading results. Figure 13 shows the results of sensor readings in MIT App Inventor.

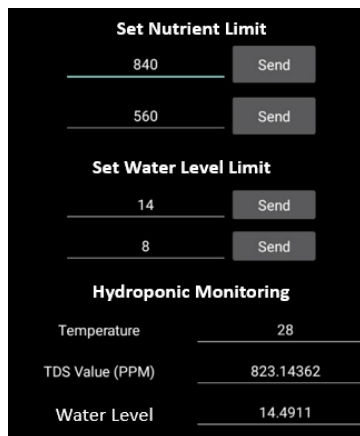


Figure 13. Sensor readings in MIT App Inventor

E. TDS Sensor Reading Test

In this section, the reading of the x variable by the TDS meter sensor is tested. The sensor used is the TDS meter sensor version 1.0, made by DF Robot. This sensor has a measurement vulnerability of 0-1,000 ppm. TDS meter sensor testing is done by reading variable x by adding AB Mix nutrients to the hydroponic water reservoir. Table 1 shows the results of the TDS sensor readings.

After getting the results in Table 1, a discussion is carried out regarding the reading of the x value by the TDS meter sensor. The table reads the value of the x variable from 380 ppm to 954 ppm. After the experiment is carried out, the results of the TDS meter sensor reading are obtained, and the

percentage error is calculated with equation (1). The best reading results are obtained in the 7th test with an error of 0.8871%, and the worst reading is in the 5th reading with an error of 5.7096%. The results of equation (2) were obtained with an average error of 3.9232%.

Table 1. TDS sensor reading results

No	TDS Meter Sensor (ppm)	Standard TDS Meter (ppm)	%Error
1	380	393	3.3078
2	420	438	4.1095
3	507	482	5.1867
4	553	584	5.3082
5	648	613	5.7096
6	711	689	3.1930
7	782	789	0.8871
8	840	816	2.9411
9	932	906	3.3259
10	954	1007	5.2631
Average error			3.9232

F. DS18B20 Temperature Sensor Reading Test

In this section, we tested the reading of the z variable with the DS18B20 temperature sensor. This sensor has a measurement range of -55°C to 125°C. This sensor has waterproof properties and is placed in a hydroponic water reservoir. The reading of the z variable is done by comparing the value of the DS18B20 temperature sensor with the manufacturer's TDS meter, which already has a temperature reading on the device. The researcher conducted six readings of the z variable over a period of three days, specifically from Sunday, 9 June 2024, to Tuesday, 11 June 2024. The researcher conducted the experiment at 07:00 (UTC+7) and 16:00 (UTC+7). Table 2 shows the results of the DS18B20 temperature sensor readings.

After the experiment was carried out, the results of the DS18B20 temperature sensor reading were obtained. To calculate the percentage error, use equation (1), where the smallest error reading is obtained at 0.0000% and the largest error is at a value of 4.7619%. The results of equation (2) were obtained with an average error of 2.7513%. This DS1820 temperature sensor has the advantage that the probe has waterproof properties.

Table 2. DS18B20 temperature sensor reading results

No	Date	Time (UTC + 7)	DS18B20 Sensor (°C)	Standard TDS Meter (°C)	%Error
1	June 9, 2024	07:00	28	27	3.7073
		16:00	31	31.5	1.5873
2	June 10, 2024	07:00	30	31	3.2258
		16:00	31	31	0.0000
3	June 11, 2024	07:00	30	31.5	4.7619
		16:00	32	31	3.2258
Average error					2.7513

G. HC-SR04 Ultrasonic Sensor Reading Test

In this section, the reading of the y variable in the hydroponic reservoir is tested with the HCSR-04 ultrasonic sensor. This sensor has a measurement range of 2 cm to 400 cm. The reading of the y variable is done by comparing the HC-SR04 ultrasonic sensor value with a ruler to get accuracy according to the standard. The researcher took readings of the y variable 10 times with different heights. Table 3 shows the results of the HC-SR04 ultrasonic sensor readings.

Table 3. HC-SR04 ultrasonic sensor reading results.

No	HC-SR04 Ultrasonic Sensor	Ruler (cm)	%Error
1	9.89	10.5	5.80
2	11.49	12	4.25
3	13.44	14	4
4	14.15	15	5.66
5	15.55	16	2.81
6	17.30	18	3.88
7	19.05	19.5	2.30
8	21.42	22	2.63
9	22.05	22.5	2
10	24.01	24.5	2
Average error			3.53

After the experiment was carried out. The results of the variable y value read on the ultrasonic sensor were obtained from a value of 9.89 cm to 24.01 cm. To calculate the percentage error. use equation (1). Then the reading results obtained the smallest error of 2% and the largest of 5.80%. The results of equation (2) were obtained with an average error of 3.53%.

H. Water Pump Test

In this section, the performance of the water pump is tested. which functions to keep the variable y stable in the hydroponic water reservoir. The pump used is a 9 VDC pump. The researcher tested the performance of water pumps five times with different setpoints. At the setpoints there is a lower water limit and upper limit, when the y variable is less than the lower limit. Then the pump will work and stop when it is at the upper limit. Table 4 shows the results of testing the water pump in a hydroponic reservoir.

Table 4. Water pump testing results

No	Setpoints (cm)	HC-SR04 Ultrasonic Sensor (cm)	Ruler (cm)	%Error
1	9-11	11	11.5	4.3478
2	12-16	16.5	17	2.9411
3	17-20	20.5	21	2.3809
4	21-24	25	24	4.1666
5	25-27	27	28	3.5714
Average error				3.4815

Based on the results of Table 4, the performance of the water pump has been tested. To get the error results can be calculated by equation (1). Based on these trials, the error results were obtained. namely the smallest error occurred in

the 3rd experiment with an error value of 2.3809%, and the largest error occurred in the first experiment with an error value of 4.3478%. The results of equation (2) were obtained with an average error of 3.4815%.

I. Nutrient Pump Test

This section tests the performance of the nutrients pump. The nutrient pump will work when the x variable contained in the hydroponic reservoir is less than the minimum limit and will stop when it has reached the maximum limit. The nutrient pump uses a 9 VDC pump. The researcher tested the performance of the nutrient pump five times with different setpoints. Table 5 shows the result of testing the performance of the nutrient pump on the hydroponic reservoir.

Table 5. Nutrient pump testing results

No	Initial Conditions (ppm)	Setpoints (ppm)	TDS Meter Sensor (ppm)	Standard TDS Meter (ppm)	%Error
1	211	300-400	414	420	1.4285
2	414	450-550	553	515	7.3786
3	553	650-750	770	727	5.9147
4	770	800-900	900	866	3.9260
5	900	950-1,000	971	924	5.0865
Average error					4.7468

In Table 5, the performance of the nutrients pump has been tested. This pump work system has setpoints with lower and upper limits. Based on the results of Table 5, the test was carried out five times with a setpoint value of 300 – 1,000 ppm. Based on these results, the error is obtained in accordance with the calculation of equation (1). The smallest error occurred in the first test with an error value of 1.4285%. and the largest error value occurred in the 2nd measurement with an error value of 7.3786%. The results of equation (2) were obtained with an average error of 4.7468%.

J. System Test

In this section, the process of testing the hydroponic nutrient monitoring and management system is carried out. The purpose of this test is to ensure that the TDS sensor DS18B20 temperature, and HC-SR04 ultrasonic are functioning properly, as well as testing the durability and stability of the system. This testing process is for 3 days. The experiment was conducted at 07:00 (UTC+7) and 16:00 (UTC+7). In this process, the researcher gave the x variable setpoint. namely with a lower limit of 560 ppm and an upper limit of 840 ppm, as well as the y variable setpoint with a lower limit of 8 cm and an upper limit of 14 cm. Table 6 shows the result of system testing.

In Table 6, system testing has been carried out. It was found that the x variable was in stable condition. still between 560 - 840 ppm. and the y variable was stable with a height of around 14 cm. Variable z readings tend to change depending on environmental temperature conditions. The data that has been read on the sensor is successfully displayed on the MIT App Inventor application with the same value.

Table 6. System testing results

Testing		Sensors		MIT App Inventor	
Date	Time UTC + 7	TDS (ppm)	HC-SR04 (cm)	Temp (°C)	Temp (°C)
1 st day	07:00	873	15.54	29	873
	16:00	830	16.24	29	830
2 nd day	07:00	823	14.83	28	823
	16:00	746	14.47	27	746
3 rd day	07:00	877	14.13	27	877
	16:00	860	13.79	28	860

IV. CONCLUSION

This monitoring and nutrient management system for hydroponics can make it easier for farmers to monitor and manage their nutrients. They only monitor their plants through the MIT App Inventor application on a smartphone. In this way, it can make it easier for hydroponic farmers to carry out agricultural activities. With this tool, it can improve the quantity of hydroponic agricultural products. The results of this system are an average TDS sensor error of 3.9232%, an average HC-SR04 ultrasonic sensor error of 3.53%, and an average DS18B20 temperature sensor error of 2.7513%.

REFERENCES

- [1] E. D. Purbajanti, W. Slamet, and F. Kusmiyati. Hydroponic: Bertanam Tanpa Tanah. Semarang: EF Press Digimedia. 2017.
- [2] M. Marisa, C. Carudin, and R. Ramdani, "Otomatisasi Sistem Pengendalian dan Pemantauan Kadar Nutrisi Air menggunakan Teknologi NodeMCU ESP8266 pada Tanaman Hidroponik." *J. Teknol. Terpadu*, vol. 7, no. 2, pp. 127–134. 2021. doi: 10.54914/jtt.v7i2.430.
- [3] N. Evaliana, D. J. Maulana, M. Putri, F. I. Pasaribu, and P. Harahap, "Perancangan Sistem Kontrol Ketinggian Air Pada Media Tanam Hidroponik." *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 36–41. 2023. doi: 10.30596/rele.v6i1.15457.
- [4] Susilawati. *Dasar - Dasar Bertanam Secara Hidroponik*. Edisi Pertama. Palembang: Unsri Press. 2019.
- [5] R. E. Putri, H. M. Harahap, and I. Putri, "Pengembangan Sistem Kontrol Nutrisi Budidaya Hidroponik Berbasis IoT (Internet of Things) Sawi Samhong (Brassicasis L.)." *J. Keteknikan Pertan. Trop. dan Biosist.*, vol. 11, no. 2, pp. 197–206. 2023. doi: 10.21776/ub.jkptb.2023.011.02.09.
- [6] A. N. Sholihah, T. Tohir, and A. R. Al Tahtawi, "Kendali TDS nutrisi hidroponik deep flow technique berbasis IoT menggunakan fuzzy logic." *JITEL (Jurnal Ilm. Telekomun. Elektron. dan List. Tenaga)*, vol. 1, no. 2, pp. 89–98. 2021. doi: 10.35313/jitel.v1.i2.2021.89-98.
- [7] M. M. F. Fatori, "Aplikasi IoT Pada Sistem Kontrol dan Monitoring Tanaman Hidroponik." *J. Pendidik. Sains dan Komput.*, vol. 2, no. 02, pp. 350–356. 2022. doi: 10.47709/jpsk.v2i02.1746.
- [8] A. Prasetyo, A. B. Nugroho, and H. Setyawan, "Perancangan Sistem Monitoring Pada Hidroponik Selada (Lactuca Sativa L.) Dengan Metode NFT Berbasis Internet of Things (IoT)." *Technol. dan Sist. Komput.*, vol. 5, no. Juli, pp. 15–25. 2022. doi: 10.32528/elkom.v4i2.6102
- [9] D. Gude, W. Musa, and S. Abdussamad, "Rancang Bangun Sistem Pengontrol dan Monitoring pH Air Hidroponik Menggunakan Aplikasi Blynk." *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 57–62. 2024. doi: 10.37905/jjee.v6i1.20827.
- [10] D. Megawati, K. Masykuroh, and D. Kurnianto, "Rancang Bangun Sistem Monitoring PH dan Suhu Air pada Akuaponik Berbasis Internet of Thing (IoT) Design of Monitoring System for PH and Water Temperature in Aquaponic Base on Internet of Thing (IoT)." *Telka*, vol. 6, no. 2, pp. 124–137. 2020.
- [11] I. K. T. A. Putra, I. P. S. Wirawan, and I. A. G. B. Madrini, "Rancang Bangun Sistem Pemantauan Pengendalian Suhu dan Nutrisi Berbasis IoT Pada Hidroponik NFT Tanaman Pakcoy." *J. Beta (Biosistem Dan Tek. Pertan.)*, vol. 10, no. April, pp. 162–174. 2022.
- [12] R. Rouhillah, I. Salfikar, and J. Hamar, "Rancang Bangun Alat Monitoring Nutrisi Kebun Hidroponik." *J-Innovation*, vol. 10, no. 2, pp. 44–49. 2021. doi: 10.55600/jipa.v10i2.114.
- [13] N. Heriyani and S. Ernawati, "Pemanfaatan Teknologi Iot Berbasis Mobile Dalam Upaya Monitoring Kualitas Air Pada Tanaman Hidroponik." *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 8, no. 3, pp. 2807–2813. 2024. doi: 10.36040/jati.v8i3.9273.
- [14] F. Susanto, N. K. Prasiani, and P. Darmawan, "Implementasi Internet of Things Dalam Kehidupan Sehari-Hari." *J. Imagine*, vol. 2, no. 1, pp. 35–40. 2022. doi: 10.35886/imagine.v2i1.329.
- [15] E. Fameska, R. Okra, S. Supriadi, and H. Antoni Musril, "Perancangan Media Pembelajaran Berbasis Game Edukasi Menggunakan Mit App Inventor Pada Pelajaran Pai." *JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform.)*, vol. 7, no. 1, pp. 657–664. 2023. doi: 10.36040/jati.v7i1.6179.

Rancang Bangun *Conveyor Trainer Module* Berbasis PLC Omron CJ2M CPU-31 dan *Human Machine Interface* (HMI) Omron NB7W

Muhammad Rakha Firdaus¹, Imroatul Hudati^{1*}

¹Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; rakhafrds30@mail.ugm.ac.id

*Korespondensi: imroatul.hudati@mail.ugm.ac.id

Abstract – *Modern industries face challenges in the need for automation devices that can efficiently integrate various industrial components. Many existing devices still have limitations, such as a lack of integration, minimal component variation, and suboptimal use of the Human Machine Interface (HMI). Therefore, this research aims to design and test a Conveyor Trainer Module integrated with a Programmable Logic Controller (PLC) and HMI, in order to create a more efficient and easy-to-understand automation system. This research is experimental, focusing on the design and testing of industrial automation systems. The results showed that the designed Conveyor Trainer Module successfully integrated the PLC, PLC I/O components, pneumatic systems, and conveyors to simulate sorting machines with an 85% sorting success rate. This device effectively separates metal and non-metal objects and successfully utilizes the HMI as a monitoring and control tool, making it easier for users to understand and operate the system. In conclusion, the designed device has high potential in overcoming the limitations of previous automation devices and provides an integrated and efficient solution for industrial process simulation. Pneumatic systems were chosen because they offer speed, reliability, and energy efficiency in industrial automation applications.*

Keywords – *Automation, PLC, HMI, pneumatic, conveyor*

Intisari – Industri modern menghadapi tantangan dalam kebutuhan akan perangkat otomasi yang mampu mengintegrasikan berbagai komponen industri secara efisien. Banyak perangkat yang ada saat ini masih memiliki keterbatasan, seperti kurangnya integrasi, variasi komponen yang minim, dan belum optimalnya penggunaan *Human Machine Interface* (HMI). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji perangkat *Conveyor Trainer Module* yang terintegrasi dengan *Programmable Logic Controller* (PLC) dan HMI, guna menciptakan sistem otomasi yang lebih efisien dan mudah dipahami. Jenis penelitian ini adalah eksperimental dengan desain perancangan dan pengujian sistem otomasi industri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perangkat *Conveyor Trainer Module* yang dirancang berhasil mengintegrasikan PLC, komponen I/O PLC, sistem pneumatik, dan konveyor untuk melakukan simulasi *sorting machine* dengan keberhasilan penyortiran sebesar 85%. Perangkat ini mampu memisahkan benda logam dan non-logam secara efektif, serta berhasil memanfaatkan HMI sebagai alat pemantauan dan pengendalian, sehingga pengguna lebih mudah memahami dan mengoperasikan sistem tersebut. Perangkat yang dirancang memiliki potensi tinggi dalam mengatasi keterbatasan perangkat otomasi sebelumnya dan memberikan solusi yang terintegrasi serta efisien untuk simulasi proses industri. Sistem pneumatik dipilih karena menawarkan kecepatan, keandalan, dan efisiensi energi dalam aplikasi otomasi industri.

Kata kunci – *Otomasi, PLC, HMI, pneumatik, konveyor*

I. PENDAHULUAN

Otomasi industri merupakan salah satu teknologi yang paling diminati dalam industri modern karena kemampuannya dalam mengendalikan proses industri untuk menjamin kualitas dari produk yang dihasilkan, mengoptimalkan waktu produksi, dan menekan biaya untuk sumber daya manusia dan mengutamakan kenyamanan dan kecepatan [1]. Otomasi industri melibatkan pengaplikasian elektronik, komputer, mekanik untuk mengendalikan proses industri [2]. Salah satu sistem otomasi industri yang sering digunakan di industri yaitu *programmable logic controller* (PLC). PLC memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan sistem kontrol yang lainnya seperti bahasa pemrograman yang mudah dipahami, fleksibilitas PLC yang dapat menyesuaikan sistem kontrolnya, dan kecepatan operasi yang lebih tinggi.

Proses untuk memahami otomasi industri membutuhkan suatu perangkat untuk menggambarkan proses industri tersebut dalam satu sistem yang bekerja secara berkesinambungan yang mudah dipahami dan mudah digunakan bagi penggunaannya. Hal ini bertujuan agar memberikan gambaran menyeluruh tentang bagaimana sistem bekerja dan interaksi antar komponen dalam sistem tersebut. Pada saat ini sudah banyak perangkat atau media yang telah dibuat untuk membantu dalam mempelajari proses otomasi industri, namun masih kekurangan seperti kurangnya integrasi antar sistem sehingga sulit untuk menghubungkan antara sistem satu dengan sistem yang lainnya, kurangnya variasi *input* dan *output*, dan belum dilengkapi dengan visualisasi sistem menggunakan *human machine interface* (HMI).

Penelitian ini berfokus pada pengembangan *Trainer Module* dengan mengacu pada hasil penelitian sebelumnya untuk meningkatkan fitur dan fungsionalitasnya. Penelitian yang dilakukan oleh Khuluqi (2021) menghasilkan *Trainer-Kit PLC Omron CP1E N-20-DR*, namun perangkat tersebut masih memiliki keterbatasan dalam hal fitur yang disediakan [3]. Selanjutnya, penelitian oleh Imaduddin (2016) berhasil merancang sebuah *trainer* penyortir berbasis PLC Omron CP1E, tetapi belum memberikan perhatian yang memadai terhadap aspek integrasi HMI [4]. Berbeda dari penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini secara khusus menekankan integrasi penuh HMI guna mendukung proses pemantauan dan pengendalian. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Setianto (2018) berfokus pada komunikasi dalam sistem monitoring *sorting line* [5], sementara penelitian ini menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif dengan mengintegrasikan sistem konveyor, pneumatik, dan PLC dalam satu kesatuan sistem yang terintegrasi. Dengan demikian, perangkat yang dikembangkan dalam penelitian ini memberikan solusi inovatif yang mampu menyelesaikan keterbatasan pada penelitian sebelumnya dan memberikan perangkat otomasi yang lebih terintegrasi dan mudah dipahami.

Berdasarkan permasalahan dan hasil penelitian sebelumnya, penulis merancang sebuah perangkat yang diberi nama *Conveyor Trainer Module*. *Trainer* ini merupakan perangkat yang dirancang untuk menggambarkan proses yang ada di dalam sebuah industri, dimana cara kerjanya dikontrol secara otomatis menggunakan *Trainer PLC Omron CJ2M* dengan memiliki variasi komponen *input* dan *output* yang beragam yang dapat memudahkan pengguna dalam mempelajari elemen-elemen yang sering digunakan dalam proses otomasi industri.

Selain itu perangkat ini dirancang untuk dapat mengintegrasikan antar sistem yang dapat melakukan simulasi sistem *sorting machine* dengan mengintegrasikan sistem konveyor sistem pneumatik, dan komponen I/O PLC. Integrasi antara PLC dengan HMI memungkinkan perangkat untuk melakukan pemantauan, pengendalian, dan pengonfigurasi pada sistem *trainer* dengan lebih mudah dan efisien. Oleh karena itu, dengan dibuatnya *Conveyor Trainer Module* ini diharapkan dapat membantu pengguna untuk memahami proses otomasi industri dengan lebih mudah.

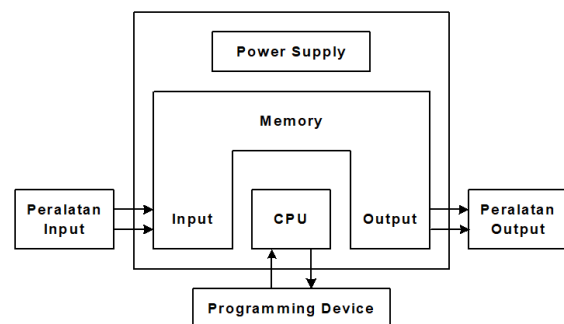
II. DASAR TEORI

A. Programmable Logic Controller (PLC)

Programmable logic controller (PLC) merupakan peranti elektronik yang digunakan untuk mengganti rangkaian *relay*

yang digunakan pada sistem kontrol konvensional. PLC bekerja dengan cara mengamati masukan melalui sensor-sensor terkait dan kemudian melakukan proses dan menentukan aksi apa yang harus dilakukan pada instrumen keluaran yang berhubungan dengan status suatu besaran yang diamati [6].

PLC memiliki bagian komponen fungsional dasar yaitu : *power supply*, *processor unit*, *memory*, modul I/O, dan *programming device* [7]. Berikut merupakan struktur komponen dari PLC yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur komponen PLC

1) *Power Supply*: *Power supply* digunakan untuk menyuplai daya ke dalam sistem PLC itu sendiri maupun ke komponen *input* dan *output* yang digunakan pada PLC. PLC membutuhkan sumber tegangan sebesar 220 Volt AC atau 24 Volt DC.

2) *Processor Unit*: *Processor unit* atau sering disebut dengan *central processing unit* (CPU) merupakan sebuah unit yang berisi mikroprosesor yang menerjemahkan sinyal *input* dan melakukan tindakan kontrol berdasarkan program yang telah disimpan di dalam memori dan mengomunikasikan sinyal tindakan kepada keluaran PLC.

3) *Memory*: *Memory* merupakan tempat penyimpanan data sementara dari hasil terjemahan *ladder diagram* yang dibuat..

4) Modul I/O: Modul I/O merupakan bagian pada PLC yang menerima dan memberikan informasi dari atau ke perangkat eksternal.

5) *Programming Device*: *Programming device* merupakan perangkat yang digunakan untuk memasukkan program yang telah dibuat ke dalam memori dari prosesor.

Dalam penelitian ini digunakan PLC Omron CJ2M CPU-31 yang terdiri dari 15 *input* dan 15 *output* dan memiliki sumber catu daya berupa tegangan DC 24 Volt. Berikut merupakan Unit PLC Omron CJ2M dengan menggunakan model CJ2M-CPU 31 yang dapat dilihat pada Gambar 2.

Untuk menghubungkan piranti eksternal dengan PLC terdapat dua konsep dasar yaitu *sourcing* dan *sinking*. *Sourcing* berkaitan dengan pemberian sejumlah arus ke

piranti eksternal dan berkaitan dengan terminal “+” atau Vcc. Sedangkan *sinking* berkaitan dengan penarikan sejumlah arus dari perangkat eksternal dan berkaitan dengan terminal “-” atau Ground (GND) [8]



Gambar 2. PLC Omron CJ2M-CPU31

B. Human Machine Interface (HMI)

Human machine interface (HMI) adalah sebuah perangkat antarmuka berbasis komputer yang berfungsi sebagai penghubung antara manusia dan mesin atau peralatan yang dikendalikan [5]. Sistem HMI bekerja secara *online* dan *real time* sehingga HMI dapat membantu memahami, mengontrol, dan mengawasi proses yang sedang berlangsung pada mesin [9].

Pada penelitian ini digunakan HMI Omron NB7W-TW01B. HMI jenis ini merupakan HMI layar sentuh yang memiliki performa tinggi. Pembuatan program pada tampilan HMI ini dibuat berdasarkan pengalamatan program yang terdapat pada PLC. Berikut merupakan tampilan Omron NB7W-TW01B yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. HMI Omron NB7W

C. Sensor Proximity

Sensor *proximity* merupakan salah satu jenis sensor yang berfungsi untuk mendeteksi ada atau tidaknya suatu objek sensor. Sensor *proximity* dapat dibedakan berdasarkan dari prinsip kerjanya [10] :

1) *Sensor Proximity Induktif*: Sensor *proximity* induktif merupakan jenis sensor *proximity* yang digunakan untuk mendeteksi adanya benda logam baik logam jenis *Ferrous* maupun *non-ferrous* pada jarak tertentu tanpa harus

menyentuh benda tersebut. Sensor ini memanfaatkan medan elektromagnetik untuk mendeteksi benda logam Berikut merupakan gambar dari sensor *proximity* induktif yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Sensor *proximity* induktif

Sensor *proximity* induktif bekerja berdasarkan prinsip induktansi listrik, di mana arus yang berfluktuasi menginduksi gaya gerak listrik (EMF) pada objek target. Ketika arus mengalir, maka osilator pada sensor akan menciptakan medan magnet yang simetris dan berosilasi yang memancar dari inti ferit dan susunan kumparan di bagian wajah sensor.

Arus eddy yang mengalir menghadapi resistansi listrik saat arus tersebut mencoba untuk bersirkulasi. Hal ini akan menghasilkan sejumlah kecil kehilangan daya dalam bentuk panas. Kehilangan daya ini tidak sepenuhnya digantikan oleh sumber energi internal sensor, sehingga amplitudo osilasi menurun. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jika objek konduktif mendekati sensor, maka arus eddy akan meningkat. Dengan demikian, beban pada osilator akan meningkat yang mengakibatkan berkurangnya amplitudo medan.

Ketika osilasi berkurang sampai pada titik di mana rangkaian *Schmitt Trigger* mendeteksi adanya perubahan yang nilainya telah di bawah ambang batas yang telah ditentukan sebelumnya. Ambang batas ini adalah tingkat di mana keberadaan target logam dipastikan. Setelah target terdeteksi oleh *Schmitt Trigger*, keluaran sensor diaktifkan. Jika objek logam atau target bergerak menjauh dari sensor kedekatan, maka amplitudo osilator akan meningkat.

Berikut di bawah ini merupakan spesifikasi sensor *proximity* induktif yang digunakan pada *trainer* yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi sensor *proximity* induktif

Model	PR-18-8-DP
Type	Inductive
Wire Type	3 Wire
Power	12-24 VDC
Sensing Distance	8mm
Control Output	PNP Normally Open

2) Sensor *Proximity* Kapasitif: Sensor *proximity* kapasitif merupakan jenis sensor *proximity* yang dapat mendeteksi bahan-bahan dengan dielektrik rendah seperti kaca atau plastik maupun bahan-bahan dielektrik tinggi seperti cairan. Sensor ini memiliki prinsip kerja medan elektrostatis untuk mendeteksi perubahan kapasitansi antara sensor dan objek penginderaan. Berikut merupakan gambar dari sensor *proximity* kapasitif yang dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Sensor *proximity* kapasitif

Sensor *proximity* kapasitif mendeteksi perubahan kapasitansi antara sensor dan objek penginderaan. Sensor ini beroperasi dengan mencatat perubahan kapasitansi yang dibaca oleh sensor. Jumlah kapasitansi bervariasi tergantung pada ukuran dan jarak objek penginderaan.

Sensor *proximity* kapasitif terdiri dari kapasitor yang disusun dari dua buah plat elektroda logam yang disusun secara paralel. Elektroda ini ditempatkan pada rangkaian isolasi yang memiliki frekuensi yang tinggi. Salah satu pelat merupakan objek yang dideteksi, sedangkan yang lainnya terdapat pada permukaan sensor.

Prinsip kerja dari sensor *proximity* kapasitif yaitu dengan mengukur perubahan kapasitansi pada elektroda yang disebabkan oleh objek yang melewati medan yang dihasilkan. Elektroda ini secara berkala diisi dan dikosongkan. Jika objek konduktif melewati medan listrik, kapasitansi sistem meningkat. Dengan mengukur aliran muatan yang kembali dari elektroda, perubahan relatif dalam kapasitansi dapat dideteksi. Dengan asumsi objek konduktif memiliki ukuran yang seragam, perubahan ini kira-kira sebanding dengan jarak antara elektroda dan objek, mengikuti hukum kapasitansi antara pelat paralel.

Ketika nilai kapasitansi berubah, maka rangkaian osilator mulai berosilasi dan mengubah status keluaran sensor ketika mencapai amplitudo tertentu. Ketika objek bergerak menjauh dari sensor, amplitudo osilator menurun, mengembalikan sensor ke keadaan awalnya. Rangkaian *Schmitt Trigger* akan membaca amplitudo osilator dan ketika mencapai tingkat tertentu, status keluaran sensor berubah. Saat target bergerak menjauh dari sensor, amplitudo osilator menurun, mengembalikan keluaran sensor ke keadaan awalnya.

Berikut di bawah ini merupakan spesifikasi sensor *proximity* kapasitif yang digunakan pada *trainer* yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi sensor *proximity* kapasitif

Model	CR-18-8-DN
Type	Capacitive
Wire Type	3 Wire
Power	12-24 VDC
Sensing Distance	8mm
Control Output	NPN Normally Open

3) Sensor *Proximity* Fotoelektrik: Sensor *proximity* fotoelektrik merupakan sensor *proximity* yang memanfaatkan elemen yang peka dengan cahaya untuk mendeteksi sebuah objek. Sensor *proximity* fotoelektrik tersusun dari penerima (*receiver*) dan sumber cahaya (*emitter*). Pada penelitian ini digunakan sensor fotoelektrik dengan jenis *direct reflection* yang bekerja dengan memancarkan dan menerima sinyal inframerah pada satu perangkat sensor. Berikut merupakan gambar dari sensor *proximity* fotoelektrik yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Sensor *proximity* fotoelektrik [10]

Sensor fotoelektrik bekerja dengan cara memancarkan sinyal inframerah dari *emitter* yang dipancarkan secara langsung ke target. Kemudian cahaya tersebut akan terpantul ke segala arah (*diffuse*). Selanjutnya, ketika *receiver* menerima cahaya yang dipantulkan oleh target, maka *output* pada *receiver* akan berubah. Demikian pula dengan sebaliknya, jika tidak ada cahaya yang mengenai *receiver* maka *output* pada *receiver* akan kembali ke keadaan awal.

Berikut di bawah ini merupakan spesifikasi sensor *proximity* fotoelektrik yang digunakan pada *trainer* yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi sensor *proximity* fotoelektrik

Model	E3F-DS30P1
Type	Infrared
Wire Type	3 Wire
Power	6-36 VDC
Sensing Distance	7 – 30 cm
Control Output	PNP Normally Open

D. Sistem Pneumatik

Pneumatik didefinisikan sebagai salah satu cabang ilmu yang mempelajari fenomena udara yang dimampatkan sehingga akan menimbulkan tekanan yang dapat menghasilkan gaya sebagai penyebab gerak pada aktuator[4]. Sistem pneumatik terdiri dari beberapa elemen yaitu catu daya, elemen masukan/kontrol, elemen kerja, dan komponen pendukung.

1) *Kompresor*: Kompresor merupakan sebuah sistem yang bisa menghasilkan udara bertekanan dengan mengambil udara dari atmosfer. Udara dari atmosfer akan dimampatkan lalu disimpan pada sebuah tangki penampungan hingga menghasilkan tekanan tertentu [11].

2) *Air Service Unit*: *Air service unit* merupakan unit pengolahan udara bertekanan, udara yang akan masuk dalam sistem pneumatik harus memenuhi persyaratan seperti tidak mengandung debu, kadar air rendah, mengandung pelumas [12].

3) *Directional Way Valve*: *Directional Way Valve* atau katup kontrol arah merupakan katup pneumatik yang tersusun dari beberapa lubang udara yang berfungsi untuk menghalang, melewatkan, dan mengarahkan aliran udara bertekanan.

4) *Silinder Kerja Ganda*: Silinder kerja ganda memiliki konstruksi yang sama dengan silinder kerja tunggal, namun tidak memiliki pegas pengembali. Untuk mengembalikan posisi silinder pada silinder jenis ini yaitu dengan mengeluarkan udara dari sisi berlawanan melalui saluran pembuangan.

5) *Reed switch*: *Reed switch* merupakan salah satu jenis *proximity switch* yang dioperasikan secara magnetik. *Reed switch* tersusun dari dua kontak buluh (*reed*) dalam sebuah tabung gelas yang diisi dengan gas [13]. *Reed switch* memanfaatkan fluks magnetik dari magnet untuk menarik kedua buluh untuk menyambungkan arus listrik.

E. Motor DC

Motor arus searah atau biasa disebut motor DC (*direct current*) merupakan peralatan yang menerapkan prinsip elektromagnetik dasar dengan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik [14].

Prinsip kerja dari motor DC ialah memanfaatkan medan magnet yaitu ketika sumber listrik searah masuk pada komutator maka kumparan rotor akan bersifat magnet di mana sisi atas rotor ber kutub positif dan sisi lainnya akan ber kutub negatif. Dengan menggunakan prinsip sifat dari magnet, maka kutub yang sama akan melakukan tolak-menolak, sehingga akan menyebabkan terjadinya gaya tolak antara sisi atas rotor dan magnet stator, maka pada bagian kumparan akan timbul

gaya dorong ke atas sehingga sisi atas rotor (kutub N) akan bergerak menuju sisi kutub S stator. Hal ini akan terjadi secara berulang berkelanjutan dikarenakan perubahan polaritas pada ujung-ujung kumparan stator setelah mengalami perubahan posisi.

Pada perancangan *trainer* digunakan Motor DC 37GB31ZY yang digunakan untuk menggerakkan konveyor. Berikut merupakan Gambar Motor DC yang ditunjukkan pada Gambar 7. Berikut merupakan spesifikasi dari motor DC 37GB31ZY yang ditunjukkan pada Tabel 4



Gambar 7. Motor DC 37GB31ZY

Tabel 4. Spesifikasi Motor DC 37GB31ZY

Parameter	Nilai
Tipe Manufaktur	37GB31ZY
Rasio <i>Gearbox</i>	1:56
Kecepatan (N)	140 rpm
Rate Voltage	24 VDC
Power No Load	<= 280 mA
Power Consumption Standard Load	<= 1 A
RPM With Load	110 rpm
Torsi	11.2kgcm
Power Consumption Max Load	<= 4.4A

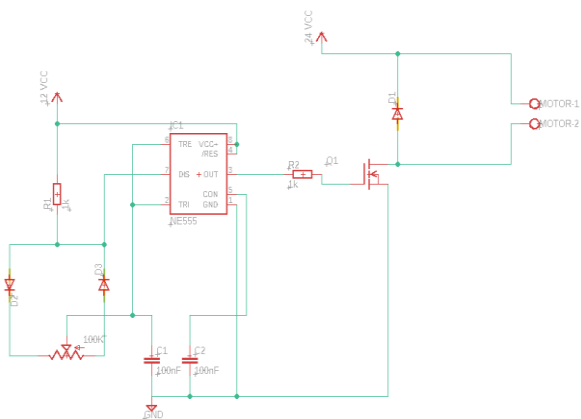
F. Multivibrator Astabil

Multivibrator astabil merupakan jenis multivibrator memiliki dua keadaan namun tidak stabil pada salah satu keadaan. Multivibrator akan berada pada salah satu keadaannya selama sesaat dan kemudian berpindah ke keadaan yang lain. Perpindahan bolak-balik ini akan berlangsung secara terus menerus sehingga menghasilkan suatu gelombang segi empat dengan waktu bangkit yang sangat cepat [15]. Berikut merupakan rangkaian multivibrator astabil yang ditunjukkan pada Gambar 8.

Rangkaian ini memanfaatkan IC NE555 sebagai komponen utama untuk mengendalikan motor. IC NE555 merupakan komponen yang digunakan untuk menghasilkan sinyal pulsa (PWM) yang dapat digunakan untuk mengontrol kecepatan motor.

Dalam rangkaian ini, NE555 bekerja dalam mode astabil yang memungkinkan sinyal PWM dihasilkan secara terus-menerus. Metode astabil dapat membuat motor DC

mendapatkan tegangan yang stabil dengan frekuensi kerja yang sama namun dengan *duty cycle* yang berbeda [16].



Gambar 8. Rangkaian multivibrator stabil

Pada rangkaian ini, potensiometer digunakan untuk mengatur frekuensi dan *duty cycle* sinyal PWM yang dihasilkan oleh NE555. Dengan mengubah posisi potensiometer, dapat diatur resistansi total yang mengendalikan waktu pengisian dan pengosongan kapasitor (C1). Perubahan resistansi ini berdampak langsung pada frekuensi dan lebar pulsa (*duty cycle*) sinyal PWM. Semakin tinggi *duty cycle*, semakin lama motor akan mendapatkan arus sehingga berputar lebih cepat. Sebaliknya, *duty cycle* yang rendah akan membuat motor berputar lebih lambat.

Sinyal PWM dari pin *output* (pin 3) NE555 digunakan untuk mengendalikan MOSFET yang terhubung dengan motor. Transistor ini berfungsi sebagai saklar elektronik yang memungkinkan arus mengalir ke motor ketika sinyal PWM bernilai tinggi (*HIGH*) dan memutus arus ketika sinyal PWM bernilai rendah (*LOW*). Dengan cara ini, kecepatan motor dapat dikendalikan secara efektif oleh sinyal PWM dari IC NE555.

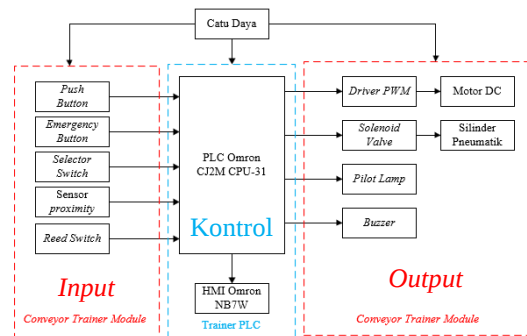
Selain itu, diode (D1 dan D2) dalam rangkaian ini berperan sebagai komponen pelindung. Ketika motor berhenti atau terjadi perubahan arah putaran, motor menghasilkan tegangan balik yang dapat merusak komponen elektronik lainnya. Diode ini berfungsi sebagai *flyback* diode untuk mencegah arus balik tersebut, sehingga melindungi rangkaian dari kerusakan.

III. METODOLOGI

A. Perancangan Hardware

Perancangan perangkat keras (*hardware*) terdiri dari pembuatan sistem elektronis, sistem mekanis, dan sistem pneumatik.

1) *Perancangan Sistem Elektronis*: Pada perancangan sistem elektronis dibuat berdasarkan blok diagram sistem. Diagram ini digunakan untuk merepresentasikan secara grafis bagaimana berbagai komponen dalam sistem tersebut berinteraksi satu sama lain. Berikut merupakan blok diagram sistem Conveyor Trainer Module yang ditunjukkan pada Gambar 9.



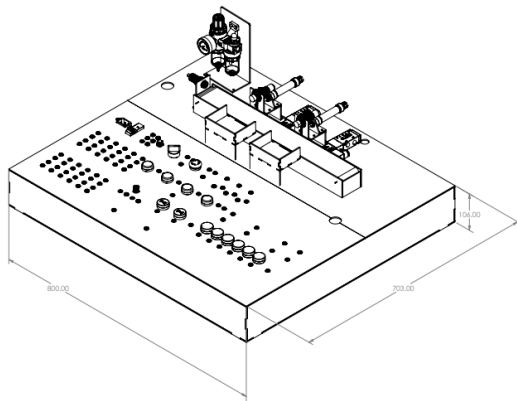
Gambar 9. Blok diagram sistem

Berdasarkan blok diagram pada Gambar 9, sistem yang dirancang terdiri dari dua bagian utama, yaitu Sistem Trainer PLC CJ2M CPU-31 dan Sistem Conveyor Trainer Module. Sistem Trainer PLC ditandai dengan garis berwarna biru dan berfungsi sebagai perangkat kontrol yang mengendalikan seluruh operasi sistem. Sistem ini terdiri dari komponen-komponen utama seperti PLC Omron CJ2M CPU-31, catu daya (*power supply*), dan *human machine interface* (HMI), yang berperan dalam mengontrol dan memantau proses kerja keseluruhan sistem.

Sementara itu, Sistem Conveyor Trainer Module ditandai dengan garis berwarna merah dan mencakup berbagai komponen *input* dan *output* yang digunakan untuk simulasi proses otomasi industri. Komponen *input* pada sistem ini meliputi *push button*, *selector switch*, *emergency button*, *sensor proximity*, dan *reed switch*, yang bertugas untuk memberikan sinyal atau perintah ke PLC. Selain itu, komponen *output* dari sistem ini terdiri dari *driver PWM*, *motor DC*, *solenoid valve*, *pilot lamp*, dan *buzzer*, yang berfungsi untuk menjalankan proses pengendalian dan simulasi *sorting machine*.

Hubungan antara komponen *input* dan *output* pada Sistem Conveyor Trainer Module dengan Sistem Trainer PLC dilakukan melalui koneksi pada bagian *input* dan *output* dari PLC. Melalui koneksi ini, Sistem Trainer PLC dapat menerima sinyal dari komponen *input* untuk melakukan pengolahan data dan memberikan perintah kepada komponen *output*, sehingga memungkinkan pengendalian proses kerja conveyor secara otomatis dan efisien. Dengan demikian, interaksi antara kedua sistem ini menciptakan integrasi yang utuh untuk menyimulasikan proses otomasi industri secara efektif.

2) *Perancangan Sistem Mekanis*: Berikut merupakan rancangan desain mekanis dari *Conveyor Trainer Module* yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Perancangan desain sistem mekanis

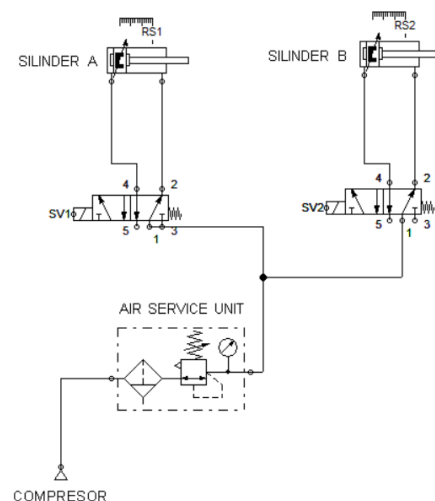
3) *Perancangan Sistem Pneumatik*: Perancangan sistem pneumatik dilakukan dengan membuat skema rangkaian pneumatik menggunakan software Fluidsim-P. Skema rangkaian ini dibuat untuk menyimulasikan sistem pneumatik tersebut sebelum diaplikasikan pada sistem secara langsung. Berikut merupakan rancangan skema rangkaian pneumatik yang ditunjukkan pada Gambar 11.

Sistem mekanis *Conveyor Trainer Module* dirancang menggunakan bahan akrilik dengan ketebalan 3 mm dengan ukuran 80 x 70 x 10 cm. Pada perancangan desain konveyor dirancang dengan menggunakan bahan akrilik dengan ketebalan 3 mm dengan ukuran panjang 6 cm, lebar 50 cm, dan tinggi 5 cm.

Sistem *Conveyor Trainer Module* dirancang memiliki sistem pneumatik yang digunakan untuk melakukan penyortiran benda sesuai jenisnya. Sistem pneumatik pada *trainer* ini terdiri dari kompresor, *air service unit*, dua buah *solenoid valve 5/2 single coil*, dua buah silinder kerja ganda yang memiliki *reed switch* pada masing-masing silinder

B. Perancangan Flowchart Sistem

Flowchart merupakan diagram yang menjelaskan prinsip kerja dari suatu sistem dari awal sistem tersebut beroperasi, urutan cara kerja sistem, sampai dengan akhir kerja dari sistem. Berikut merupakan penjelasan dari diagram alir *trainer* dengan mode otomatis dalam menjalankan sistem *shorting machine*

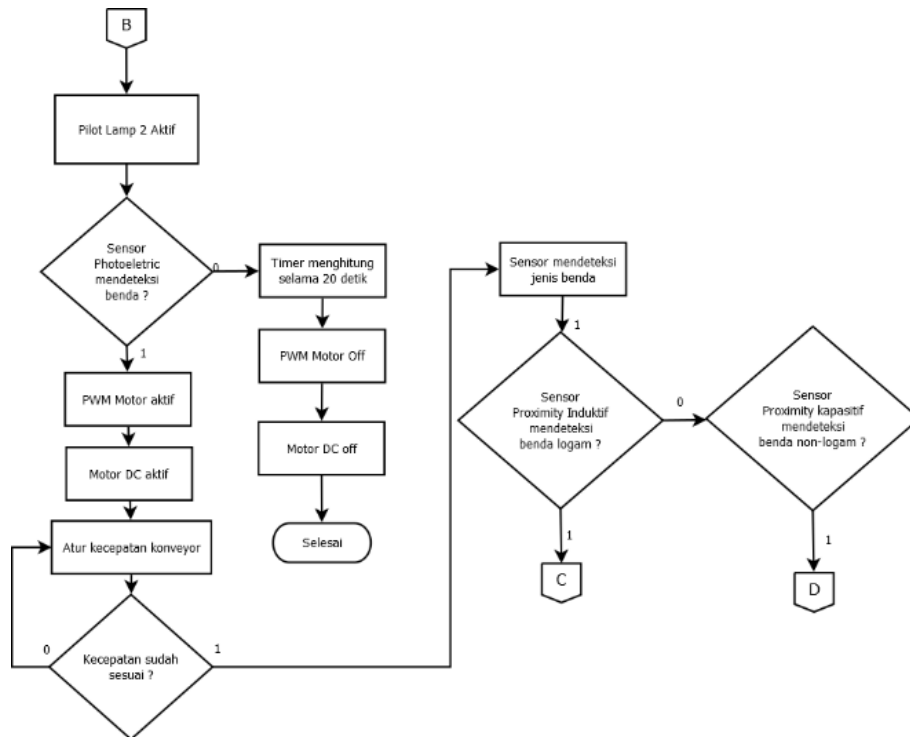
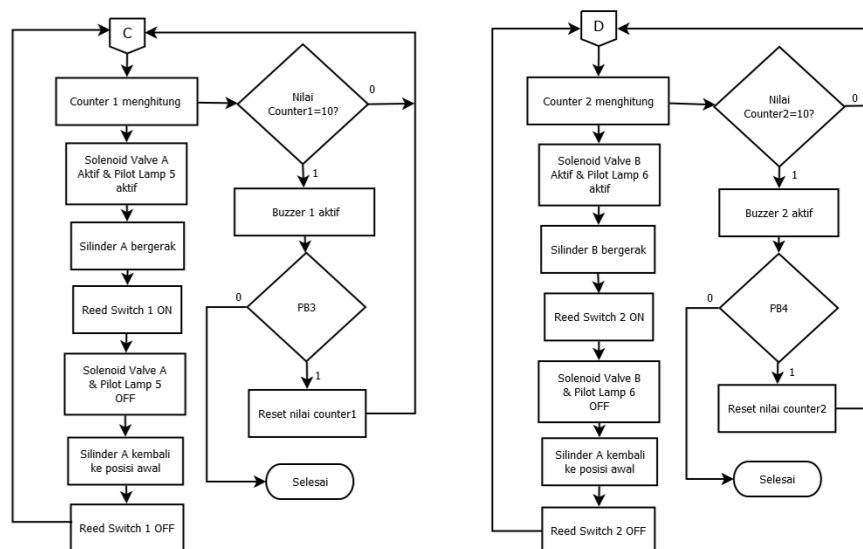


Gambar 11. Perancangan sistem pneumatik

Sesuai dengan diagram alir pada Gambar 12, pada saat sistem otomatis dijalankan maka *pilot lamp 2* akan menyala sebagai indikator bahwa sistem dalam mode otomatis. Setelah itu pada saat sensor fotoelektrik mendeteksi adanya benda datang pada konveyor, maka modul PWM akan aktif dan membuat konveyor menjadi aktif.

Apabila konveyor aktif, maka benda tersebut akan bergerak maju pada konveyor hingga mencapai sensor proximity untuk menentukan jenis benda logam atau benda non-logam. Apabila benda logam yang terdeteksi maka akan menjalankan diagram alir C dan apabila benda non-logam yang terdeteksi maka akan menjalankan diagram alir D. Apabila sensor fotoelektrik tidak mendeteksi adanya benda selama 20 detik, maka secara otomatis konveyor akan berhenti bergerak.

Sesuai diagram alir pada Gambar 13, ketika benda terdeteksi merupakan benda logam maka sensor *proximity* induktif akan aktif, lalu akan mulai menghitung jumlah benda yang telah terdeteksi. Pada saat sensor *proximity* induktif aktif, maka *solenoid valve A* dan *pilot lamp 5* menjadi aktif sehingga benda akan terdorong ke dalam *storage box 1* oleh silinder pneumatik A. Pada saat silinder pneumatik bergerak maju, maka *reed switch 1* akan aktif sehingga akan membuat *solenoid valve 1* dan *pilot lamp 5* mati dan membuat silinder pneumatik A akan kembali pada posisi awal. Setelah itu, apabila pada sensor sudah menghitung benda yang terdeteksi sebanyak 10 kali, maka akan membuat *buzzer 1* aktif sampai dilakukan *reset* nilai *counter* dengan menekan *push button 3*.

Gambar 12. Diagram alir *trainer*

Gambar 13. Diagram alir mode penentuan jenis benda

Ketika benda terdeteksi merupakan benda non-logam maka sensor *proximity* kapasitif akan aktif, lalu akan mulai menghitung jumlah benda yang telah terdeteksi. Pada saat sensor *proximity* kapasitif aktif, maka membuat *solenoid valve* B dan *pilot lamp* 6 menjadi aktif sehingga benda akan terdorong ke dalam *storage box* 2 oleh silinder pneumatik B. Pada saat silinder pneumatik bergerak maju, maka *reed switch* 2 akan aktif sehingga akan membuat *solenoid valve* 2 dan

pilot lamp 6 menjadi mati dan membuat silinder pneumatik B akan kembali pada posisi awal. Setelah itu, apabila pada sensor sudah menghitung benda yang terdeteksi sebanyak 10 kali, maka *buzzer* 2 aktif sampai dilakukan *reset* nilai *counter* dengan menekan *push button* 4.

C. Perancangan Software

Perancangan perangkat lunak (*software*) terdiri dari pembuatan program ladder diagram pada *software* CX-Programmer untuk sistem kontrol pada *trainer* dan perancangan sistem *human machine interface* (HMI) menggunakan *software* NB-Designer.

1) *Perancangan Program PLC*: Pada perancangan program ladder diagram pada *software* CX-Programmer dilakukan dengan membuat program berdasarkan *flow chart* yang telah dibuat. Setelah itu dibuat pengalamatan komponen *input* dan *output* untuk menghubungkan *Conveyor Trainer Module* dengan *Trainer PLC Omron CJ2M*. Berikut merupakan pengalamatan komponen pada *input* dan *output* PLC yang ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Pengalamatan *input* PLC

No.	Nama Komponen	Alamat	Keterangan
1	<i>Selector switch 1</i>	00.00	Mulai mode manual
2	<i>Selector switch 2</i>	00.01	Mulai mode otomatis
3	<i>Push button 1</i>	00.02	<i>Forward</i> Motor
4	<i>Push button 2</i>	00.03	<i>Reverse</i> Motor
5	<i>Push button 3</i>	00.04	Silinder A/ <i>Reset Counter</i> A
6	<i>Push button 4</i>	00.05	Silinder B/ <i>Reset Counter</i> B
7	<i>Emergency button</i>	00.06	<i>Emergency Button</i>
8	<i>Reed switch 1</i>	00.07	Sensor silinder A
9	<i>Reed switch 2</i>	00.08	Sensor silinder B
10	Sensor Fotoelektrik	00.09	Mendeteksi datangnya benda
11	Sensor <i>Proximity</i> Induktif	00.10	Mendeteksi benda logam
12	Relay 1	00.12	Mengaktifkan sensor <i>proximity</i> kapasitif

Tabel 6. Pengalamatan *output* PLC

No.	Nama Komponen	Alamat	Keterangan
1	Relay 2	100.00	<i>Forward/Reverse</i> Motor
2	Modul PWM	100.01	PWM On/Off
3	<i>Pilot lamp 1</i>	100.02	Indikator mode manual
4	<i>Pilot lamp 2</i>	100.03	Indikator mode otomatis
5	<i>Pilot lamp 3</i>	100.04	Indikator <i>Forward Reverse</i>
6	<i>Pilot lamp 4</i>	100.05	Indikator motor
7	<i>Solenoid valve 1 & pilot lamp 5</i>	100.06	<i>Solenoid valve 1 & pilot lamp 5</i> On/Off
8	<i>Solenoid valve 2 & pilot lamp 6</i>	100.07	<i>Solenoid valve 2 & pilot lamp 6</i> On/Off
9	Buzzer 1	100.08	<i>Alarm counter 1</i>
10	Buzzer 2	100.09	<i>Alarm counter 2</i>

2) *Perancangan Human Machine Interface (HMI)*: Pada perancangan ini, HMI dirancang untuk dihubungkan dengan

HMI menggunakan *software* NB-Designer. Untuk dapat menghubungkan antara PT dan PLC dengan menggunakan *ethernet* yaitu dengan mengatur alamat IP yang digunakan pada HMI dan PLC. Dalam merancang desain HMI, perlu melakukan penyesuaian alamat *input* dan *output* yang dibutuhkan pada sistem. Hal ini dilakukan agar HMI dan PLC dapat berkomunikasi secara tepat. Berikut merupakan pengalamatan *input* HMI yang ditunjukkan pada Tabel 7. Tahap selanjutnya yaitu melakukan pengalamatan *output* pada HMI berdasarkan pada Tabel 8

Tabel 7. Pengalamatan *Input* HMI

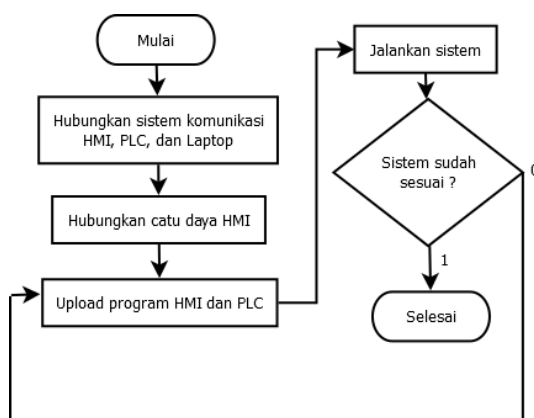
No.	Alamat	Nama	Fungsi
1	W0.10	<i>Start Mode Manual</i>	Untuk menjalankan mode manual pada sistem
2	W0.11	<i>Start Mode Auto</i>	Untuk menjalankan mode auto pada sistem
3	W0.04	Silinder A	Untuk menggerakkan silinder A pada mode manual
4	W0.05	Silinder B	Untuk menggerakkan silinder B pada mode manual
5	W0.12	<i>Forward</i>	Untuk menggerakkan konveyor dalam mode <i>forward</i>
6	W0.13	<i>Reverse</i>	Untuk menggerakkan konveyor dalam mode <i>reverse</i>
7	W0.07	<i>Reset Counter A</i>	Untuk mereset nilai dari <i>counter A</i>
8	W0.09	<i>Reset Counter B</i>	Untuk mereset nilai dari <i>counter B</i>
9	W0.14	<i>Reset Storage A</i>	Untuk menghapus data penyimpanan pada <i>storage A</i>
10	W0.15	<i>Reset Storage B</i>	Untuk menghapus data penyimpanan pada <i>storage B</i>

Tabel 8. Pengalamatan *output* HMI

No.	Alamat	Nama	Fungsi
1	100.02	<i>Pilot lamp 1</i>	Indikator mode manual
2	100.03	<i>Pilot lamp 2</i>	Indikator mode otomatis
3	100.04	<i>Pilot lamp 3</i>	Indikator <i>Forward Reverse</i>
4	100.05	<i>Pilot lamp 4</i>	Indikator motor
5	100.06	Silinder A	Indikator <i>solenoid valve A</i>
6	100.07	Silinder B	Indikator <i>Solenoid valve B</i>
7	100.08	<i>Storage A</i>	<i>Alarm storage A</i>
8	100.09	<i>Storage B</i>	<i>Alarm storage B</i>
9	D1	<i>Counter Storage A</i>	Menyimpan nilai <i>output</i> untuk <i>counter A</i>

No.	Alamat	Nama	Fungsi
10	D2	Counter Storage B	Menyimpan nilai output untuk counnter B
11	D3	Timer Konveyor	Menyimpan nilai output untuk timer konveyor
12	D4	Data history Storage A	Menyimpan nilai dari jumlah benda pada storage A
13	D5	Data history Storage B	Menyimpan nilai dari jumlah benda pada storage B

Tahapan selanjutnya yaitu mengoperasikan HMI yang dilakukan sesuai dengan diagram alir pengoperasian HMI yang ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Diagram alir pengoperasian HMI

Gambar 14 menunjukkan alur pengoperasian HMI. Pengoperasian HMI dilakukan dengan menyambungkan sistem komunikasi antara HMI, PLC, dan laptop. Setelah semua sistem komunikasi sudah terhubung, maka nyalakan catu daya HMI. Tahap selanjutnya yaitu meng-upload program PLC dan HMI. Setelah program telah berhasil di-upload, maka selanjutnya yaitu menjalankan sistem dengan menggunakan HMI. Apabila sistem belum berjalan sesuai dengan yang diinginkan, maka perbaiki program dan melakukan upload ulang program.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan

Hasil perancangan *Conveyor Trainer Module* yang telah dibuat pada penelitian ini yang ditunjukkan pada Gambar 15. Berikut merupakan spesifikasi akhir dari *trainer* yang telah dibuat yang ditunjukkan pada Tabel 9.

B. Pengujian Mode Manual Sorting Machine

Pengujian mode manual dilakukan untuk menguji sistem secara manual. Dalam mode ini, pengguna dapat melakukan kendali langsung atas tindakan kontrol yang akan dilakukan

pada sistem. Pemilihan mode manual pada HMI dapat dilakukan dengan menekan tombol Manual pada halaman *Main Menu*. Berikut merupakan tampilan halaman mode manual yang ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 15. Hasil Perancangan *Conveyor Trainer Module*

Tabel 9. Spesifikasi *Conveyor Trainer Module*

Spesifikasi	Keterangan
Ukuran (PxLxT)	80 x 70 x 10 cm
Kontrol Utama	Trainer PLC Omron CJ2M CPU-31
Input Voltage	220 Vac
Catu Daya Trainer	24 Vdc
Push button, Emergency Button, Selector Switch	Suplai : 24 Vdc Output : <i>Normaly Open</i> dan <i>Normaly Close</i>
Sensor Proximity Induktif	Suplai : 24 Vdc Output : PNP <i>Normally Open</i> (NO) Jarak efektif : 1 cm
Sensor Fotoelektrik	Suplai : 24 Vdc Output : PNP <i>Normally Open</i> (NO) Jarak efektif : 10 cm
Sensor Proximity Kapasitif	Suplai : 24 Vdc Output : NPN <i>Normally Open</i> (NO) Jarak efektif : 1 cm
Motor DC	Suplai : 24 Vdc Ratio 1:56 (140 rpm)
Modul PWM Solenoid valve	Suplai 24 Vdc 5/2 <i>Single Coil</i> Suplai : 24 vdc Tekanan operasi : 0.15 Mpa – 0.8 Mpa
Silinder	<i>Double Acting Cylinder</i> Range Tekanan : 0.1 Mpa – 1 Mpa
Pilot lamp, Buzzer, Reed switch	Suplai : 24 Vdc
Relay	Tipe DPDT (8 pin) Suplai : 24 Vdc

Mode manual dapat berjalan ketika tombol Start pada HMI ditekan. Pada mode manual, pengguna dapat melakukan perubahan arah putaran pada konveyor serta mengaktifkan silinder secara manual dengan menekan tombol yang ada pada tampilan HMI. Berikut di bawah ini merupakan rangkuman dari hasil pengujian HMI pada mode manual menggunakan HMI yang ditunjukkan pada Tabel 10



Gambar 16. Tampilan halaman mode manual



Gambar 17. Tampilan halaman mode auto pada HMI

Tabel 10. Pengujian HMI pada mode manual

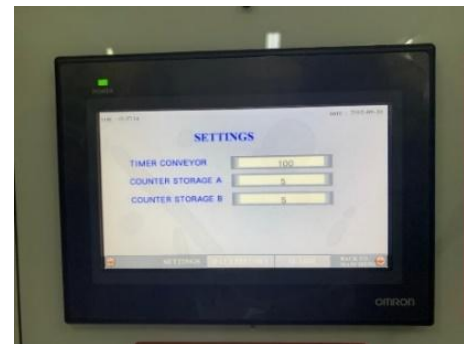
Tombol/ Fitur	Alamat Input	Output	Alamat Output	Keterangan
Start	W0.10	Lamp 1	100.02	Indikator mode manual pada trainer menyala
		Motor	100.01	Konveyor aktif dan indikator konveyor pada HMI menyala
		Lamp 4	100.05	Indikator motor pada trainer menyala
Forward	W0.12	Relay 2	100.00	Konveyor mode forward
		Lamp 3	100.04	Indikator konveyor mode forward
Reverse	W0.13	Relay 2	100.00	Konveyor mode reverse
Silinder A	W0.04	SV A & Lamp 5	100.06	Solenoid valve A aktif dan indikator silinder A menyala pada trainer dan HMI
Silinder B	W0.05	SV B & Lamp 6	100.07	Solenoid valve B aktif dan indikator silinder B menyala pada trainer dan HMI

C. Pengujian Mode Auto Sorting Machine

Pengujian mode auto dilakukan untuk menguji sistem secara otomatis. Dalam mode ini, sistem kontrol atau PLC melakukan kendali penuh atas tindakan kontrol sesuai dengan program yang telah dibuat pada program PLC. Pada saat mode ini diaktifkan, maka sistem secara otomatis menjalankan sistem *sorting machine* untuk memilah benda berdasarkan jenisnya. Pengujian mode auto pada HMI dengan memilih mode auto pada tampilan HMI. Berikut merupakan tampilan halaman mode manual yang ditunjukkan pada Gambar 17.

Tahapan yang dilakukan sebelum menjalankan mode auto yaitu melakukan pengaturan untuk mengatur nilai pada *timer* konveyor dan *counter* pada sensor

Pengaturan dilakukan dengan menekan tombol *Settings* pada HMI. Berikut merupakan tampilan halaman *Settings* pada HMI yang ditunjukkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Tampilan halaman Settings pada HMI

Pada halaman menu *Settings*, dimasukkan nilai *Timer* sebesar 200 ms, *counter A* dan *counter B* dengan nilai 10. Hal ini menunjukkan bahwa pada saat mode auto dijalankan maka saat sensor fotoelektrik tidak mendeteksi adanya benda pada konveyor selama 200 ms maka konveyor akan mati secara otomatis. Sedangkan sensor akan mendeteksi benda sebanyak 10 benda dan apabila telah melewati jumlah tersebut maka *alarm* menjadi aktif sebagai indikator penyimpanan penuh.

Tahap selanjutnya yaitu menjalankan mode auto dengan cara menekan tombol *start* pada halaman mode auto, maka sistem dijalankan dalam mode auto untuk melakukan pemilahan benda logam dan non-logam. Tabel 11 menunjukkan rangkuman dari hasil pengujian HMI pada mode auto menggunakan HMI.

Tabel 11. Pengujian HMI pada mode auto

Tombol/ Fitur	Alamat Input	Output	Alamat Output	Keterangan
Start	W0.11	Lamp 2	100.03	Indikator mode auto pada trainer menyala
Sensor fotoelektrik	0.09	Motor	100.01	Indikator fotoelektrik aktif, konveyor aktif, dan indikator konveyor pada HMI menyala
Forward	W0.12	Relay 2	100.00	Konveyor mode forward

Tombol/ Fitur	Alamat Input	Output	Alamat Output	Keterangan
		Lamp 3	100.04	Indikator konveyor mode <i>forward</i>
Reverse	W0.13	Relay 2	100.00	Konveyor mode <i>reverse</i>
Sensor <i>proximity</i> induktif	0.10	SV A & Lamp 5	100.06	Solenoid valve A aktif dan indikator silinder A menyala pada <i>trainer</i> dan HMI
Sensor <i>proximity</i> kapasitif	0.11	SV B & Lamp 6	100.07	Solenoid valve B aktif dan indikator silinder B menyala pada <i>trainer</i> dan HMI
Reset counter A	W0.07	Buzzer 1	100.08	Reset nilai <i>counter</i> pada <i>storage</i> A dan mematikan buzzer 1
Reset counter B	W0.09	Buzzer 2	100.09	Reset nilai <i>counter</i> pada <i>storage</i> B dan mematikan buzzer 2

Berdasarkan hasil percobaan penyortiran benda pada mode auto, berikut merupakan rangkuman hasil pengujian sistem *sorting machine* yang telah dilakukan ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil pengujian *sorting machine*

Jumlah Benda		Persentase Keberhasilan (%)		Rata-Rata (%)
Logam	Non-logam	Sensor <i>Proximity</i> Induktif (I)	Sensor <i>Proximity</i> Kapasitif (K)	
10	10	100	70	85

Berikut merupakan perhitungan dari Tabel 12:

$$\% I = \frac{\text{Jumlah Berhasil Sortir}}{\text{Jumlah Benda Logam}} \times 100 \% \quad (1)$$

$$= \frac{10}{10} \times 100 \% = 100 \%$$

$$\% K = \frac{\text{Jumlah Berhasil Sortir}}{\text{Jumlah Benda Logam}} \times 100 \% \quad (2)$$

$$= \frac{7}{10} \times 100 \% = 70 \%$$

$$\% \text{ Keberhasilan} = \frac{\% I + \% K}{2} = \frac{100 + 70}{2} = 85\% \quad (3)$$

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 12 menunjukkan bahwa dalam pengujian ini digunakan 10 benda logam dan 10 benda non-logam. Dari hasil pengujian sistem *sorting machine* telah berjalan dengan cukup optimal. sensor *proximity* induktif berhasil mendeteksi dan menyortir semua benda logam yang berjumlah 10 buah. Sebaliknya, sensor *proximity* kapasitif hanya berhasil mendeteksi dan menyortir 7 dari 10 benda non-logam.

Rata-rata keberhasilan penyortiran dihitung dengan mengambil rata-rata dari persentase keberhasilan kedua sensor. Berdasarkan hasil pada Tabel 12 menunjukkan bahwa sistem *sorting machine* memiliki rata-rata persentase keberhasilan dalam melakukan penyortiran sebesar 85%. Ini

menunjukkan bahwa sistem secara keseluruhan bekerja dengan baik, meskipun terdapat beberapa kegagalan dalam mendeteksi dan menyortir benda non-logam. Hal ini disebabkan jarak benda yang melebihi jangkauan efektif dari sensor *proximity* kapasitif. Hal ini mengakibatkan beberapa benda non-logam tidak berhasil terdeteksi dan disortir ke dalam *storage* yang sesuai.

V. SIMPULAN

Simpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu

- 1) *Conveyor trainer module* yang telah dibuat berhasil melakukan simulasi proses otomatisasi industri secara otomatis dengan cara mengintegrasikan berbagai komponen elemen-elemen yang sering digunakan di industri dengan memanfaatkan penggunaan PLC sebagai sistem kontrol.
- 2) *Conveyor Trainer Module* telah berhasil melakukan proses penyortiran benda berdasarkan jenisnya dengan tingkat keberhasilan 85%. Hal ini terjadi karena jarak deteksi sensor yang terlalu kecil sehingga menyebabkan benda terkadang tidak terdeteksi.
- 3) Integrasi antara HMI dan PLC telah berhasil dilakukan melalui komunikasi serial menggunakan protokol Ethernet. Hal ini diperoleh berdasarkan hasil pengujian langsung yang dilakukan pada sistem, di mana komunikasi antara HMI dan PLC berhasil terjalin dengan baik. Hasil ini menunjukkan bahwa HMI dapat secara efektif mengirim dan menerima data dari PLC, sehingga memungkinkan pengguna untuk memantau status sistem dan mengendalikan proses secara *real-time*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Prayitono, "Aplikasi PLC Omron CP1E 30 I/O pada Training Kit Electropneumatic," Universitas Gadjah Mada, 2013.
- [2] H. Purnomo, *Pengantar Teknik Industri*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2004.
- [3] M. K. Khuluqi, "Perancangan dan Pembuatan *Trainer*-Kit Programmable Logic Control (PLC) untuk Media Pembelajaran Sistem Otomasi Industri (Studi Kasus: Jurusan Teknik ...," 2021, [Online]. Available: <http://eprints.ums.ac.id/id/eprint/88991>
- [4] M. Imaduddin, "Rancang Bangun *Trainer* Alat Penyortir Barang Logam Dan Non Logam Sebagai Media Pembelajaran pada Mata Kuliah Dasar Sistem Kontrol," Universitas Negeri Semarang, 2016.
- [5] I. D. Setianto, "Perancangan Komunikasi Sistem Monitoring Pada Automation Sorting Line System," pp. 1–139, 2018.
- [6] D. Y. Kusuma, "Sistem Konveyor Timbangan pada Sistem Pengepakan Produk Kemasan Plastik dengan Kontrol PLC dan Visualisasi Berbasis Peramban menggunakan Protokol MQTT," Universitas Gadjah Mada, 2023.
- [7] W. Bolton, *Programmable Logic Controllers fourth edition*, vol. 53, no. 9. Elsevier Newnes, 2006.
- [8] A. E. Putra, *PLC : Konsep, Pemograman dan Aplikasi (Omron CPM1A/CPM2A dan ZEN Programmable Relay)*, Edisi Pert. Yogyakarta: Gava Media, 2004.
- [9] A. Wahyuningrum, "Perancangan Sistem Marking Quick Response Code Menggunakan Mesin Laser Berbasis Programmable Logic Controller," Universitas Tidar, 2023. [Online]. Available: https://repository.untidar.ac.id/index.php?p=show_detail&id=13459&keywords=
- [10] Electric-B2C, "Photoelectric Sensor E3F-DS30P1."
- [11] Sudaryono, *Pneumatik dan Hidrolik*, Edisi Pert. Jakarta: Kementerian Pendidikan & Kebudayaan, 2013.

-
- [12] D. Darto, "Perencanaan Dan Simulasi Sistem Pneumatik Pada Mesin Pres Briket Blothong Berbantuan Perangkat Lunak," *J. Teknol. dan Manaj. Inform.*, vol. 1, no. 1, 2015, doi: 10.26905/jtmi.v1i1.67.
- [13] A. Yudianto, *Limit Switch dan Sensor pada Pneumatik dan Elektro Pneumatik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2017.
- [14] A. Ma'arif, R. Istiarno, and S. Sunardi, "Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) pada Kecepatan Sudut Motor DC dengan Pemodelan Identifikasi Sistem dan Tuning," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 9, no. 2, p. 374, 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i2.374.
- [15] B. Mas and E. K. Yulyawan, "Uji Kemampuan RPM Motor DC Permanen Baldor dengan Sumber Daya Solar Cell Monocrystallin 50 Wp," *ELPOSYS J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 1, pp. 6–11, 2022, doi: 10.33795/elposys.v9i1.85.
- [16] D. M. Chalim, "Rancang Bangun Alat Ukur Efek Doppler pada Gelombang Ultrasonik," Universitas Indonesia, 2012.
- [17] A. Anarwati and I. Setiono, "Motor Dc Power Windows Berbasis Plc Panasonic Menggunakan Human Machine Interface (Hmi)," *Gema Teknol.*, vol. 19, no. 3, pp. 32–37, 2017.

Prototipe Sistem *Scheduling* dan *Monitoring* Pemberian Pakan Kucing Otomatis Berbasis *Internet of Things*

Nia Saputri Utami^{1,*}, Khansa Salsabila Suhaimi¹, Alya Berliani¹, Adrian Adli Ramadhan¹, Brandon SH Silitonga¹

¹Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera; khansa.suhaimi@el.itera.ac.id;

alya.120130062@student.itera.ac.id; adrian.120130023@student.itera.ac.id;

brandon.120130022@student.itera.ac.id

*Korespondensi: nia.utami@el.itera.ac.id

Abstract– Regular and appropriate feeding is a basic need to keep cats to avoid negative impacts, such as malnutrition, obesity, or other diseases. Consistency in feeding is often a challenge for cat owners who have busy daily routines, and many studies have been conducted to overcome this problem. However, most still have limitations in terms of scheduling flexibility and do not have real-time monitoring of cat activities. This study developed a prototype of an automatic cat feeder based on the internet of things (IoT), equipped with easy, simple, and flexible scheduling and monitoring features. This system uses a load cell sensor to ensure the accuracy of the feed dosage, a camera for real-time monitoring of cat activity, and an Android application as the main interface for setting and monitoring. The test results showed a load cell sensor accuracy level of 96.9% in the feed storage tank and 98.8% in the feeding bowl, whereas the percentage of servomotor position error was 5% when opening and 3.39% when closing the valve. In addition, the scheduling and monitoring system testing was successful, with a success rate of 100%, namely, easy and flexible feed scheduling through the application, automatic feeding according to the set schedule, and real-time monitoring. The tests showed that the automatic feeder can provide feed regularly according to the dosage, and can help with real-time monitoring of cat activity and feed availability. The Android application that has been built can schedule and monitor the feed easily, simply, and flexibly.

Keywords – Application, automatic cat feeder, IoT, loadcell sensor, servo motor

Intisari – Pemberian pakan yang teratur dan sesuai takaran merupakan kebutuhan dasar dalam memelihara kucing untuk menghindari dampak negatif seperti malnutrisi, obesitas, atau penyakit lainnya. Konsistensi pemberian pakan sering kali menjadi tantangan bagi pemilik kucing yang memiliki rutinitas harian yang padat, sehingga banyak penelitian yang dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Meskipun demikian sebagian besar masih memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas pengaturan jadwal dan belum memiliki pemantauan aktivitas kucing secara *real-time*. Penelitian ini mengembangkan prototipe alat pemberi pakan kucing otomatis berbasis *internet of things* (IoT) yang dilengkapi fitur *scheduling* dan *monitoring* yang mudah, sederhana, dan fleksibel. Sistem ini menggunakan sensor *loadcell* untuk memastikan akurasi takaran pakan, kamera untuk pemantauan aktivitas kucing secara *real-time*, serta aplikasi Android sebagai antarmuka utama untuk pengaturan dan pemantauan. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi sensor *loadcell* sebesar 96,9% pada tangki dan 98,8% pada wadah pakan, sedangkan persentase error posisi motor *servo* adalah 5% saat membuka dan 3,39% saat menutup katup. Selain itu, pengujian sistem *scheduling* dan *monitoring* berhasil dilakukan dengan tingkat keberhasilan 100%, yaitu penjadwalan pakan secara mudah dan fleksibel melalui aplikasi, pemberian pakan secara otomatis yang sesuai dengan jadwal yang telah diatur, dan pemantauan secara *real-time*. Pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa alat dapat memberikan pakan secara teratur sesuai takaran dan dapat membantu pemantauan secara *real-time* baik untuk aktivitas kucing maupun ketersediaan pakan, serta aplikasi Android yang dibangun dapat melakukan *scheduling* dan *monitoring* pakan dengan mudah, sederhana, dan fleksibel.

Kata kunci – Aplikasi, IoT, motor *servo*, pemberi pakan kucing otomatis, sensor *loadcell*

I. PENDAHULUAN

Kucing merupakan salah satu jenis hewan peliharaan yang populer di berbagai belahan dunia. Hal tersebut dikarenakan kucing memiliki penampilan yang menggemaskan dan memiliki sifat yang tenang, mandiri, serta mudah beradaptasi dengan lingkungan sekitar. Kucing juga dapat menjadi teman yang menyenangkan sehingga kehadiran kucing di rumah dapat membantu mengurangi stres, kecemasan, dan kesepian bagi pemiliknya [1]. Oleh karena itu, kucing menjadi pilihan peliharaan yang ideal, terutama bagi orang-orang yang memiliki rutinitas padat.

Memelihara kucing dapat dilakukan dengan mudah asalkan memperhatikan beberapa aspek, yaitu pemberian pakan yang tepat, perawatan kesehatan, dan pengendalian populasi [2]. Di antara ketiga aspek tersebut, pemberian pakan yang tepat merupakan aspek dasar yang harus diperhatikan

untuk memastikan kesehatan dan pertumbuhan kucing yang optimal [3]. Pemberian pakan kucing terkait dengan kebutuhan nutrisinya sehingga pemberian pakan yang tidak teratur atau tidak sesuai takaran dapat menimbulkan dampak negatif seperti mengalami malnutrisi, obesitas, atau terjerakit penyakit lainnya [4]. Namun, menjaga konsistensi pemberian pakan sering kali menjadi tantangan bagi pemilik kucing yang memiliki rutinitas harian yang padat, sehingga solusi teknologi yang praktis dan dapat diandalkan menjadi kebutuhan yang semakin relevan.

Studi mengenai alat pemberi pakan kucing otomatis telah dilakukan oleh A.B. Pradana, dkk., dengan hanya memanfaatkan sensor ultrasonik untuk memberikan pakan berdasarkan jarak kucing ke alat [5]. Studi lainnya, yang dilakukan oleh M.L. Tsabit, dkk., telah memanfaatkan mikrokontroler dan tombol pada alat untuk memilih jadwal pemberian pakan yang tersedia sehingga alat akan

memberikan pakan sesuai jadwal yang dipilih [6]. Kedua studi tersebut belum secara presisi mengatur takaran pakan seperti yang dilakukan oleh N. Ramadhan dan R Badarudin., T.D. Hakim dan M. Hutagaol., W.T. Arifin., yang memanfaatkan sensor *loadcell* untuk menentukan takaran pakan berdasarkan beratnya [7], [8], [9]. Lebih jauh lagi, studi lainnya memanfaatkan teknologi *internet of things* (IoT) untuk menghubungkan alat pemberi pakan ke *device* pemilik kucing dalam bentuk pesan singkat (SMS) untuk menginformasikan apakah pemberian pakan berhasil atau gagal [10], pesan aplikasi telegram untuk mengingatkan waktu pemberian pakan [11], hingga aplikasi khusus berbasis android yang dirancang untuk memberikan informasi ketersediaan pakan secara *real-time* [12], [13], [14], [15], [16].

Studi yang dipaparkan sebelumnya telah berhasil mengembangkan alat pemberi pakan otomatis untuk kucing, namun sebagian besar masih memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas pengaturan jadwal dan belum memiliki pemantauan aktivitas kucing secara *real-time*. Maka, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan prototipe sistem *scheduling* dan *monitoring* pemberian pakan kucing otomatis berbasis IoT. Sistem tersebut dirancang agar mudah dan sederhana untuk digunakan oleh pemilik kucing, namun tetap dapat memastikan pemberian pakan secara teratur dengan takaran yang tepat. Adanya integrasi alat dengan teknologi IoT dapat memungkinkan pemilik kucing untuk mengatur jadwal pemberian pakan dan memantau aktivitas kucing secara mudah dan fleksibel melalui perangkat pintar seperti ponsel atau tablet sehingga memberikan kenyamanan, ketenangan, sekaligus kendali yang lebih baik.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah menghasilkan prototipe yang dapat memberikan solusi terhadap permasalahan pemberian pakan kucing yang tidak teratur dengan menyediakan penjadwalan pemberian pakan dan pemantauan aktivitas kucing yang mudah, sederhana, dan fleksibel dengan memperkenalkan sistem berbasis IoT yang dapat diakses dengan mudah oleh masyarakat luas. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat praktis sekaligus membuka peluang pengembangan lebih lanjut dalam aplikasi IoT untuk perawatan hewan peliharaan.

II. METODOLOGI

Penelitian ini menerapkan metode penelitian rekayasa yaitu studi literatur, analisis permasalahan, desain dan perancangan sistem, implementasi, serta pengujian sistem [17]. Tahap studi literatur dilakukan dengan mempelajari teori dan informasi terkait sistem pemberi pakan kucing otomatis yang selanjutnya menjadi dasar untuk tahap analisis permasalahan pakan kucing yaitu permasalahan yang dialami pemilik kucing, sistem yang ada, kebutuhan pengembangan fitur *scheduling* dan *monitoring*, serta analisis kebutuhan komponen perangkat keras dan dimensi alat. Kemudian tahap desain dan perancangan sistem dilakukan dengan mengacu pada hasil analisis di tahap sebelumnya untuk merancang

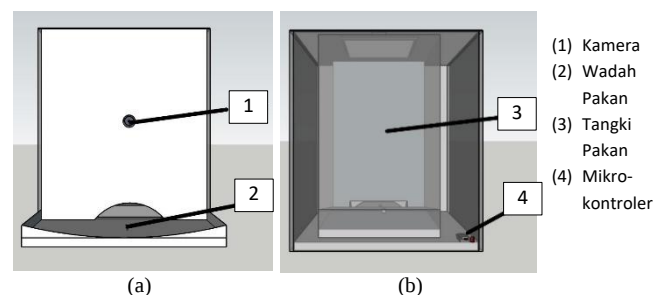
perangkat keras dan aplikasi android. Tahap selanjutnya yaitu implementasi dari rancangan yang telah dibuat dengan merakit dan membangun seluruh sistem. Tahap akhir dari penelitian ini adalah pengujian kinerja sistem yang telah dibangun.

A. Perancangan Perangkat Keras

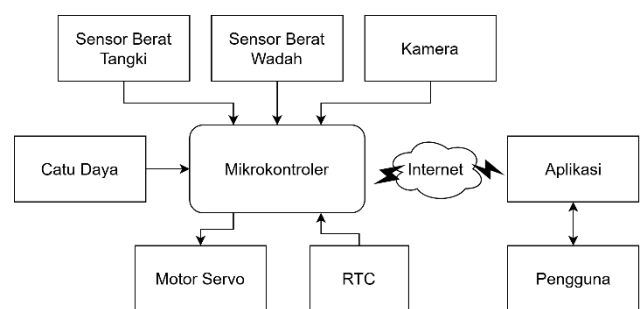
Perancangan alat pemberi pakan terdiri dari desain fisik alat dan arsitektur sistem yang akan menentukan komponen-komponen elektronika.

1) *Desain Fisik Alat*: Dimensi alat pemberi pakan yang dirancang yaitu $(p) 30\text{ cm} \times (l) 24,5\text{ cm} \times (t) 38\text{ cm}$ dengan berat $\pm 3\text{ Kg}$. Desain fisik alat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1 di mana terdiri dari tangki dan wadah pakan, serta letak komponen elektronika. Tangki pakan memiliki kapasitas maksimal 3 kg .

2) *Arsitektur Sistem*: Arsitektur sistem digambarkan dalam diagram blok yang menunjukkan integrasi antar komponen sebagai perangkat keras dan integrasi dengan aplikasi sebagai perangkat lunak (Gambar 2). Sistem tersebut menggunakan catu daya PLN sebagai sumber daya, sensor berat pada tangki dan wadah pakan, kamera untuk memantau aktivitas kucing, motor sebagai penggerak untuk membuka atau menutup katup tangki, RTC sebagai jam yang menghitung waktu, mikrokontroler sebagai pengendali, dan aplikasi android sebagai tampilan muka untuk melakukan *scheduling* dan *monitoring*. Adapun komponen elektronika yang digunakan seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1.



Gambar 1. Desain Fisik Alat Pemberi Pakan. (a) Tampak depan; (b) Tampak belakang



Gambar 2. Arsitektur Sistem

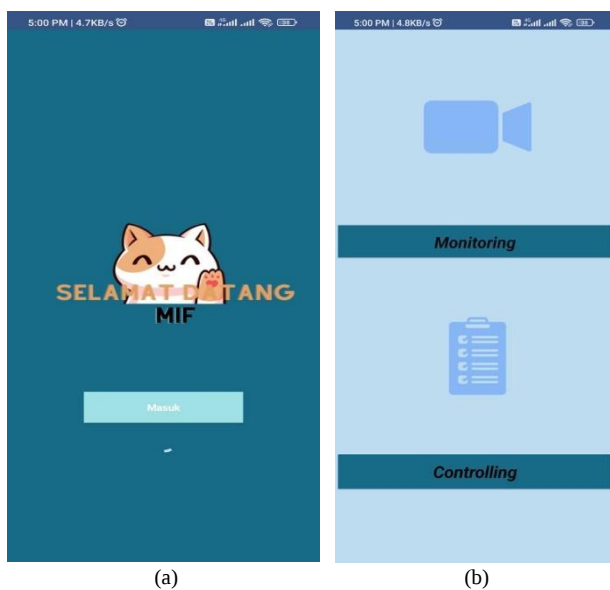
Tabel 1. Komponen Elektronik yang Digunakan

Jenis	Komponen
Sensor berat	Sensor <i>loadcell</i> 1 <i>kg</i> Sensor <i>loadcell</i> 5 <i>kg</i> Modul HX711
Mikrokontroler	NodeMCU ESP32
Motor penggerak	Motor <i>Servo</i> MG996R
Kamera	ESP32-CAM
RTC	RTC DS1302

B. Perancangan Aplikasi Android

Aplikasi berbasis android untuk alat pemberi pakan kucing dirancang memiliki beberapa fitur, yaitu *login*, dasbor *monitoring* aktivitas kucing, dasbor *monitoring* pakan, dan pengaturan *scheduling*. Fitur-fitur tersebut terdapat pada empat halaman aplikasi, yaitu halaman awal dan halaman utama seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3, serta halaman *monitoring* dan halaman *controlling* yang dapat diakses melalui menu pada halaman utama. Pada halaman *monitoring*, pemilik kucing dapat memantau aktivitas kucing peliharaannya melalui kamera sedangkan pada halaman *controlling* pemilik kucing dapat memantau ketersediaan pakan pada tangki maupun pakan pada wadah serta melakukan *scheduling* atau penjadwalan pakan.

Aplikasi android untuk alat pemberi pakan kucing tersebut dibangun pada platform Kodular App Creator yang memungkinkan perancangan fungsionalitas aplikasi dengan menggunakan antarmuka berbasis blok. Selain itu, aplikasi yang dibangun menggunakan basis data Firebase yang disediakan oleh Google dimana memungkinkan aplikasi untuk menerima perubahan data secara *real-time*, tanpa memerlukan *polling* atau *request* terus-menerus ke server [18].



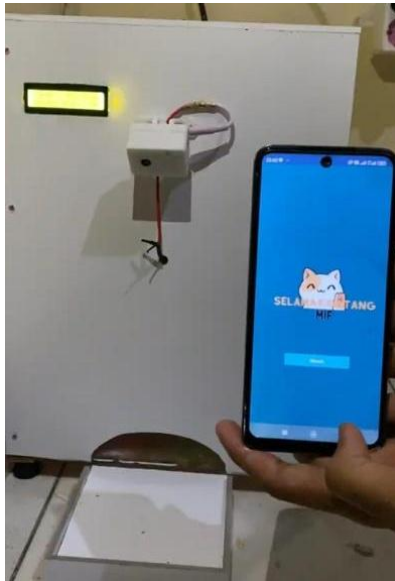
Gambar 3. Desain Aplikasi Android. (a) halaman awal; (b) halaman utama

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

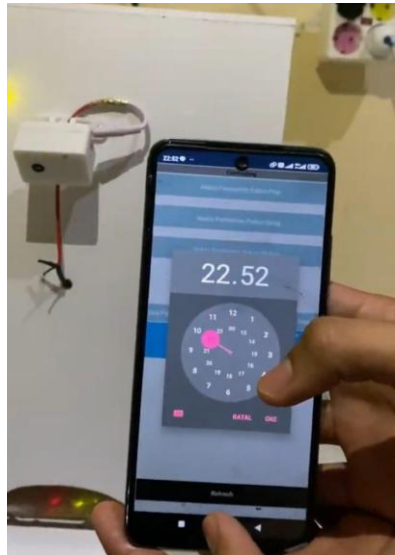
Alat pemberi pakan kucing otomatis dibuat dengan ukuran $30\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ dengan kisaran berat 3 kg seperti pada Gambar 4. Pada bagian dalam alat terdapat tangki penyimpanan makanan dengan kapasitas penampungan hingga 3 kg yang di bawahnya dipasang sensor *loadcell* untuk mengetahui persediaan makanan kucing dan waktu isi ulang. Kemudian, pada bagian depan terdapat wadah kecil tempat penampungan makanan kucing yang dikeluarkan sesuai jadwal dan takaran. Wadah makanan kucing ini juga dilengkapi dengan sensor *loadcell* untuk memastikan takaran yang diberikan sesuai dan dapat dipantau melalui aplikasi. Alat ini juga dilengkapi dengan kamera yang dipasang pada bagian depan agar dapat memantau aktivitas kucing secara langsung ketika pemilik sedang berada di luar rumah. Fungsi *monitoring* dan *scheduling* ini dilakukan melalui aplikasi yang telah dibuat. Fungsi *monitoring* yang dimaksud yakni pemilik kucing dapat melihat sisa makanan pada tangki penyimpanan dan wadah makan melalui aplikasi tersebut. Sementara itu, fungsi *scheduling* yakni pengaturan jadwal pemberian pakan yang dilakukan melalui aplikasi dengan mengakses menu *controlling*. Tampilan fungsi *scheduling* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.

Pengujian pada alat pemberi pakan kucing otomatis ini dilakukan pada sensor *loadcell*, motor *servo*, dan aplikasi yang telah dibuat. Pengujian pertama, yaitu sensor *loadcell* pada tangki dan wadah pakan bertujuan untuk mengetahui akurasi serta memastikan bahwa sensor tersebut berfungsi sebagaimana mestinya. Pengujian sensor *loadcell* pada tangki pakan dilakukan dengan meletakkan pakan pada tangki yang sebelumnya telah diukur menggunakan neraca digital. Pengujian ini menggunakan pakan dengan total massa 1500 gr yang dilakukan sebanyak sepuluh kali percobaan. Sepuluh kali percobaan yang dilakukan tersebut menunjukkan adanya variasi hasil pengukuran seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6 dengan rata-rata error sensor *loadcell* $3,1\%$ dan akurasi sensor $96,9\%$. Pada gambar tersebut, grafik berwarna biru menunjukkan pengukuran massa pakan dengan sensor *loadcell*, sedangkan pengukuran dengan neraca digital ditunjukkan oleh grafik berwarna merah.

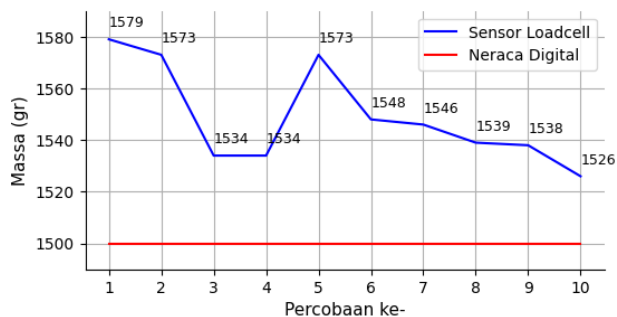
Pengujian sensor *loadcell* pada wadah pakan juga dilakukan dengan metode yang sama seperti pada pengujian sensor *loadcell* pada tangki pakan dengan total massa yang diuji 70 gr untuk sepuluh kali percobaan. Perbandingan pengukuran antara sensor *loadcell* pada wadah pakan dan neraca digital seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 7 di mana memperlihatkan variasi hasil pengukuran untuk sensor *loadcell* dengan rata-rata error $1,1\%$ dan akurasi $98,8\%$. Pada gambar tersebut, grafik berwarna biru juga menunjukkan pengukuran massa pakan dengan sensor *loadcell*, sedangkan pengukuran dengan neraca digital ditunjukkan oleh grafik berwarna merah.



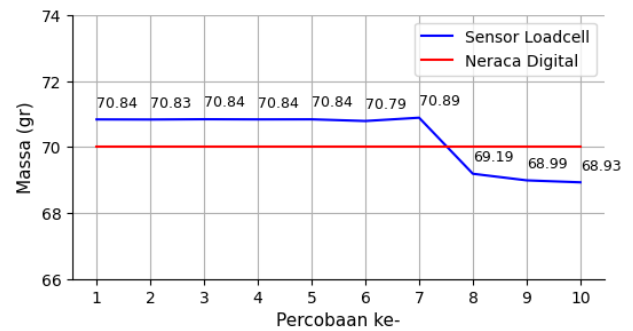
Gambar 4. Hasil Implementasi alat dan aplikasi



Gambar 5. Hasil Implementasi fitur scheduling

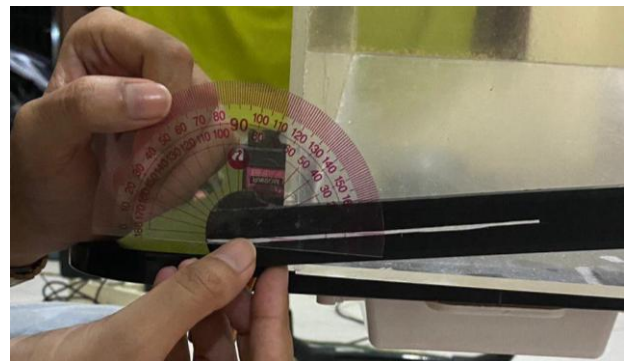


Gambar 6. Grafik perbandingan pengujian sensor loadcell pada tangki penyimpanan (biru) dan neraca digital (merah)



Gambar 7. Grafik perbandingan pengujian sensor loadcell pada wadah pakan (biru) dan neraca digital (merah)

Pengujian kedua dilakukan pada motor *servo* yang terpasang di katup tangki pakan kucing dengan menguji saat posisi katup membuka dan menutup. Pemrograman motor *servo* katup tangki diatur pada sudut 8° untuk membuka dan 15° untuk menutup. Sudut tersebut dibandingkan dengan pengukuran posisi katup berdasarkan penggaris busur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Hasil pengukuran untuk kedua jenis pengujian tersebut yang masing-masing dilakukan sebanyak sepuluh kali percobaan menunjukkan rata-rata persentase error 5% dan 3,39% untuk sudut 8° dan 15° seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 2 dan Tabel 3.

Gambar 8. Motor servo membuka katup sebesar 8° Tabel 2. Hasil pengujian sudut motor servo 8°

Percobaan ke-	Sudut Servo ($^\circ$)	Sudut Terukur ($^\circ$)	Persen Error (%)
1	8	8	0
2	8	7	12,5
3	8	8	0
4	8	9	12,5
5	8	8	0
6	8	8	0
7	8	8	0
8	8	7	12,5
9	8	8	0
10	8	7	12,5
Rata-rata			5

Tabel 3. Hasil pengujian sudut motor servo 15°

Percobaan ke-	Sudut Servo (°)	Sudut Terukur (°)	Persen Error (%)
1	15	15	0
2	15	14	6,6
3	15	15	0
4	15	15	0
5	15	13	13,3
6	15	15	0
7	15	15	0
8	15	13	13,3
9	15	14	6,6
10	15	15	0
Rata-rata			3,39

Pengujian ketiga dilakukan pada aplikasi untuk menguji fitur *scheduling* dan *monitoring*. Pengujian *scheduling* dilakukan dengan menjadwalkan pemberian pakan satu hari sebanyak tiga kali yaitu pukul 10.30, 16.15, dan 23.30 WIB seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 9. Gambar tersebut merupakan tampilan dari halaman *controlling* yang menunjukkan *scheduling* atau penjadwalan yang dilakukan dan ketersediaan pakan pada tangki maupun wadah. Pada tiga kali percobaan berbeda pada jadwal yang sama dapat dilihat informasi ketersediaan pakan pada kolom sisa pakan pada tangki dan sisa pakan pada wadah. Ketiga percobaan yang dilakukan dirincikan oleh Tabel 4 yang menunjukkan keberhasilan sistem *monitoring* dan *scheduling* pakan kucing. Selain itu, *monitoring* aktivitas kucing pada aplikasi juga berhasil dilakukan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 10. Pada gambar tersebut, kamera yang dipasang pada bagian depan alat berhasil menangkap gambar kucing dan mengirimkannya secara *real-time* sehingga dapat dilihat di aplikasi yang telah dibangun.

Controlling		Controlling		Controlling	
Waktu Pemberian Pakan Pagi		Waktu Pemberian Pakan Pagi		Waktu Pemberian Pakan Pagi	
Pagi 10:30		Pagi 10:30		Pagi 10:30	
Waktu Pemberian Pakan Siang		Waktu Pemberian Pakan Siang		Waktu Pemberian Pakan Siang	
Siang 16:15		Siang 16:15		Siang 16:15	
Waktu Pemberian Pakan Malam		Waktu Pemberian Pakan Malam		Waktu Pemberian Pakan Malam	
Malam 23:30		Malam 23:30		Malam 23:30	
Sisa Pakan Pada Tangki	Sisa Pakan Pada Wadah	Sisa Pakan Pada Tangki	Sisa Pakan Pada Wadah	Sisa Pakan Pada Tangki	Sisa Pakan Pada Wadah
640gram	67,9gram	521gram	64,8gram	442gram	65,7gram

Gambar 9. Tampilan aplikasi pada fitur *scheduling*. (a) Percobaan pertama; (b) Percobaan kedua; (c) Percobaan ketigaTabel 4. Hasil pengujian *scheduling* dan *monitoring* pada aplikasi

Scheduling Pakan	Monitoring Pakan di Aplikasi (gr)		Monitoring dan Scheduling berhasil?	
	Tangki	Wadah	Ya	Tidak
10:30	640	67,9	✓	-
16:15	521	64,8	✓	-
23:30	442	65,7	✓	-

Gambar 10. Kamera berhasil menangkap gambar dan menampilkannya di aplikasi secara *real-time*

IV. SIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah pemberian pakan kucing yang tidak teratur dan kurang optimal dengan mengembangkan prototipe sistem otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem yang dihasilkan mampu memberikan pakan kucing sesuai jadwal yang diatur dengan takaran yang tepat serta memantau aktivitas kucing secara *real-time* melalui aplikasi Android. Pengujian menunjukkan bahwa sensor *loadcell* yang digunakan pada tangki pakan memiliki tingkat akurasi sebesar 96,9% dan 98,8% pada wadah pakan, dengan rata-rata kesalahan masing-masing sebesar 3,1% dan 1,1%. Pada motor servo, persentase error saat membuka katup dan menutup katup adalah 5% dan 3,39%. Selain itu, sistem *monitoring* yang memungkinkan pemilik kucing memantau aktivitas kucing dan memantau ketersediaan atau sisa pakan yang ada pada tangki penyimpanan dan wadah pakan kucing melalui aplikasi berhasil berjalan secara *real-time*. Pengujian penjadwalan pakan pada tiga waktu berbeda dalam sehari juga berhasil dengan tingkat keberhasilan 100%, yaitu pakan keluar sesuai jadwal dan sesuai takaran. Secara keseluruhan, prototipe yang dibuat berhasil menjalankan fungsinya yakni dapat memberikan pakan kucing secara otomatis melalui sistem *scheduling*, dapat memantau ketersediaan pakan kucing melalui aplikasi yang dikembangkan, serta dapat memantau aktivitas kucing secara *real-time* dengan mengakses menu

monitoring pada aplikasi. Prototipe ini merupakan solusi berbasis IoT yang dapat meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas dalam merawat kucing peliharaan, khususnya memberikan kontribusi praktis bagi pemilik kucing dengan rutinitas padat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Khalid dan S. Dildar, "Effect of Pet Interaction on Stress Reduction and Positive Mood Enhancement among Pet-Owners and Non-Owners," *Hum Anim Interact Bull*, Des 2019, doi: 10.1079/hai.2019.0005.
- [2] T. W. O. Putri dan M. A. Darmawan, "Prototipe Sistem Kendali Jarak Jauh Pada Pakan dan Pintu Kandang Kucing," *SUTET*, vol. 12, no. 1, hlm. 21–30, Jun 2022, doi: 10.33322/sutet.v12i1.1664.
- [3] N. Anggraini, D. F. Rahman, L. K. Wardhani, dan N. Hakiem, "Mobile-based monitoring system for an automatic cat feeder using Raspberry Pi," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 18, no. 2, hlm. 1038, Apr 2020, doi: 10.12928/telkomnika.v18i2.14819.
- [4] H. N. Mariandayani, "Keragaman Kucing Domestik (*Felis domesticus*) berdasarkan Morfogenetik," *Jurnal Peternakan Sriwijaya*, vol. 1, no. 1, Jun 2014, doi: 10.33230/JPS.1.1.2012.1233.
- [5] A. B. Pradana, S. Jinan, A. Pramesti, dan J. T. Putra, "Rancangan Alat Pemberi Pakan Kucing Otomatis Dengan Mikrokontroler Berbasis Sensor Ultrasonik," *Infotronik: Jurnal Teknologi Informasi dan Elektronika*, vol. 6, no. 1, hlm. 42, Jun 2021, doi: 10.32897/infotronik.2021.6.1.668.
- [6] M. L. Tsabit, S. J. I. Ismail, dan A. Sularsa, "Perancangan Sistem Otomatisasi Pemberian Pakan Kucing Menggunakan Penjadwalan Berbasis Mikrokontroler," *Applied Science*, vol. 6, 2020.
- [7] N. Ramadhan dan R. Badarudin, "Rancang Bangun Alat Pemberi Makan Kucing Terjadwal Menggunakan Modul Rtc Berbasis Arduino," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 12, no. 3, Agu 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4529.
- [8] T. D. Hakim dan M. Hutagaol, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Alat Pakan Kucing Otomatis Dengan Arduino Mega 2560 Dan Motor Servo," *Jurnal Elektro*, vol. 12, no. 2, hlm. 159–165, 2024, Diakses: 12 Januari 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://repository.unkris.ac.id/id/eprint/3498>
- [9] W. T. Arifin Bisri, "Rancang Bangun Alat Pemberi Pakan Otomatis Terhadap Kucing Peliharaan Menggunakan Arduino Uno," *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 23, no. 1, hlm. 34, Jun 2021, doi: 10.24912/tesla.v23i1.9288.
- [10] Z. Zulkarnain, A. Andriana, dan A. Rosyada, "Pembuatan Prototipe Alat Pemberi Pakan Kucing Otomatis Berbasis Arduino Nano Dan Terintegrasi Dengan Handphone Via SMS," *Jurnal TIARSIE*, vol. 16, no. 2, hlm. 59, Agu 2019, doi: 10.32816/tiarsie.v16i2.58.
- [11] M. Rizal dan R. Pramudita, "Perancangan Alat Pemberi Pakan Kucing Otomatis Berbasis Iot Pada Sadewa Pet Care Bekasi".
- [12] M. Hafid Alfayed dan A. Sidiq Purnomo, "Prototipe Alat Pemberi Pakan Kucing Otomatis Berbasis Internet Of Things," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 8, no. 1, hlm. 937–944, Mar 2024, doi: 10.36040/jati.v8i1.8847.
- [13] S. Samsugi, Neneng, dan G. N. F. Suprpto, "Otomatisasi Pakan Kucing Berbasis Mikrokontroler Intel Galileo Dengan Interface Android," *Jurnal Sains Komputer dan Informatika*, vol. 5, no. 1, hlm. 143–152, 2021.
- [14] K. Kasmawaru, H. Husain, H. Herlinda, N. Nurdiansah, A. Ahmad, dan A. Asran, "Sistem Kendali Cerdas Pemberian Pakan Dengan Penerapan Internet Of Things," *JIKA (Jurnal Informatika)*, vol. 8, no. 3, hlm. 272, Jul 2024, doi: 10.31000/jika.v8i3.10828.
- [15] A. R. Harahap, D. Setiawan, dan E. F. Ginting, "Rancang Bangun Alat Pemberi Pakan Kucing Secara Otomatis Menggunakan Metode Penjadwalan Berbasis Nodemcu Esp8266 dan Android," *Jurnal Cyber Tech*, vol. 4, no. 8, 2021.
- [16] M. I. Saputro, A. Rivaldi, S. Sibuea, dan F. T. Julfia, "Alat Pemberi Makan Hewan Peliharaan Otomatis Berbasis Teknologi Internet of Things (IoT)," *Jurnal Teknologi Informatika dan Komputer*, vol. 6, no. 1, hlm. 62–71, Mar 2020, doi: 10.37012/jtik.v6i1.162.
- [17] S. Herlinda dkk., *Metodologi Penelitian*, 1 ed. Lembaga Penelitian Universitas Sriwijaya, 2010.
- [18] L. Moroney, *The Definitive Guide to Firebase*. Berkeley, CA: Apress, 2017. doi: 10.1007/978-1-4842-2943-9.

Navigasi Quadcopter Berbasis ArUco Marker dengan OpenCV

Taufiqul Hakim¹, Ardy Seto Priambodo¹

¹Departemen Teknik Elektro dan Elektronika, Universitas Negeri Yogyakarta; taufiqulhakim628@gmail.com

*Korespondensi: ardyseto@uny.ac.id

Abstract – *It is certain that companies engaged in the production of goods always monitor the stock of goods in the warehouse. Accuracy in calculating stock is needed to obtain accurate actual data. The use of human power to handle this is certainly not optimal if the stock of goods is at a certain height. With these conditions, a technology is needed that is able to overcome this, especially how the monitoring equipment can move from start to finish with certain height variations. Driven by technological advances, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) are now equipped with supporting devices that enable them to be completely controlled autonomously. In general, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) can be interpreted as an aerial vehicle that operates in the air like a quadcopter. Quadcopters are unmanned aircraft with four motors that allow them to take off and land vertically or what is usually called VTOL (Vertical Take-Off Landing). Utilizing a quadcopter can be a solution design that combines integrated automatic control. The method used in this research is the Engineering Design Process which includes exploring problems, considering solutions, design, development, testing and evaluation. In this research, four experiments were carried out with different trajectories and different altitudes according to the problems raised. There were four experiments and different altitude requests aimed at seeing the angle error and altitude error for each ArUco marker detection. The research results show that there are different angular errors and the smallest average angular error is 2.6°. There is also a difference in the altitude results in the 4th experiment from the demand figure, namely 3 meters. These results are influenced by wind disturbances that push the quadcopter body, the type of camera used, and telemetry as a data transmission medium.*

Keywords – *ArUco marker, tracking inventory, quadcopter*

Intisari – Perusahaan yang bergerak di bidang produksi barang sudah dipastikan selalu memantau stok barang di gudang. Keakuratan penghitungan stok barang sangat dibutuhkan untuk mendapatkan data aktual yang tepat. Pemanfaatan tenaga manusia untuk menangani hal tersebut tentu kurang maksimal jika keberadaan stok barang berada di ketinggian tertentu. Dengan kondisi tersebut, dibutuhkan suatu teknologi yang mampu mengatasi hal tersebut, terkhusus bagaimana alat pemantau dapat bergerak dari awal hingga akhir dengan variasi ketinggian tertentu. Didorong dengan kemajuan teknologi, UAV (*unmanned aerial vehicle*) kini sudah dilengkapi perangkat pendukung yang memungkinkan dapat sepenuhnya dikendalikan secara otonomi. Secara umum, UAV dapat diartikan sebagai sebuah wahana udara yang beroperasi di udara seperti halnya *quadcopter*. *Quadcopter* adalah pesawat tanpa awak dengan empat motor yang memungkinkan mereka untuk lepas landas dan mendarat secara vertikal atau biasa disebut dengan VTOL (*vertical take-off landing*). Pemanfaatan *quadcopter* dapat menjadi salah satu rancangan solusi dengan menggabungkan kendali otomatis yang terpadu. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Engineering Design Process* yang meliputi penggalan permasalahan, pertimbangan solusi, desain, pengembangan, uji coba, dan evaluasi. Pada penelitian ini dilakukan empat percobaan dengan lintasan yang berbeda dan ketinggian (*altitude*) yang berbeda sesuai dengan permasalahan yang diangkat. Adanya empat percobaan dan permintaan *altitude* yang berbeda bertujuan untuk melihat *error* sudut maupun *error altitude* pada setiap deteksi ArUco marker. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat *error* sudut yang berbeda dan didapatkan rerata *error* sudut paling kecil yakni di angka 2,6°. Terdapat juga perbedaan hasil *altitude* pada percobaan ke-4 dari angka permintaan yakni 3 meter. Hasil ini dipengaruhi oleh gangguan angin yang mendorong badan *quadcopter*, jenis kamera yang digunakan, dan telemetri sebagai media transmisi data.

Kata kunci – *ArUco Marker, tracking inventory, quadcopter*

I. PENDAHULUAN

Proses pemantauan kini sudah merambah ke berbagai bidang, dari yang sebelumnya tidak membutuhkan sistem otomasi hingga saatnya sekarang sudah membutuhkan sebuah sistem yang terpadu. Sehingga data pantauan dapat diakses secara *real-time* seperti perusahaan yang melakukan proses produksi. Perusahaan yang melakukan proses produksi sangat membutuhkan *tracking inventory* [1]. Perusahaan akan mengalami kesulitan saat menjalankan operasionalnya karena ketidakprofesionalan perusahaan dalam mengelola barang.

Perusahaan harus secara efektif melakukan peningkatan keamanan aset dan pengawasan. Semuanya, baik material maupun non-material, akan dihemat dengan sistem kerja efisien. Seperti yang terdapat di gudang milik IKEA yang memiliki tinggi di atas jangkauan manusia pada umumnya, hal ini akan menyulitkan proses *tracking inventory* [2]. Dengan hal ini diperlukan sebuah teknologi yang mampu menjangkau tempat-tempat yang sulit dijangkau manusia. Dalam hal akses ketinggian, *quadcopter* dapat menjadi salah satu solusi untuk membantu meningkatkan efisiensi monitoring aset perusahaan.

Quadcopter adalah pesawat tanpa awak dengan empat motor yang memungkinkan mereka untuk lepas landas dan mendarat secara vertikal atau biasa disebut dengan VTOL (*vertical take-off landing*) [3]. Setiap motor memiliki kecepatan yang berbeda, yang memungkinkan mereka untuk bermanuver. *Quadcopter* temuan pertama ini diberi nama Omnichen 2 setelah ditemukan oleh Etienne Mahakuasa pada tahun 1920. Penemuan pertama ini berhasil melakukan 1000 penerbangan dengan jarak maksimal 360 meter dari titik *home*. Dr. George E. Bothezat menciptakan Omnichen 2, yang mengubah *frame quadcopter* dari yang sebelumnya memiliki sayap menjadi yang sekarang [4].

Secara umum, UAV (*unmanned aerial vehicle*) dapat diartikan sebagai sebuah wahana udara yang beroperasi di udara. Didorong dengan kemajuan teknologi, UAV kini sudah dilengkapi perangkat pendukung yang memungkinkan dapat sepenuhnya dikendalikan secara *autonomous* [5]. Dewasa ini, peningkatan sistem *autonomous* UAV digunakan pada sistem wahana dengan tipe *rotary-wing*, salah satunya yakni *quadcopter* [6]. Saat ini sudah terdapat sistem otomatis dari *quadcopter* ditandai dengan banyaknya modul pemrograman sehingga memungkinkan menggerakkan *quadcopter* berdasarkan parameter yang sudah diatur [7].

ArUco *marker* dapat dimanfaatkan untuk mengendalikan robot, seperti *quadcopter* karena memiliki ID khusus, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pemandu gerakan suatu robot. ArUco *marker* adalah repositori atau tempat penyimpanan simbol berbentuk *marker* yang umum digunakan untuk aplikasi AR (*augmented reality*) berbasis OpenCV [8]. Dikarenakan sudah banyak digunakan dan terdapat banyak referensi, pada penelitian ini digunakan ArUco *Marker* sebagai objek deteksi agar mempermudah jalannya proses penelitian.

OpenCV merupakan modul pemrograman *open source* yang dapat memproses gambar hingga *computer vision*. OpenCV memiliki modul pemrograman yang dikhususkan untuk mengontrol *quadcopter* yakni DroneKit. DroneKit mendukung berbagai gerakan terbang *quadcopter* seperti *hovering*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Dengan alasan tersebut, library OpenCV digunakan dalam penelitian.

Pada *quadcopter* terdapat beberapa macam gerakan yaitu *hovering*, *roll*, *pitch*, dan *yaw* [9]. Semua pergerakan *quadcopter* dipengaruhi oleh torsi motor, kecepatan putaran motor, dan momen pada *frame quadcopter* [5]. Gerakan inilah yang akan diperintahkan dari ArUco *marker* sehingga dapat berjalan sesuai dengan misi terbang yang seluruhnya sudah disediakan oleh OpenCV.

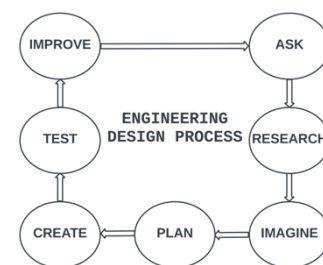
Pada penelitian ini, *quadcopter* akan membaca ArUco *marker* yang diletakan pada lantai sehingga dapat berjalan secara *autonomous* dengan dipandu gerakannya lewat ArUco *marker* dan dapat dimonitoring jarak jauh dengan memanfaatkan video *streamer*. Pada penelitian ini akan dilihat parameter-parameter yang akan dievaluasi dari penggunaan *quadcopter* jenis *outdoor* dan penggunaan OpenCV baik dari performa terbang atau performa program

sehingga didapatkan navigasi terbang *quadcopter* yang maksimal.

II. METODOLOGI

Metode *Engineering Design Process* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 digunakan dikarenakan lebih rinci pada setiap prosesnya. Tahapan pada *Engineering Design Process* sangat melekat pada penelitian-penelitian di bidang teknik yang akan membangun sebuah prototipe. Dengan hal itu, metode *Engineering Design Process* digunakan sebagai landasan perencanaan penelitian.

Tahap perencanaan dilakukan dengan menganalisis kebutuhan *hardware* dan *software*. Kebutuhan *hardware* meliputi perencanaan elektronik dan mekanik. Sedangkan kebutuhan *software* meliputi perencanaan *software* yang akan digunakan dalam pembangunan prototipe baik berupa aplikasi, *firmware*, *library*, hingga algoritma pemrograman.

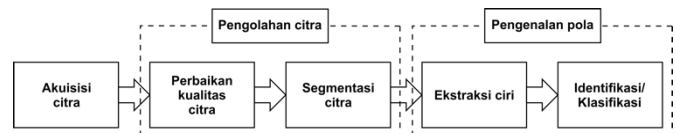


Gambar 1. Metode Penelitian *Engineering Design Process*

A. OpenCV

OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) adalah *library computer vision*. OpenCV dibangun untuk menyediakan infrastruktur umum pada aplikasi *computer vision* [10]. *Computer vision* bekerja dengan menggunakan kemampuan penglihatan manusia untuk melihat dan menganalisis visual [11]. Dengan *library* OpenCV memungkinkan untuk mengolah gambar.

Pengolahan citra (*image processing*) merupakan bidang yang erat kaitannya dengan proses transformasi citra/gambar [12]. Diagram pada Gambar 2 merupakan langkah-langkah yang umumnya dilakukan dalam merancang sebuah sistem *computer vision* [13].



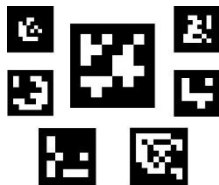
Gambar 2. Tahapan *computer vision*

Diagram yang ditunjukkan pada Gambar 2 merupakan tahapan *image processing* yang berisi 2 tahapan yakni pengolahan citra dan pengenalan pola. Pada tahap awal citra diperbaiki untuk mendapatkan hasil yang baik sehingga dapat dilakukan pengenalan pola. *Computer vision* digunakan dalam penelitian ini dikarenakan terdapat tahapan pengenalan

pola sehingga mampu mengenali objek deteksi dengan pola yang berbeda.

B. ArUco Marker

ArUco *marker* adalah *marker* kotak sintetik yang disusun oleh garis tepi hitam lebar dan matriks biner bagian dalam yang membentuk suatu bentuk kode sehingga dapat menentukan pengidentifikasi (ID) [14].



Gambar 3. ArUco *marker*

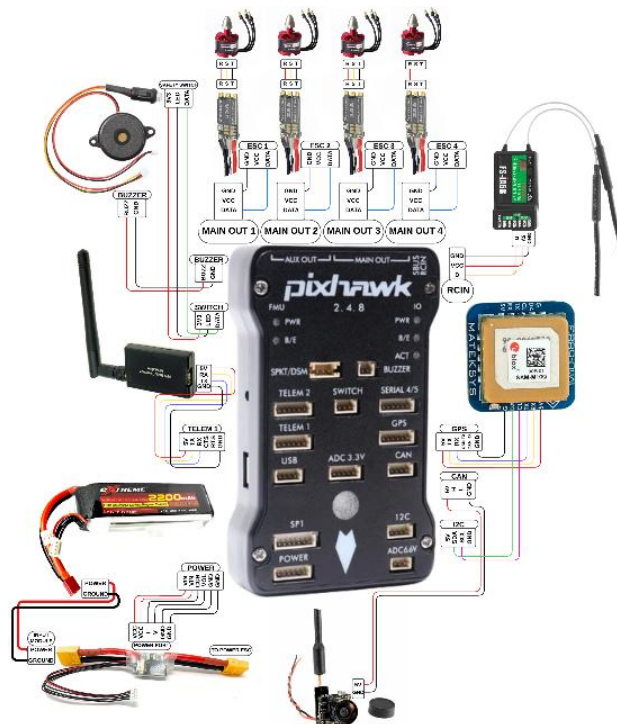
ArUco *marker* memiliki banyak keunggulan, seperti mudah dibuat, mendeteksi dengan cepat, dan berfungsi dalam berbagai kondisi pencahayaan [15]. Seperti yang terlihat pada Gambar 3, ArUco *marker* memiliki banyak bentuk piksel bergantung pada ID yang dimiliki. ArUco *marker* sering digunakan dalam proyek AR, robotika, dan aplikasi berbasis visi. Untuk menggunakan ArUco *marker*, biasanya diperlukan dua komponen: perangkat lunak pengolahan gambar yang dapat menginterpretasikan informasi dari *marker* dan kamera yang dapat mendeteksi dan mengenali *marker* melalui program yang sudah dituliskan.

C. Perencanaan Hardware

1) *Rancangan Elektronik*: Gambar 4 menunjukkan rangkaian komponen elektronik yang menggunakan FC (*flight controller*) jenis PIXHAWK 2.4.8. FC ini digunakan sebagai pengontrol quadcopter dan akan mengeluarkan perintah untuk menyesuaikan kecepatan motor dengan menggunakan PID yang sudah dikonfigurasi [16]. Untuk kebutuhan navigasi, digunakan GPS dengan tipe MQ10 dari MATEKSYS. Data yang didapatkan dari GPS adalah di antaranya *latitude*, *longitude*, dan *altitude* sebagai acuan gerakan *quadcopter* sehingga dapat menyelesaikan suatu misi [17].

Quadcopter pada penelitian ini menggunakan 4 motor dengan konfigurasi bentuk *frame* yakni Quad-X. Konfigurasi *frame* X dinilai lebih stabil daripada jenis *frame* lainnya [18]. Karena terdapat 4 motor, maka digunakan juga empat buah ESC (*electronic speed controller*) sebagai pengontrol kecepatan motor. ESC bekerja dengan mengirim sinyal ke motor dengan menerima sinyal PWM dari FC [19].

Digunakan telemetri sebagai pengirim dan penerima data baik dari *ground control* maupun wahana. Prototipe ditenagai oleh baterai Li-Po 2200 mAh 4s untuk menyuplai daya pada semua komponen elektronik. Setiap sel baterai Li-Po memiliki tegangan 3.75V [18]. Sebagai indikator status yang dimiliki FC, digunakan *buzzer* untuk memberikan informasi status dalam bentuk bunyi. Daftar komponen elektronik seperti pada Tabel 1.

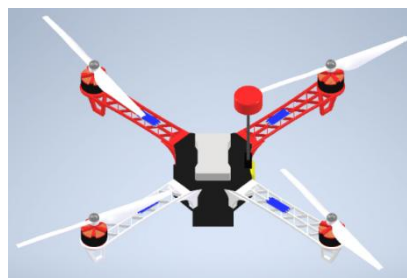


Gambar 4. Rangkaian komponen elektronik

Tabel 1. Daftar komponen elektronik

No.	Nama Komponen
1	Pixhawk 2.4.8
2	ESC CYCLONE 35A
3	Motor READYTOSKY 2212 920KV
4	GPS M10Q
5	Baterai 4s 2200mAh
6	FS-I6 dan FS-IA6B RC
7	Micro camera
8	Telemetry 433MHz

2) *Rancangan Mekanik*: Rancangan mekanik terdiri dari 2 perencanaan yakni desain *quadcopter* dan objek deteksi dalam hal ini adalah ArUco *marker*.

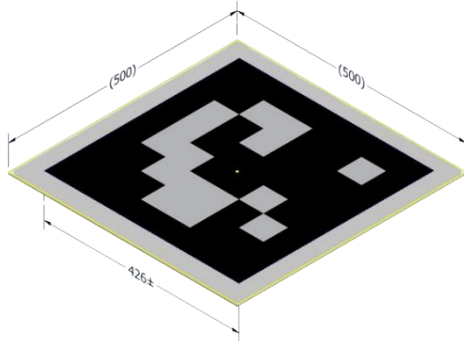


Gambar 5. Desain *quadcopter* F450

Desain pada Gambar 5 merupakan gambaran *quadcopter* dengan konfigurasi Quad-X yang memiliki 4 *propeller* dengan 2 arah putar CW (*clockwise*) dan CCW (*counterclockwise*) [20]. Terdapat perbedaan warna di kedua sisi yakni sisi merah dan putih. Peletakan warna yang berbeda

ini bertujuan untuk mempermudah membaca *heading*/arah *quadcopter*.

Dibutuhkan juga desain objek deteksi sebagai acuan dalam pembuatan prototipe. Objek deteksi menggunakan ArUco *marker* dengan ID yang berbeda. *Marker* membutuhkan alas sehingga membuatnya mampu menopang *quadcopter* ketika *take-off* dan *landing*.

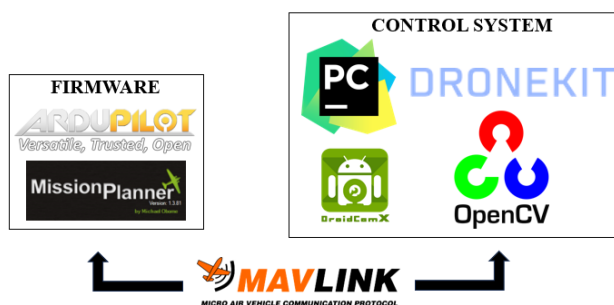


Gambar 6. Desain objek deteksi (ArUco marker)

Desain objek deteksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 menggunakan alas berjenis *impraboard* dengan ukuran 50 cm x 50 cm. Sedangkan untuk *marker* berukuran 40 cm agar dapat terbaca di ketinggian.

D. Perencanaan Software

Perancangan *software* terbagi menjadi 2 bagian yakni *firmware* dan *control system*. Gambar 7 merupakan pembagian perencanaan *software*.



Gambar 7. Daftar kebutuhan *software*

Pembagian yang ditunjukkan pada Gambar 7 ini bertujuan untuk memudahkan proses analisis kebutuhan *software*. *Quadcopter* pada penelitian ini menggunakan *firmware* ArduPilot. ArduPilot adalah perangkat *open source* yang memungkinkan pengguna mengonfigurasi sistem agar berjalan secara mandiri [17]. Ardupilot dipilih dikarenakan dapat didukung oleh *library* DroneKit yang berfungsi untuk memberikan perintah gerakan *quadcopter* seperti *roll*, *pitch*, *yaw*, *throttle*, dll. [21]. Sedangkan untuk kebutuhan pemrosesan *image detection*, dalam penelitian ini digunakan OpenCV dikarenakan memiliki modul ArUco sendiri dan menggunakan konsep *computer vision* dalam pemrosesan video.

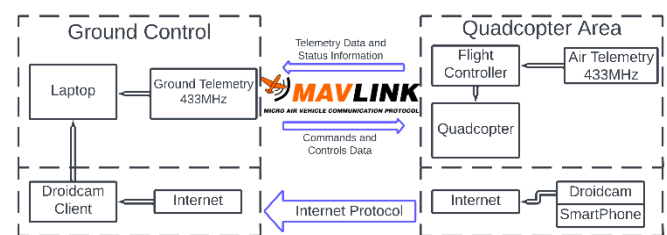
Penulisan program dan konfigurasi *library* digunakan PyCharm sebagai *text editor* pemrograman. PyCharm dipilih dikarenakan memiliki alur konfigurasi yang mudah seperti pengaturan Python *interpreter*, *library*, modul, dll [22].

Dikarenakan sistem *autonomous* pada penelitian ini dikontrol di *ground system*, maka dibutuhkan pengiriman data video dari wahana ke *ground system* agar dapat diolah. Pada penelitian ini digunakan video *streamer* DroidCam. DroidCam digunakan karena memiliki konfigurasi yang mudah dan hanya menggunakan internet sebagai protokol pengiriman data video.

Kedua bagian tersebut dihubungkan oleh suatu protokol komunikasi yakni MAVLink. MAVLink (*Micro Air Vehicle Link*) merupakan salah satu protokol komunikasi yang sering digunakan dalam pembangunan sistem tanpa awak tak terkecuali pengembangan *quadcopter* [23]. MAVLink bekerja dengan mengubah struktur informasi ke dalam bentuk biner dan kemudian diteruskan dalam bentuk baris *transport* yang ada pada jaringan [19].

E. Integrasi Sistem

Integrasi sistem merupakan rancangan penggabungan semua komponen yang akan saling berkomunikasi dengan bertukar atau mengirimkan data.



Gambar 8. Integrasi sistem

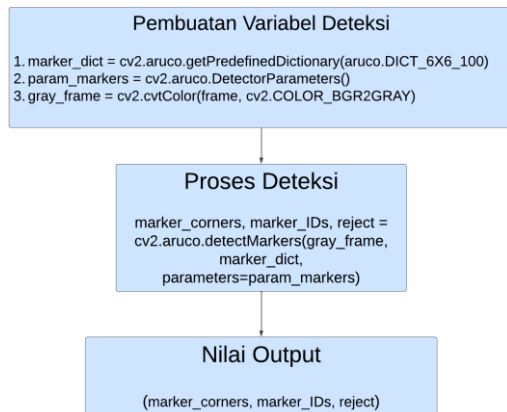
Terdapat 2 bagian desain integrasi sistem berdasarkan protokol komunikasinya. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, pada sisi atas menghubungkan antara *ground control* dan wahana/*quadcopter area* dengan menggunakan protokol MAVLink untuk kebutuhan pengiriman perintah gerakan dari *ground control* ke wahana ataupun permintaan data dari wahana. Sedangkan pada sisi bawah menghubungkan *ground control* dengan wahana untuk kebutuhan pengiriman video dari wahana ke *ground control*.

F. Konsep Deteksi ArUco Marker

1) *Deklarasi Program*: Deteksi ArUco *marker* dapat dilakukan dengan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan *library* Opencv. Gambar 9 merupakan tahapan konsep deteksi ArUco *marker* dari sisi penulisan program.

Proses deteksi ArUco *marker* memerlukan tiga parameter/variabel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Parameter dan contoh *output* dapat dilihat pada Tabel 2. Parameter “*marker_dict*” digunakan untuk menyatakan *library* ArUco *marker* yang digunakan. Parameter “*param_markers*” digunakan untuk mendeteksi parameter yang dibutuhkan seperti data koordinat. Sedangkan

“gray_frame” digunakan untuk membuat tangkapan video menjadi berwarna dengan skala *gray* sesuai tingkat kepekatan warna *marker* saat ditangkap. Parameter-parameter ini kemudian dijadikan bahan untuk proses deteksi dimulai.



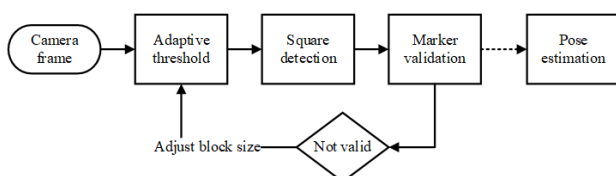
Gambar 9. Alur deteksi objek dalam deklarasi program

Tabel 2. Parameter dan contoh output

Parameter	Contoh Output
Marker_dict	Library ArUco (6x6, 4x4, dll)
Param_markers	Koordinat x dan y (0.0 ; 1.0)
Gray_frame	Oalah gambar yang sudah diubah menjadi “gray”

Ketika pada tahap proses deteksi sudah berjalan, maka akan menghasilkan tiga nilai yang disimpan pada masing-masing variabel yakni “marker_corners” (nilai *corners* berisi data koordinat x dan y dari ArUco *marker* yang telah terdeteksi), “marker_ids” (data ids yakni id yang dimiliki objek ArUco *marker* yang dideteksi), dan “reject” (Nilai *rejected* adalah sekumpulan data yang akhirnya ditolak karena datanya tidak dapat diuraikan).

2) *Tahap Image Processing*: Untuk objek memungkinkan terdeteksi dan menghasilkan beberapa nilai diperlukan pemrosesan gambar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 yakni terdapat tahap *thresholding*, *contour filtering*, *bits extraction*, dan *marker identification*.

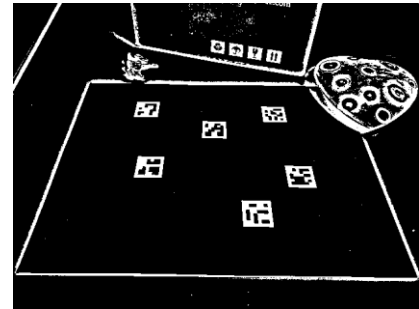


Gambar 10. Tahapan *image processing*

Untuk objek memungkinkan terdeteksi dan menghasilkan beberapa nilai diperlukan pemrosesan gambar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10 yakni terdapat tahap *thresholding*, *contour filtering*, *bits extraction*, dan *marker identification*.

• *Thresholding*

Thresholding merupakan tahapan segmentasi citra yang berfungsi untuk memisahkan antara objek dengan *background* dengan tingkat kecerahan warna berbeda [24], seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Untuk memungkinkan objek dalam hal ini ArUco *marker* dapat terbaca dan memberikan *return value*.



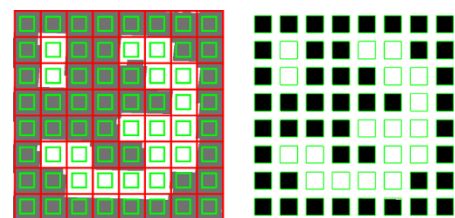
Gambar 11. *Thresholding*

• *Contour Filtering*

Kontur adalah kurva yang menghubungkan suatu titik yang memiliki entitas sama. Setelah *thresholding*, didapatkan hasil sekumpulan titik putih dan hitam yang membentuk pola. Pada tiap titik inilah yang akan digunakan dalam pemrosesan dan akan membuang suatu kontur yang tidak terpakai dalam hal ini suatu titik yang tidak membentuk pola.

• *Bits Extraction*

Bit extraction adalah mengekstraksi kontur yang berwarna putih apakah termasuk ke dalam penanda atau tidak. Pada hasil *thresholding*, hasil gambar akan diberikan sel guna proses ekstraksi.



Gambar 12. Contoh *bits extraction*

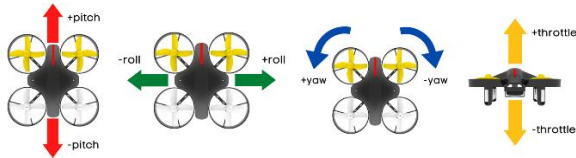
Pada tiap sel seperti yang ditunjukkan Gambar 12, warna hitam dan putih akan dihitung untuk menentukan nilai bit yang ditetapkan ke sel. Pada tahap ini telah dihasilkan nilai bit yang kemudian akan diidentifikasi sesuai dengan kamus ArUco *marker* yang digunakan pada program.

• *Marker Identification*

Tahap ini berisi dengan proses pemeriksaan kode tiap sel yang sebelumnya sudah diekstraksi disesuaikan dengan kamus yang sudah dideklarasikan dan akan menghasilkan id yang terdeteksi.

G. Konsep Gerak Quadcopter Terhadap Letak ArUco Marker

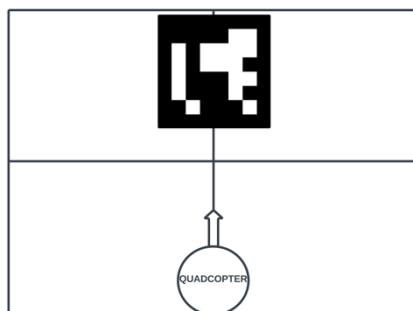
Quadcopter dapat terbang dengan beberapa kode perintah yang berbeda yakni *take-off*, *yaw*, dan *position* target. *Position* target akan membuat *quadcopter* dapat melakukan gerak *roll* dan *pitch* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Pada penelitian ini digunakan *library* DroneKit dikarenakan memiliki penulisan program yang sederhana dan lengkap.



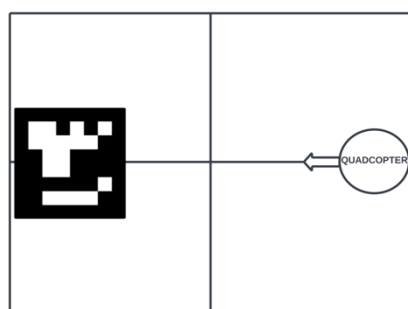
Gambar 13. Macam-macam gerakan *quadcopter*

Dengan menggunakan *function* “*send_body_ned_velocity*” yang didapat dari *library* DroneKit, terdapat 3 hal yang perlu diperhatikan yakni data X, Y, dan Z. Semua data ini dijadikan nilai ketika pemanggilan *function* di atas kemudian dimasukkan pada parameter yang ada di dalam *function* tersebut. Dalam *function* tersebut terdapat 3 parameter yang dapat diatur yakni “*velocity_x*” berperan untuk membuat *quadcopter* bergerak *pitch*, “*velocity_y*” berperan untuk membuat *quadcopter* bergerak *Roll*, dan “*velocity_z*” berperan untuk mengatur *throttle quadcopter*.

Letak objek deteksi pada Gambar 14 terletak di arah depan *quadcopter*. Hal ini mengharuskan *quadcopter* berjalan maju agar dapat memosisikan tubuhnya tepat di atas objek deteksi. Dikarenakan membutuhkan gerakan maju, maka parameter yang diatur yakni “*velocity_x*” untuk memberikan gerakan *pitch* pada *quadcopter*.



Gambar 14. Konsep *tracking* gerak maju



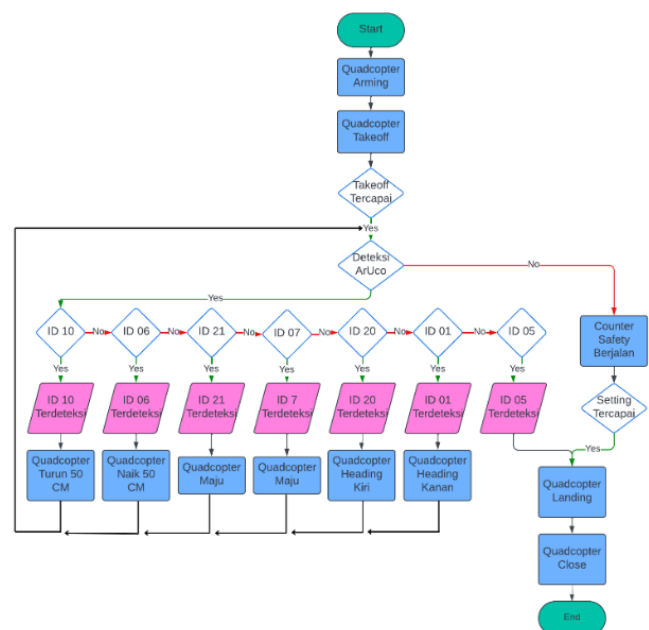
Gambar 15. Konsep *tracking* gerak ke kiri

Letak objek deteksi pada Gambar 15 terletak di arah sisi kiri *quadcopter*. Hal ini mengharuskan *quadcopter* berjalan ke kiri agar dapat memosisikan tubuhnya tepat di atas objek deteksi. Dikarenakan membutuhkan gerakan ke kiri, maka parameter yang diatur yakni “*velocity_y*” untuk memberikan gerakan *roll* pada *quadcopter*.

H. Flowchart Misi Terbang Quadcopter

Pada penelitian ini menggunakan 7 ArUco marker dengan ID yang berbeda. Masing-masing ArUco marker memiliki perintah tersendiri yang akan menggerakkan *quadcopter* sehingga dapat menyelesaikan misi. Pada penelitian ini juga ditanamkan sebuah fitur keamanan agar lebih aman dalam proses penelitian.

Selain pada gerakan yang diatur pada konsep *tracking* sebelumnya, dalam penelitian ini juga memungkinkan *quadcopter* dapat berbelok arah hingga menurunkan dan menaikkan ketinggian dari *quadcopter* itu sendiri. Hampir semua gerakan dasar *quadcopter* digunakan dalam penelitian agar didapatkan analisis yang lebih banyak dari tiap gerakannya.



Gambar 16. Flowchart misi *quadcopter*

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16, sebelum membaca objek deteksi, *quadcopter* akan *arming* terlebih dahulu dan *take-off*. Setelah *take-off* di ketinggian yang ditentukan, kamera akan terbuka dan akan mulai membaca objek deteksi dalam hal ini adalah ArUco marker. Jika salah satu dari tujuh marker terbaca, maka *quadcopter* akan melakukan sesuai yang diperintahkan. Namun, jika tidak terbaca marker, *quadcopter* masuk dalam mode *safety* dan akan terus berjalan ke depan hingga *setting counter safety* tercapai yang kemudian akan *Landing* secara otomatis. Saat mendeteksi marker, *quadcopter* akan memosisikan dirinya yang membuat ArUco marker berada di tengah *frame*. Hal ini

bertujuan untuk menjaga *quadcopter* agar tetap berada di lintasan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengembangan merupakan sebuah produk yang telah dihasilkan baik berupa *hardware* maupun *software* yang telah melewati proses perencanaan, identifikasi, analisis, dan evaluasi. Pengembangan *hardware* dan elektronik menghasilkan *quadcopter* dan objek deteksi seperti pada Gambar 17 yang sebelumnya sudah didesain. Komponen kelistrikan *quadcopter* telah terpasang pada *frame* F450 yang kemudian dapat dilakukan *flash firmware* dan pengujian.



Gambar 17. Hasil pengembangan

Objek *ArUco marker* dibuat dengan kertas asturo yang memiliki kepekatan warna hitam yang lebih gelap. Pemilihan kertas ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas deteksi. Objek disusun dengan ukuran 40 cm x 40 cm dengan bidang alas berukuran 50 cm x 50 cm.

A. Uji Komponen Elektronik

Uji komponen elektronik dilakukan pada semua komponen. Dari pengujian didapatkan bahwa semua komponen mampu bekerja dalam keadaan baik kecuali telemetri dan *micro camera*. Berikut merupakan hasil pengujian dari 2 komponen tersebut.

1) *Telemetry*: Telemetri memiliki dua buah lampu indikator yakni lampu hijau dan merah. Lampu hijau mengindikasikan koneksi sedangkan lampu merah mengindikasikan pengiriman data.



Gambar 18. Status koneksi telemetri *ground*

Pada Gambar 18 merupakan telemetri *ground* yang menunjukkan lampu hijau menyala terus menerus. Terdapat 2

bagian telemetri yakni *Ground* dan *Air*. Hidupnya lampu hijau ini menandakan koneksi telemetri sudah berhasil.



Gambar 19. Pembacaan kualitas koneksi telemetri

Kualitas koneksi telemetri dapat dilihat yang ditunjukkan pada panah merah di Gambar 19. Semakin jauh jarak wahana dengan GCS, maka semakin buruk kualitas koneksi yang dimiliki. Tabel 3 merupakan data pengujian telemetri.

Tabel 3. Hasil uji kualitas koneksi telemetri

Jarak (meter)	Hasil
1	100%
2	100%
3	99%
4	98%
5	97%
6	36%
10	20%

Tabel 3 menunjukkan bahwa pada jarak 6 meter, kualitas koneksi telemetri sudah turun. Ini mengartikan bahwa jarak aman telemetri agar dapat berkomunikasi dengan baik di angka 5 meter.

Adapun persentase nilai koneksi telemetri dapat berubah-ubah sehingga menyebabkan pengiriman data tidak konsisten. Dengan nilai uji ini digunakan dalam pengembangan penelitian sehingga dapat berjalan sesuai dengan judul penelitian.

2) *Kamera*: Pengujian dilakukan pada siang hari yang memiliki intensitas cahaya maksimal. Pengujian kamera ditujukan untuk mempersiapkan prototipe dapat bergerak mengikuti perintah *ArUco marker*.



Gambar 20. Pengujian *micro camera*

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 20, pengujian dihasilkan bahwa kamera berjenis *micro camera* yang dipakai dalam penelitian ini tidak mampu membaca ArUco marker dengan baik sehingga dilakukan analisis lanjutan untuk mencari solusi dalam permasalahan tersebut.



Gambar 21. Pengujian kamera *smartphone*

Dari penggunaan kamera *smartphone* dan pemanfaatan aplikasi DroidCam, didapat hasil deteksi yang cukup baik seperti Gambar 21. Namun terdapat keterlambatan pengiriman video yang mengakibatkan sedikit terganggunya proses Bergeraknya *quadcopter* dalam mendeteksi ArUco marker. Dengan hal ini, digunakanlah kamera *smartphone* untuk menangkap video objek deteksi.

Pengujian komponen elektronik didasarkan untuk melihat hasil dari ketepatan kalibrasi yang sudah dilakukan sebelumnya. Komponen yang tidak terkalibrasi dengan baik akan berpengaruh besar pada jalannya penelitian. Masing-masing komponen memiliki peranan penting untuk membangun *quadcopter* bekerja dengan baik. Dari hasil uji memperlihatkan bahwa beberapa komponen terdapat kekurangan yang akan mempengaruhi hasil penelitian seperti telemetri dan kamera.

B. Uji Software

Pengujian *software* mencakup semua hal yang berkaitan dengan *firmware* yang dipakai pada *quadcopter*. Pengujian *software* bertujuan untuk melihat kesiapan berjalannya proses penelitian. berikut merupakan hasil pengujian *software* secara rinci.

1) **Uji Koneksi GCS:** Koneksi dengan GCS dilakukan menggunakan 2 cara yakni menggunakan kabel dan telemetri. Koneksi dengan GCS dapat dilakukan dengan menekan tombol *connect* pada tampilan awal *Mission Planner*. Indikator terkoneksi dengan GCS akan ditampilkan seperti Gambar 22. Pada tampilan *home Mission Planner* terdapat beberapa informasi seperti posisi *accel* hingga *altitude quadcopter*.



Gambar 22. Pengujian koneksi GCS

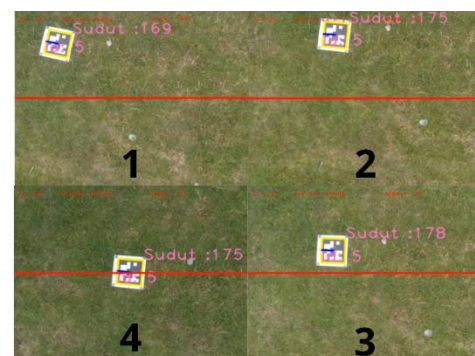
2) **Uji Deteksi ArUco Marker:** Pengujian ditujukan untuk melihat kesiapan kamera terhadap jarak deteksi. Dengan hal ini, jarak batas aman deteksi yakni 400 cm. Jika *quadcopter* di bawah batas aman, maka *quadcopter* dapat mendeteksi ArUco marker dan berjalan sesuai dengan perintah yang diberikan hingga jarak 50 cm dari objek deteksi seperti hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Hasil uji deteksi objek (ArUco marker)

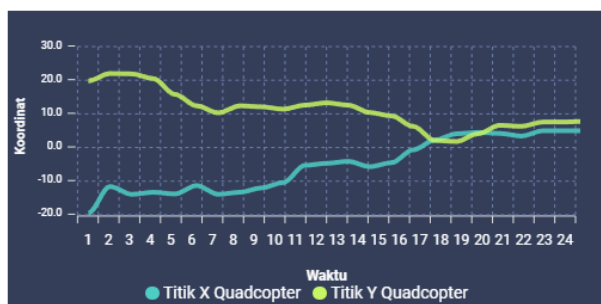
No.	Jarak Kamera (cm)	Hasil
1	50	Tidak Terdeteksi ID
2	100	Terdeteksi ID
3	150	Terdeteksi ID
4	200	Terdeteksi ID
5	250	Terdeteksi ID
6	300	Terdeteksi ID
7	350	Terdeteksi ID
8	400	Terdeteksi ID

C. Hasil Tracking Quadcopter Terhadap Letak ArUco Marker

Jika digabungkan kedua konsep yakni gerakan *pitch* dan *roll* seperti yang sudah dipaparkan pada bagian metodologi, maka bisa didapatkan hasil seperti Gambar 23. Terlihat mulai dari gambar 1 ke gambar 4, posisi objek deteksi berjalan menuju ke sisi tengah. Ini mengartikan bahwa *quadcopter* dapat memosisikan badannya tepat di atas objek deteksi.



Gambar 23. Hasil tracking *quadcopter*

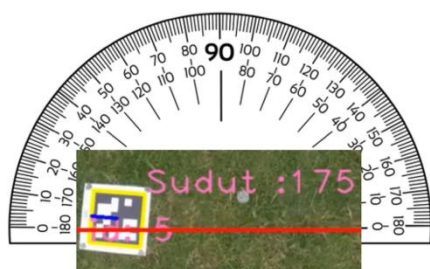


Gambar 24. Grafik koordinat X dan Y quadcopter

Jika *quadcopter* mampu *tracking* objek dan mengkoreksi posisinya, maka didapatkan grafik seperti Gambar 24. terlihat bahwa kedua titik yakni X dan Y yang mewakili posisi *quadcopter* cenderung mendekati titik 5. Nilai 5 ini merupakan titik tengah yang dimiliki oleh objek deteksi. Dengan ini, *quadcopter* sudah siap untuk berjalan sesuai misi dengan perintah yang diberikan oleh ArUco marker.

D. Uji Misi

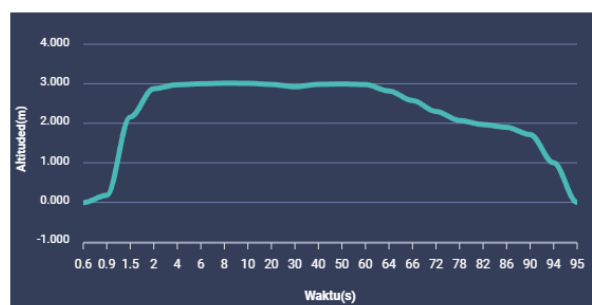
Pengujian dilakukan dengan beberapa variasi penempatan ArUco marker untuk membandingkan hasil antar lintasan. Dikarenakan jenis *quadcopter* yang dipakai adalah tipe *outdoor*, maka terdapat gangguan dari luar seperti angin yang akan mempengaruhi hasil penelitian. Angin yang berhembus kencang dan mengenai badan *quadcopter* akan sangat berpengaruh terhadap posisi dan *heading* *quadcopter*. Maka dari itu, salah satu parameter yang dianalisis adalah terkait dengan *heading* *quadcopter*.



Gambar 25. Pembacaan sudut dengan garis sumbu

Gambar 25 merupakan acuan pembacaan garis sumbu pada *frame* dan *heading* *quadcopter*. Garis sumbu merah merupakan sumbu *frame* dan garis sumbu biru merupakan garis *heading* *quadcopter*. *Heading* dijadikan sebagai parameter analisis dikarenakan dalam penerapan di dalam gudang diperlukan *quadcopter* yang dalam kondisi normal. Pengaruh dapat terjadi karena faktor eksternal seperti angin maupun faktor internal seperti komponen terutama sensor yang dalam hal ini adalah kompas.

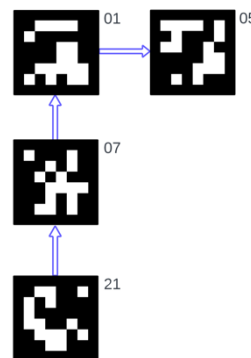
Dalam gambar tersebut terlihat bahwa garis sumbu berwarna biru lebih dominan mengarah pada sudut 175° . Pada gambar tersebut juga terlihat hasil deteksi sudut yang menghasilkan sudut 175° . Dengan hal ini, maka deteksi sudut yang dihasilkan dari penelitian masih dalam batas aman.



Gambar 26. Grafik altitude quadcopter

Persiapan uji data selain sudut ialah stabilitas *altitude* yang dimiliki oleh *quadcopter*. Dalam menjalankan misi, stabilitas nilai *altitude* menjadi salah satu kunci keberhasilan. Pada grafik Gambar 26 menunjukkan bahwa setelah *take-off* yakni pada ketinggian 0 sampai 3 meter, *quadcopter* memiliki nilai *altitude* yang cukup stabil. Pada titik 60s, *Quadcopter* memulai untuk *landing*. Dari titik tersebut, grafik sudah menurun dengan stabil sembari *quadcopter* mengoreksi posisinya. Adanya koreksi posisi terlihat pada titik 78s yang memiliki nilai *altitude* cenderung landai. Ketika *quadcopter* sudah memosisikan dan masuk dalam *threshold*, *quadcopter* akan melanjutkan proses *landing* hingga pada ketinggian 0 meter.

1) *Lintasan Ke-1*: Pada percobaan pertama dengan menggunakan lintasan pada Gambar 27, *quadcopter* dapat melewati seluruh ArUco marker hingga *landing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28. Pada setiap marker yang dilewati dan ditunjukkan hasil pengujian pada Tabel 5, posisi *heading* *quadcopter* memiliki error sudut di angka 1° - 11° .



Gambar 27. Lintasan ke-1

Error sudut ini dapat terjadi dikarenakan gangguan eksternal di lapangan yakni angin. Hal ini ditegaskan dengan tidak konsistennya *heading* *quadcopter* pada tiap terdeteksinya ArUco marker. Terdapat *error* sudut yang lebih besar pada saat *landing* yakni -11° . *Error* sudut yang besar ini mempengaruhi kualitas *landing* *quadcopter* yang hanya menyentuh 1 kaki *quadcopter* pada area marker seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28.

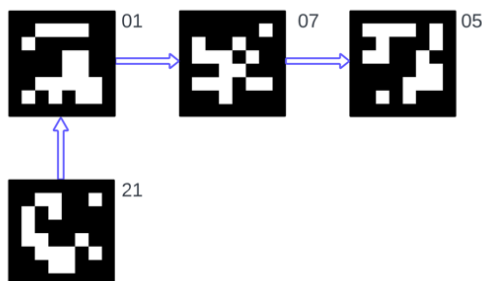


Gambar 28. Hasil landing percobaan ke-1

Tabel 5. Hasil pembacaan sudut percobaan ke-1

ID	Gerakan Yang Diminta	Sudut
21	Maju	+2°
07	Maju	+1°
01	Belok Kanan	-8°
05	Landing	-11°
Rata-rata Error Sudut		5,5°

2) *Lintasan Ke-2*: Pada percobaan kedua dengan menggunakan lintasan pada Gambar 29, *quadcopter* dapat melewati seluruh ArUco marker hingga landing seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30. Pada setiap marker yang dilewati dan ditunjukkan hasil pengujian pada Tabel 6, posisi heading *quadcopter* memiliki error sudut di angka 1°-10°.



Gambar 29. Lintasan ke-2



Gambar 30. Hasil landing percobaan ke-2

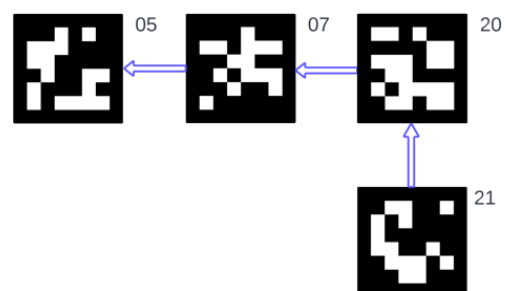
Tabel 6. Hasil pembacaan sudut percobaan ke-2

ID	Gerakan Yang Diminta	Sudut
21	Maju	+1°
01	Belok Kanan	-5°
07	Maju	-11°
05	Landing	-10°
Rata-rata Error Sudut		6,75°

Error sudut ini dapat terjadi dikarenakan gangguan eksternal di lapangan yakni angin. Hal ini ditegaskan dengan tidak konsistennya heading *quadcopter* pada tiap terdeteksinya ArUco marker. Terdapat *error* sudut yang lebih besar pada saat landing yakni -10°. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 30, walaupun dengan sudut yang masih besar, lebih dari setengah badan *quadcopter* dapat masuk ke dalam ArUco marker. Hasil landing pada percobaan kedua lebih baik daripada percobaan pertama. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya tekanan angin, pengiriman data video, dan pengiriman data telemetri yang kurang baik.

3) *Lintasan Ke-3*: Pada percobaan ketiga dengan menggunakan lintasan pada Gambar 31, *quadcopter* dapat melewati seluruh ArUco marker hingga landing seperti yang ditunjukkan pada Gambar 32. Pada setiap marker yang dilewati dan ditunjukkan hasil pengujian pada Tabel 7, posisi heading *quadcopter* memiliki error sudut di angka 0°-8°.

Error sudut ini dapat terjadi dikarenakan gangguan eksternal di lapangan yakni angin. Hal ini ditegaskan dengan tidak konsistennya heading *quadcopter* pada tiap terdeteksinya ArUco marker. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 32, walaupun dengan sudut yang masih besar, lebih dari setengah badan *quadcopter* dapat masuk ke dalam ArUco marker. Hasil landing pada percobaan ketiga hampir serupa dengan percobaan kedua. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya tekanan angin, pengiriman data video, dan pengiriman data telemetri yang kurang baik. Namun, pada percobaan ketiga memiliki *error* sudut yang lebih kecil yakni tidak lebih dari 8°.



Gambar 31. Lintasan ke-3

Gambar 32. Hasil *landing* percobaan ke-3

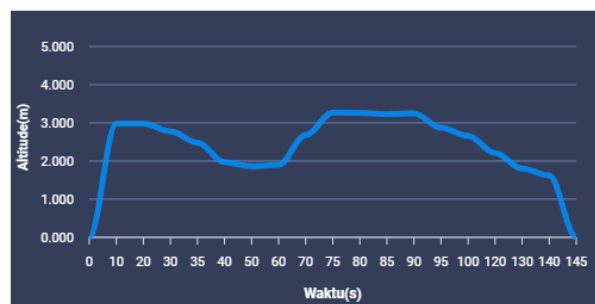
Tabel 7. Hasil pembacaan sudut percobaan ke-3

ID	Gerakan Yang Diminta	Sudut
7	Maju	0(180°)
20	Belok Kiri	+7°
21	Maju	+8°
05	Landing	+7°
Rata-rata Error Sudut		5,5°

4) *Lintasan Ke-4*: Sesuai dengan *flowchart*, ArUco marker dengan ID 10 memberi perintah turun 50 cm dan ID 06 memberi perintah Naik 50 cm dari ketinggian *take-off* yakni 3 meter. Hasil percobaan ketiga dengan menggunakan lintasan pada Gambar 33 dapat terlihat pada grafik Gambar 35, bahwa pada saat *quadcopter* berjalan di waktu 10s-40s *quadcopter* menurunkan ketinggian di angka 2 meter, pada waktu 60 s – 75 s *quadcopter* menaikkan ketinggian di angka 3,2 meter dan mulai proses *landing* pada waktu 90s. Adapun perbedaan hasil capaian *altitude* yang diperintahkan dari ArUco marker dikarenakan kualitas transmisi data yang dimiliki oleh telemetri yang didasarkan dari hasil pengujian telemetri. Dalam percobaan ini *quadcopter* dapat *landing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 34.



Gambar 33. Lintasan ke-4

Gambar 34. Hasil *landing* percobaan ke-4Gambar 35. *Altitude quadcopter* percobaan ke-4

Tabel 8. Hasil pembacaan sudut percobaan ke-4

ID	Gerakan Yang Diminta	Sudut
10	Turun	-1°
06	Naik	-4°
05	Landing	-3°
Rata-rata Error Sudut		2,6°

Pada percobaan keempat, *quadcopter* dapat melewati seluruh ArUco marker hingga *landing*. Pada setiap marker yang dilewati dan ditunjukkan hasil pengujian pada Tabel 8, posisi heading *quadcopter* memiliki *error* sudut di angka -1° hingga -4°.

Error sudut ini dapat terjadi dikarenakan gangguan eksternal di lapangan yakni angin. Hal ini ditegaskan dengan tidak konsistennya heading *quadcopter* pada tiap terdeteksinya ArUco marker. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 34, walaupun dengan *error* sudut yang cukup besar, lebih dari setengah badan *quadcopter* dapat masuk ke dalam ArUco marker. Hal ini dapat terjadi dikarenakan adanya tekanan angin, pengiriman data video, dan pengiriman data telemetri yang kurang baik. Namun, pada percobaan keempat memiliki rata-rata *error* sudut yang lebih kecil yakni di angka 2,6°.

IV. SIMPULAN

Dengan penggunaan kamera dari *smartphone* yang dikarenakan kualitas pembacaan *micro camera* yang kurang baik, didapat *error* sudut terbesar adalah 6,75°. *Error* sudut ini dapat dipengaruhi dari dorongan angin. Dengan *error* sudut tersebut, diperlukan pemrograman untuk koreksi sudut *quadcopter*, sehingga didapat kualitas navigasi terbang *quadcopter* yang menggunakan ArUco marker secara maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. Pahlevi, A. Mulyani, dan M. Khoir, "Sistem informasi inventori barang menggunakan metode object oriented di PT. Livaza Teknologi Indonesia Jakarta," *J. Prosisko*, vol. 5, no. 1, pp. 27–35, 2018.
- [2] D. Gill, "CEVA Logistics Chosen to Operate Warehouse for IKEA in Mexico," *Logistics Manager*, 3 Agustus 2020. [Online]. Tersedia: <https://logistics-manager.com/ceva-logistics-chosen-to-operate-warehouse-for-ikea-in-mexico/>.
- [3] H. M. Kandeel, E. Abdelmaksod, dan A. Elnady, "Modeling and control of x-shape quadcopter," *IOSR Journal of Mechanical and*

- Civil Engineering*, vol. 19, pp. 46–57, 2022.
- [4] O. Tatale, N. Anekar, S. Phatak, dan S. Sarkale, "Quadcopter: design, construction and testing," *International Journal for Research in Engineering Application & Management*, vol. 4, Special Issue AMET-2018, pp. 1–7, 2018.
- [5] F. N. Sekarsih, F. Nucifera, R. Pringgondani, dan A. L. Permatasari, "Pengenalan citra drone sebagai data geo-spasial untuk Sekolah Menengah Atas," *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Nusantara*, vol. 5, no. 1, pp. 250–258, 2024.
- [6] ArduPilot, "What is ArduPilot?," 2024. [Online]. Available: <https://ardupilot.org/>. [Diakses: 12-Jun-2024].
- [7] A. K. Rahman, H. Supriyanto, dan T. Meizinta, "Rancang bangun dan implementasi sistem kendali quadcopter melalui jaringan internet berbasis lokasi menggunakan smartphone android," in *Prosiding Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi*, 2018, pp. 307–318.
- [8] R. I. Hartono, A. Rusdinar, dan W. A. Cahyadi, "Sistem pengenalan tanda buatan untuk navigasi drone balon udara," *eProceedings of Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 2517–2520, 2022.
- [9] A. Haniffullah, I. A. Bangsa, dan A. Stefanie, "Implementasi quadcopter pembawa arm robot pembersih kaca jendela gedung bertingkat," *Edu Elekrika Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 36–42, 2020.
- [10] H. Muchtar dan R. Apriadi, "Implementasi pengenalan wajah pada sistem penguncian rumah dengan metode template matching menggunakan Open Source Computer Vision Library (OpenCV)," *RESISTOR (elektRONika kEndali telekomunikaSI tenaga liSTrik kOmputeR)*, vol. 2, no. 1, pp. 39–42, 2019.
- [11] V. Wiley dan T. Lucas, "Computer vision and image processing: A paper review," *International Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 2, no. 1, pp. 28–36, 2018.
- [12] N. F. Ardiansyah, A. Rabiâ, D. Minggu, dan W. Dirgantara, "Computer vision untuk pengenalan obyek pada peluncuran roket kendaraan tempur," *JASIEK (Jurnal Aplikasi Sains, Informasi, Elektronika Dan Komputer)*, vol. 1, no. 1, pp. 28–37, 2019.
- [13] Pemrograman Matlab, "Pengolahan Citra Digital, Pengolahan Video, Pengenalan Pola, dan Data Mining," 2020. [Online]. Available: <https://pemrogramanmatlab.com/pengenalan-pola-citra-digital-menggunakan-matlab/>. [Diakses: 12-Jun-2024].
- [14] A. Triwahyudin, H. K. Safitri, dan M. Fauziyah, "Pembacaan jarak dan kecepatan dengan Aruco marker pada sistem koper follow me beroda," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 21, no. 1, pp. 97–106, 2022.
- [15] B. Li, J. Wu, X. Tan, dan B. Wang, "ArUco marker detection under occlusion using convolutional neural network," in *2020 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*, Dalian, China, 2020, pp. 706–711, doi: 10.1109/CACRE50138.2020.9230250.
- [16] W. Suparta, A. C. Ahmad, dan A. H. A. Tharim, "Implementation of hexacopter for package delivery," *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 18, no. 1, pp. 205–215, 2024.
- [17] A. S. Priambodo, F. Arifin, A. Nasuha, A. Muslikhin, dan A. Winursito, "A vision and GPS based system for autonomous precision vertical landing of UAV quadcopter," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2406, no. 1, 2022.
- [18] M. F. Ahmed, M. N. Zafar, dan J. C. Mohanta, "Modeling and analysis of quadcopter F450 frame," in *2020 International Conference on Contemporary Computing and Applications (IC3A)*, 2020, pp. 196–201.
- [19] A. Faiz, A. Kusyanti, dan R. A. Siregar, "Implementasi pengamanan protokol MAVLink menggunakan algoritma kriptografi Simeck," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 6, no. 10, pp. 4678–4685, 2022.
- [20] A. A. Pasanca, M. Munadi, dan M. Muchammad, "Perancangan quadcopter F450 dengan flight controller Pixhawk 2.4.8 sebagai alat deteksi keretakan," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 3, pp. 267–272, 2023.
- [21] H. M. Qays, B. A. Jumaa, dan A. D. Salman, "Design and implementation of autonomous quadcopter using SITL simulator," *Iraqi Journal of Computer, Communication, Control and System Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 1–16, May 2020, doi: 10.33103/uot.ijccce.20.1.1.
- [22] X. Chen, "Introduction and analysis of Python software," *FCIS*, vol. 5, no. 2, pp. 41–43, Sep. 2023, doi: 10.54097/fcis.v5i2.12348.
- [23] M. Košuda, P. Lipovsky, Z. Szöke, M. Fil'ko, J. Novotňak, dan F. Heško, "MAVLink messaging protocol as potential candidate for the UTM communication," in *2020 New Trends in Signal Processing (NTSP)*, Demanovska dolina, Slovakia, 2020, pp. 1–7, doi: 10.1109/NTSP49686.2020.9229550.
- [24] E. H. Houssein, M. M. Emam, dan A. A. Ali, "An efficient multilevel thresholding segmentation method for thermography breast cancer imaging based on improved chimp optimization algorithm," *Expert Systems with Applications*, vol. 185, 115651, 2021.

Integrated PV-Farm and Micro Hydro as Distributed Generation in The Distribution Network

Muhaimin Muchti Prabowo¹, Pandhu Ardi Prasetyo¹, Lesnanto Multa Putranto^{1*}, Sarjiya¹, Jaya Kurniawan²

¹Department of Electrical and Information Engineering, Universitas Gadjah Mada; muhaiminmuchti@mail.ugm.ac.id, pandhuardi00@mail.ugm.ac.id, sarjiya@ugm.ac.id

²PT PLN (Persero); jayakrnwn@gmail.com

*Correspondence: lesnanto@ugm.ac.id

Intisari – Energi terbarukan harus diimplementasikan dalam ukuran kompak yang sesuai untuk sistem pembangkit terdistribusi (DG) agar dapat memaksimalkan potensinya. Untuk utilitas sistem distribusi, mengintegrasikan banyak DG dapat menyebabkan beberapa masalah seperti regulasi tegangan dan pelanggaran pembebanan saluran. Kondisi ini akan menjadi lebih buruk jika DG tidak dimiliki oleh sistem distribusi karena tidak banyak pilihan kontrol. Untuk itu, metode optimasi untuk menentukan lokasi dan ukuran DG diusulkan berdasarkan minimalisasi rugi-rugi sistem tenaga. Model optimasi dikembangkan dengan menggunakan teknik algoritma genetika. Kasus nyata Sistem Distribusi 20 kV Feeder Godean nomor 4 yang memiliki beban puncak 5,11 MW digunakan sebagai kasus uji dengan opsi integrasi tenaga surya dan tenaga air skala mikro. Model sistem tenaga listrik dibangun dengan menggunakan DIGSILENT PowerFactory, sedangkan model optimasi dibangun dengan menggunakan Python. Tiga skenario, yaitu surya saja, hidro saja dan surya-hidro yang dioptimalkan, dikembangkan untuk menunjukkan efektivitas metode yang diusulkan. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan memasang DG pada beberapa bus dan sumber daya yang berbeda dapat meningkatkan tingkat penetrasi sebesar 3,14, 2,24 dan 3,78 MW secara simultan untuk skenario surya saja, hidro saja dan surya-hidro teroptimasi. Selain itu, skenario surya-hidro teroptimasi juga menghasilkan pengurangan rugi-rugi yang lebih tinggi yaitu 7,27% dibandingkan dengan 6,85 (surya saja) dan 6,56% (hidro saja).

Kata kunci – pembangkit terdistribusi, optimasi, rugi-rugi sistem tenaga listrik, integrasi energi terbarukan

Abstract – Renewable energy should be implemented in a compact size appropriate for a distributed generation (DG) system in order to maximize its maximum potential. For the distribution system utility, integrating a lot of DGs may cause some problems like voltage regulation and line loading violation. The condition might be worse if the DG is not owned by the distribution system since there are not so many control options. For that purpose, the optimization method for determining the location and size of DG is proposed based on the power system losses minimization. The optimization model is developed using a genetic algorithm technique. The real case 20 kV Godean Distribution System feeder number 4, having a peak load of 5.11 MW, is used for the test case with the integration options of solar and hydropower. The power system model is built using DIGSILENT PowerFactory, while the optimization model is built under the Python environment. Three scenarios, namely solar only, hydro only, and solar-hydro optimized, are developed to show the proposed method's effectiveness. From the simulation result, it shows that installing DGs in some buses and different resources may increase the penetration levels, which are 3.14, 2.24, and 3.78 MW, simultaneously for the solar-only, hydro-only, and solar-hydro-optimized scenarios. Furthermore, the solar-hydro-optimized scenario also results in higher loss reduction (7.27%) compared to 6.85% (solar only) and 6.56% (hydro only).

Keywords – distributed generation, optimization, power system losses, renewable energy integration

I. INTRODUCTION

Variable renewable energy penetration into the power system has become a common trend in the world based on the Kyoto Protocol [1] and Paris Agreement [2]. Indonesia has also committed to increasing the penetration of renewable energy as stated in [3]. Moreover, Indonesia is also hosting the G-20 meeting, one of the focus agendas of which is to strengthen the commitment to clean energy transition as presented in [4].

To increase the proportion of renewable energy in a system, the variable renewable energy is integrated into the transmission systems as presented in the Java Bali System [5], [6] and Sulawesi System [7], [8]. Moreover, the integration of renewable energy was also done at the specific voltage level of the transmission level in Jordan [9]. However, the technology supporting the wind, solar, and hydro generation was also capable in small-scale systems like in the east part of Indonesia, as presented in [10]. In that situation, the resources and land availability were provided in the isolated area with

small-scale electricity. For that purpose, the penetration level in the distribution/communal level was also considered as presented in [11]. In addition, the research to determine the solar farm penetration level in the distribution system was also done as presented in [12].

On Java Island, the population is relatively high, and there is no space left to install the mega solar farm. To optimize the full potential of renewable energy, small-scale PV farms and PV rooftops should be integrated into the distribution system as DG. In the traditional distribution system, most of the configuration is a radial power system, in which the load is distributed from the front to the edge of the network, making the power system distribution losses high. In this kind of situation, installing DG in the proper location might reduce the losses and increase the system reliability [13]. However, it would also change the voltage profile of the distribution system. Installing too many solar generations may cause overvoltage in the daytime so that the integration to the power distribution system should be limited.

Another giant resource is the hydropower generation (micro-hydro size), which can come from the irrigation system supporting the agricultural activities on Java Island. Different from the solar characteristic, hydropower can generate electricity for the whole day. This condition requires the performance of loss reduction and voltage regulation for a full 24-hour period. However, hydropower generation mostly depends on the season; in the dry season, water availability might be limited.

The research on how to find the hosting capacity has been discussed in the previous research. One of the research projects was done in feeder number 7 in the Bantul Distribution System by minimizing the system losses using a genetic algorithm (GA). The hosting capacity of DG might be installed in some buses as presented in [14]. Installing the DG distributed in some buses would decrease the power system losses. Similar works were also done in Purworejo using the partial swarm optimization (PSO), IEEE 30 buses using GA, and the IEEE 33 buses test system as presented in [15], [16], [17].

A typical distribution system is radial; the probabilistic approach to determine the HC in the radial system was developed. The probabilistic approach is needed to handle the time characteristic related to the renewable energy as presented in [18]. The conventional way to determine the HC was done by dividing the feeder into head, middle, and end feeders as simulated in [19]. Moreover, the DG can also increase the voltage profile in the distribution system, especially in the distributed bus, as presented in [20], [21], [22].

In this research, the hosting capacity considering the voltage profile, losses, power factor, line loading, and reverse power to the upstream level is considered. The mathematical model is built using genetic algorithms. To demonstrate the effectiveness of the proposed method, the Godean Distribution System in Yogyakarta City, Indonesia, is used as the test system. Since the characteristics of all feeders are similar, feeder number 4 (GDN-04) is chosen. Moreover, near the feeder, there is potential to integrate solar and hydropower plants as distributed generation. There are some areas in the nearby villages that can be a PV farm. There is also the irrigation system from Kalibawang and the Progo River located in the Sendangmulyo and Sumberagung villages [23] where the hydropower can be installed. The DG is integrated into a 20 kV distribution system that consists of some scenarios that are solar only, hydro only, and solar-hydro optimized.

In the distribution network DG, the power system analysis to determine the maximum penetration level is required, especially with high penetration of non-dispatchable renewable energy. This procedure is called hosting capacity in a distribution network, which considers the power quality constraint for power system distribution customers. The constraint consists of voltage regulation, losses, line loading, and avoiding reverse power to the upstream network [24]. In

the hosting capacity, the penetration level scenario can be determined, especially when doing the medium-long-time power system planning. The scenario can consider the environmental constraint to preserve the atmosphere, and the penetration point near the resources. Moreover, the distribution system characteristic depends on system parameters such as the transformer, voltage regulator, and distribution line. Consequently, the hosting capacity would be different for any distribution network.

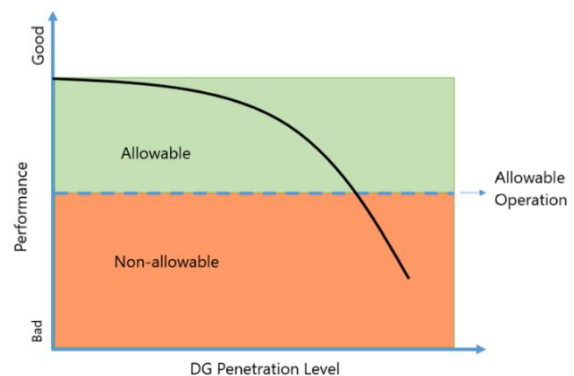


Figure 1. Correlation between DG penetration level and distribution system operation [24]

The hosting capacity illustration, which the trade-off to the distribution system operation presented, is presented in Figure 1. It is shown that the penetration level increment may worsen the system operation performance, which can be observed from the system variables such as voltage, power factor, and line loading as presented in [25]. The hosting capacity procedure might be formulated by an optimization procedure that has been described in [12].

II. METHODOLOGY

Integrating DG into the distribution system will also depend on the business process of the utility. In Indonesia, the distribution system utility manages the power from the upstream level. If the DG is connected to the distribution system, it is managed by the independent power producer. In this situation, installing so many renewable energy generations may cause operational problems since there are few control options. So that, the DG placement and sizing should be built from the point of view of the distribution system utility. For determining the hosting capacity, the research method presented in Figure 2 is proposed. First, identification of the potential for solar and hydropower is carried out in the GDN-04 area. Solar irradiation and waterway debit in the Kalibawang River data are collected. Then available areas for solar and hydro generation are identified to determine the maximum capacity. Then the transformer, line, and load parameters of the Godean Distribution System are collected, especially for feeder number 4. Moreover, the voltage, power, and line loading variables are also collected. The power system model is built in the DIGSILENT PowerFactory environment. For optimizing the potential of renewable energy in terms of DG,

the mathematical model is formulated. The optimization is built under a Python environment and run into three scenarios to find the optimum location and size to minimize the power system losses.

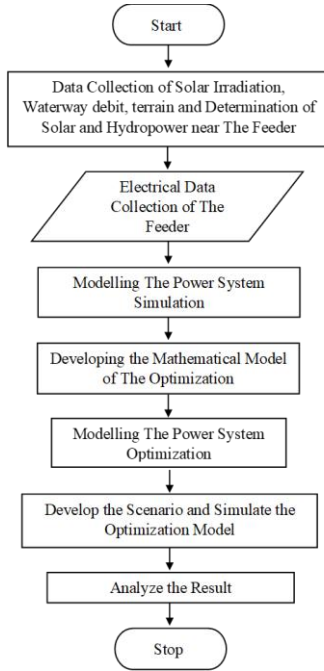


Figure 2. Research method of DG integration

The proposed optimization method is to minimize the system losses after penetration. The objective function is shown in (1) as follows:

Objective function

$$\text{Min } F = P_{\text{lossDG}}(P_{DG}^T) \quad (1)$$

Subject to

$$P_{\text{lossDG}}(P_{DG}^T) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij}(P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j)] \quad (2)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (3)$$

$$\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (4)$$

Equation (1) represents the objective function, $\text{Min } F$, which minimizes the active power losses in the network after DG penetration (P_{lossDG}). This objective function is chosen to ensure that DG integration has a positive impact on the system and enhances the efficiency of power distribution. With the losses formulation in (2)-(4) were simplified [26]. P_{lossDG} is defined as the active power of the network after DG penetration. P_{DG}^T , P_i and Q_i are the vector of DG size, active and reactive power injection in the network. V_i , δ_i and r_{ij} are the voltage magnitude, angle, and line resistant. While i, j and N are index and number of buses in power system.

Equation (5) explains the active power injection in the buses after DG penetration.

$$P_i = P_{gi} - P_{Li} + \sum P_{DG i} \quad (5)$$

with P_{gi} , P_{Li} and $P_{DG i}$ are upstream active power, injected active power load and DG active power, respectively.

Equations (6) and (7) present the load flow formulation

$$P_i = \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (6)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (7)$$

$$0,9 \leq V_i \leq 1,05 \quad (8)$$

$$P_{\min} \leq P_{DG i} \leq P_{\max} \quad (9)$$

$$I_i \leq 0,8 \times I_{\max, i} \quad (10)$$

The voltage, DG power and line loading constraint are presented in (8), (9) and (10), respectively. Y_{ij} and θ_{ij} is the magnitude and angle of Ybus element matrix. While I_i and $I_{\max, i}$ are the line current and line current limit.

$$\sum P_{DG i} \leq \sum P_{Li} \quad (11)$$

To limit the DG power not to flow back to the upstream level, the (11) is formulated.

The optimization method used in this study is GA. The genetic algorithm (GA) is an optimization method inspired by natural selection. It begins with an initial population, consisting of multiple individuals, where each individual represents a potential solution to a given problem [27].

Each individual undergoes a fitness evaluation, determining its effectiveness in solving the problem. Based on this evaluation, an individual selection process takes place where the best candidates are chosen for reproduction. These selected individuals undergo crossover and mutation, generating a new population that evolves over successive generations. This iterative process leads to population convergence, ultimately finding the optimal solution. The block diagram illustrating the GA cycle is shown in Figure 3.

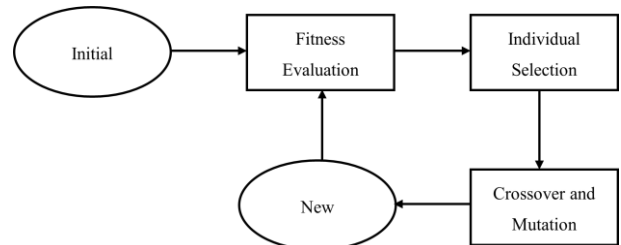


Figure 3. Genetic algorithm cycle [27]

Godean distribution system has two main transformers. The 30 MVA transformer supplying feeder GDN-01, GDN-02 and GDN-03 (feeders 1 – 3) while the 60 MVA transformer

supplying feeder GDN-04, GDN-05, GDN-06 and GDN-07 (feeders 4-7). The proposed method then simulated into 20 kV feeder 4 test with the system configuration is presented in Figure 4. feeder has 5.11 MW dan 2.48 MVar with the distribution in each bus are presented in Table 1.

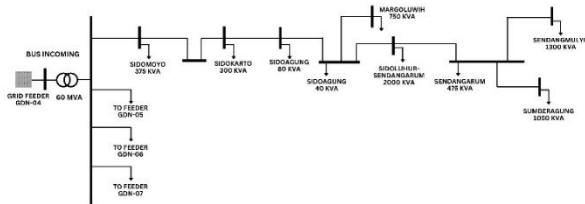


Figure 4. Simplified GDN-04 feeder test system

There is a village and river map presented in Figure 5 that is developed from [28] to show the potential of hydro and solar generation. For the solar farm, there are 21.5 ha of land that is available. That is a solar irradiation of 3.8 kWh/day/m² so that the maximum 42.8 MWp solar farm can be installed in that area [29]. For the hydro, Kalibawang waterway has 29 potential locations. Based on the secondary data [23], [30], the average debit of the water is 58.5 m³/s, with the maximum being 331 and the minimum being 12 m³/s. So that, the maximum installed capacity is 3.3 MW. The load profile and solar irradiation characteristics in that area are presented in Figure 6 [29], [30]. The maximum capacity of the DG is set at 10 MWp [31], [32], and the minimum is zero.

Table 1. Distribution of load in GDN-04 buses

Bus Number-	Villages	Active Power (kW)	Reactive Power (kVar)
T1	Sidomoyo	54	26,22
T2		432	209,22
T3	Sidokarto	378	183,1
T4	Sidoagung	126	61
T5		36	17,4
T6		396	191,8
T7		108	52,3
T8	Sidoluhur	36	17,4
T9	Sidoluhur and	342	165,6
T10	Sendangarum	720	348,7
T11		36	17,4
T12		216	104,6
T13		216	104,6
T14	Margoluwih	702	340
T15		18	8,7
T16		216	104,6
T17	Sendangarum	72	34,9
T18	Sumberagung	36	17,4
T19		396	191,8
T20	Sendangmulyo	72	34,9
T21		36	17,4
T22		468	226,7

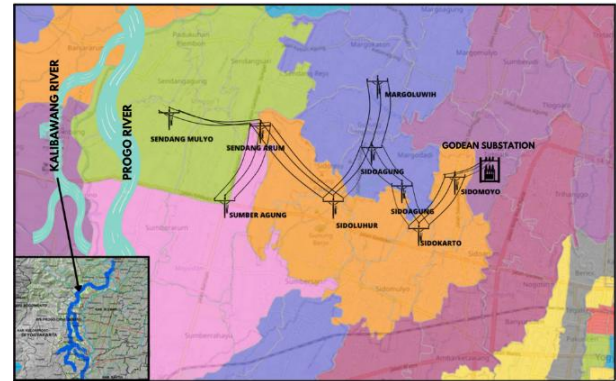


Figure 5. Illustration of terrain in the feeder 4 area [28]

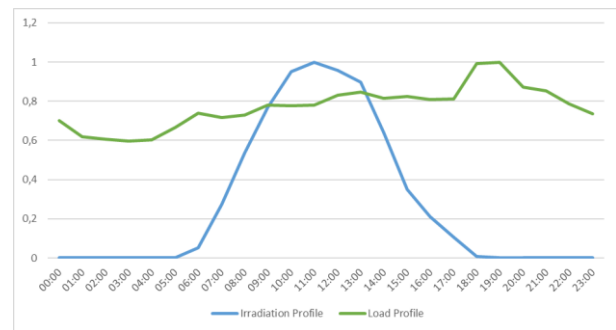


Figure 6. Load profile and solar irradiation characteristic in per unit [29], [30]

III. RESULTS AND DISCUSSION

For showing comprehensive analysis to find the optimum location and size of solar and hydro generation, there are three scenarios. The scenarios are solar-only, hydro-only, and solar-hydro optimized scenarios.

A. Scenario 1: Solar Only

In this scenario, the solar generation candidates are in areas Sidomoyo, Sidokarto, Sidoagung, Margoluwih, Sidoluhur, Sendangarum, Sumberagung, and Sendangmulyo, which are near the GDN-04 feeder, and are optimized to minimize the power system losses. The simulation is executed using the load profile at 11:00 to simulate the maximum possibility of solar generation. Then, for verification, the simulation would also be done from 8:00 to 16:00.

Based on the proposed method, the simulation result shows that the PV farm should be installed on the bus T17 in Sendangarum Village with a maximum penetration of 3.14 MWp. In this size and location, the power system losses are minimum.

To validate that the result is not violating the constraint, the bus voltage in the existing and after penetration are shown in Figure 7. In both simulations, the voltage profile is still in permissible constraint. Furthermore, the system losses on 11.00 would decrease from 49.93 kW to 46.51 kW (6.85% decrement).

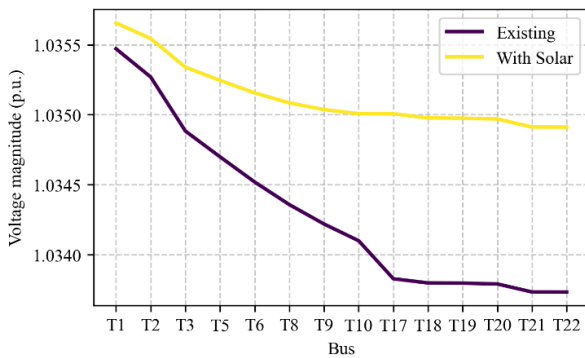


Figure 7. Voltage profile in solar only scenario

Other decreases for the line loading: the PV integration has a positive impact on the line loading since all the line loading decreases after the penetration, as presented in Figure 8. The maximum loading condition in the existing operation is 29.6%, and after penetration, it is 14.4%.

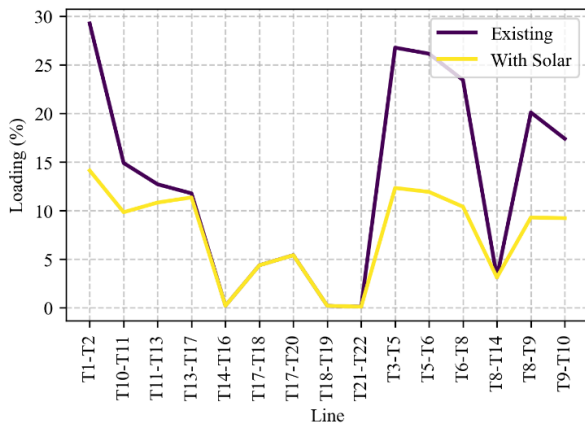


Figure 8. Line loading percentage in solar only scenario

B. Scenario 2: Hydro Only

Hydropower is installed in the Sendangmulyo Village, the nearest location to the Kalibawang waterway directly connected to the bus T20. The optimization is then simulated at 03:00 when the power system load is the lowest. The optimization resulted in an optimum penetration of 2.24 MW. It has been validated using the other size as presented in Figure 9.

Another validation is done under different times of the load profile as presented in Figure 10. At 19:00, when the peak load occurs, the optimal hydro generation size is 3.86 MW. For that reason, the 2.24 MW size is chosen as the size so that no curtailment is needed for 24-hour operation. If the 3.86 MW size is chosen, the operation would be more complicated since the dummy load must be installed in parallel with the customer load. The dummy load is used to anticipate the water flow deviation and load variation. However, this kind of configuration requires more complex operation and more expensive investment costs.

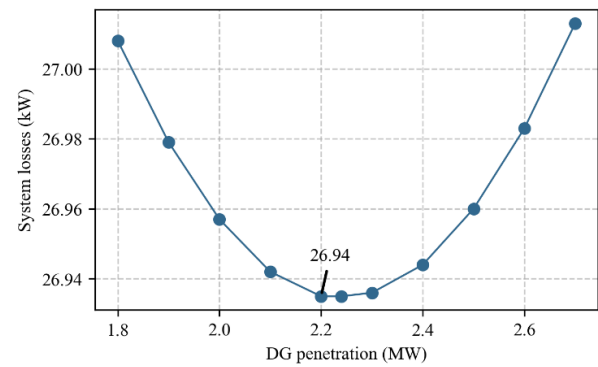


Figure 9. Power system losses under different hydro size in hydro only scenario

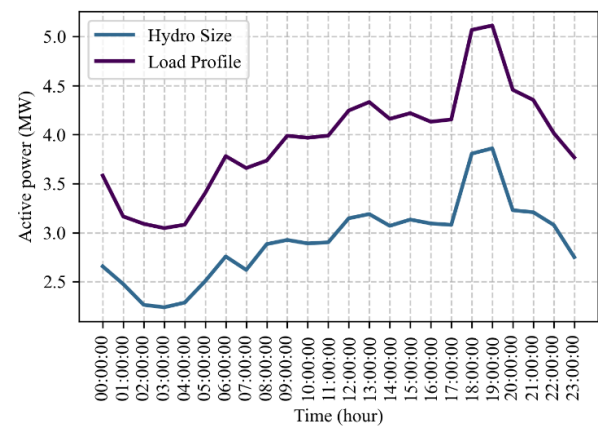


Figure 10. Hydropower optimum sizing in different load

After the hydropower integration, the validation on the voltage profile and line loading is presented in Figure 11 and Figure 12, respectively. Both in the existing and hydro penetration conditions, the voltage profile is still within the permissible range. The active power loss decreases from 28.83 kW to 26.94 kW (6.56% decrease) at 3:00, which satisfies the proposed method. The hydropower penetration also has a positive impact on the line loading condition, with the maximum decrease from 22.46 to 11.33%.

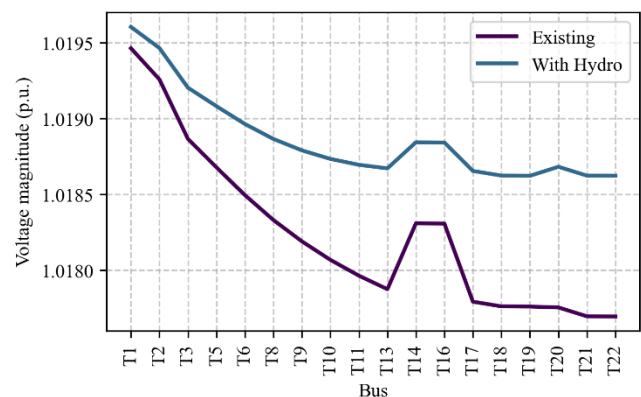


Figure 11. Voltage profile in hydro only scenario

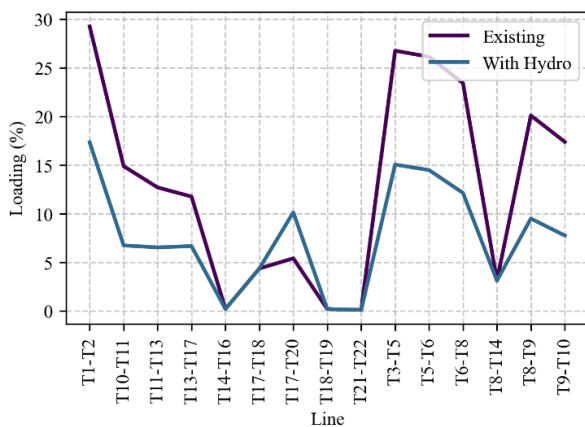


Figure 12. Line loading percentage in hydro only scenario

C. Scenario 3: Solar-Hydro Optimized

In this scenario, the PV farm and hydropower will be optimized simultaneously. The option to install hydropower is the same as scenario 2, which is in the Sendangmulyo Village. Simultaneously, the optimized hybrid solar-hydro would choose Bus T20 to install 2.24 MW hydropower and Bus T08 to install 1.53 MWp solar generation as presented in Figure 13.

Compared to scenarios 1 and 2, scenario 3 has a higher penetration level of 3.78 MW compared to 3.14 MW (scenario 1) and 2.24 MW (scenario 2). Combining those two options gives a better trade-off since the objective of the distribution system operator and renewable energy penetration can be optimized.

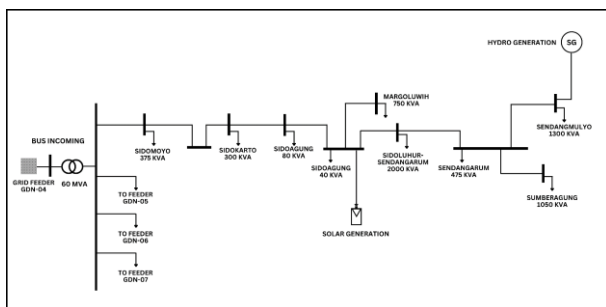


Figure 13. Location of PV farm and hydropower in optimized solar-hydro scenario

For validation purposes, Figure 14 shows the voltage profile in the existing condition, scenario 1, and scenario 3, which are all still within permissible voltage regulation. Scenario 3 also produces fewer losses than the existing and scenario one, with the system losses at 11:00 being 46.3, 49.93, and 46.51 kW for scenarios 3, 1, and the existing, respectively. There is a 7.27% decrement on power system loss. The line loading condition also had a positive impact, as presented in Figure 15.

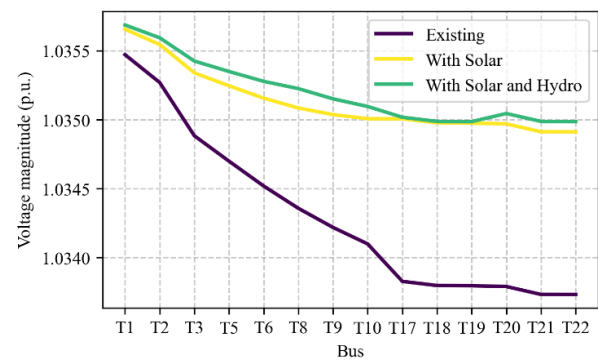


Figure 14 Voltage profile in optimized solar-hydro scenario

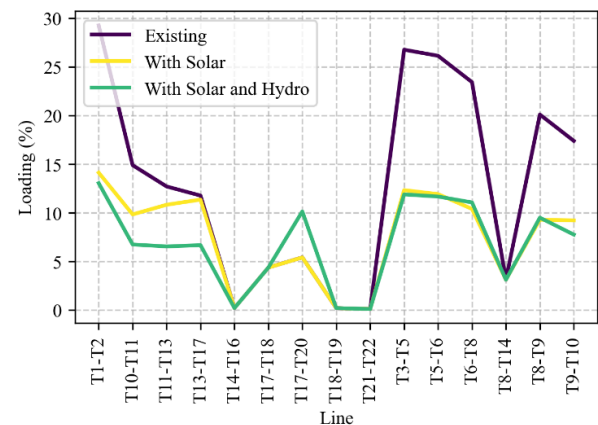


Figure 15. Line loading percentage in optimized solar-hydro scenario

In the proposed method, HC is determined by the sensitivity of the operation limit of the distribution system. The characteristics of hydropower and solar power are different depending on the optimum generation capability and system load period. The most solar power energy would be generated in the daytime around 11:00, while for hydropower, it depends on the water flow. In this optimization process, optimal PV farms would try to produce as much as possible in the daytime while hydropower produces power evenly during the 24 hours. Not all scenarios have reverse power to upstream violation. However, if DG penetrations occur in scenarios 1, 2, and 3, the power factor in the distribution substation would drop below 0.85, which may make the upstream level suffer from reactive power management.

IV. CONCLUSION

Distribution systems usually directly manage the power system from the upstream level. Installing the DG, which is not owned by the utility, may disturb the operation. For that reason, the integration scheme for the distribution system utility has the answer in how much the optimum size and number of DG can be installed on its system using the proposed method by minimizing the power system losses. The proposed method works in the real case of the GDN-04/feeder 4 20 kV Godean Distribution System, which has abundant resources of solar and hydropower. From the simulation result, it shows that installing DG in some buses and different

resources may increase the penetration level, which is 3.14, 2.24, and 3.78 MW, simultaneously for scenarios 1, 2, and 3. Furthermore, scenario 3 also results in a higher decrement of 7.27% compared to 6.85% (scenario 1) and 6.56% (scenario 2). The proposed method also confirms that the operational constraints, such as voltage and line loading, are not violated. It also has been confirmed in the simulation result for all scenarios. Further research may discuss reactive power management for the upstream level if DG integration becomes popular in common power systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper and the research behind it would not have been possible without the exceptional support of our head of department, Hanung Adi Nugroho, who gave us the freedom to use the laboratory facilities, and our colleagues at Universitas Gadjah Mada, Francisco Danang Wijaya and Roni Irnawan, who have looked over our transcriptions and answered with unfailing patience numerous questions about distributed generation, microgrids, and hosting capacity.

REFERENCES

- [1] "United Nations framework convention on climate change handbook," UNFCCC Climate Change Secretariat. [Online]. Available: <https://unfccc.int/resource/docs/publications/handbook.pdf>
- [2] "Paris Agreement." [Online]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- [3] *Undang Undang Nomor 30 Tahun 2007*. Indonesia, 2007. [Online]. Available: <https://jdih.esdm.go.id/peraturan/uu-30-2007.pdf>
- [4] "The 3rd Energy Transitions Working Group at Bali: The Foundation for G20 Energy Transitions Acceleration 2022." Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/the-3rd-energy-transitions-working-group-at-bali-the-foundation-for-g20-energy-transitions-acceleration>
- [5] Tumiran, L. M. Putranto, Sarjiya, and E. Y. Pramono, "Maximum penetration determination of variable renewable energy generation: A case in Java-Bali power systems," *Renew Energy*, vol. 163, pp. 561–570, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.08.048.
- [6] H. B. Tambunan, A. A. Kusuma, and B. S. Munir, "Maximum Allowable Intermittent Renewable Energy Source Penetration in Java-Bali Power System," in *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, IEEE, Jul. 2018, pp. 325–328, doi: 10.1109/ICITEED.2018.8534845.
- [7] D. Y. Himawan, L. M. Putranto, M. I. B. Setyonegoro, and S. Isnandar, "Maximum Penetration of Intermittent Renewable Energy in Southern Sulawesi System Based On Primary Reserve Constrained Unit Commitment," in *2021 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, IEEE, Sep. 2021, pp. 180–185, doi: 10.1109/ICT-PEP53949.2021.9600905.
- [8] H. B. Tambunan, P. A. A. Pramana, and B. S. Munir, "Analysis of Maximum Intermittent Renewable Energy Source Penetration on South of Sulawesi Power System," in *2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS)*, IEEE, Oct. 2018, pp. 32–35, doi: 10.1109/EECCIS.2018.8692960.
- [9] S. Qutaishat, A. Al-Salaymeh, and H. Obeid, "Maximum PV Penetration Level integrated to the National Transmission Grid of Jordan, Particularly 132 KvBusbar," in *2021 12th International Renewable Engineering Conference (IREC)*, IEEE, Apr. 2021, pp. 1–3, doi: 10.1109/IREC51415.2021.9427859.
- [10] D. Simatupang *et al.*, "Remote Microgrids for Energy Access in Indonesia—Part II: PV Microgrids and a Technology Outlook," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 21, p. 6901, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14216901.
- [11] A. H. Mohammadzadeh Niaki and A. Solat, "A Novel Method to Determine the Maximum Penetration Level of Distributed Generation in the Distribution Network," in *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, IEEE, Aug. 2020, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICEE50131.2020.9260856.
- [12] Tumiran, A. S. T. Nafis, Sarjiya, L. Multa Putranto, and H. Indrawan, "Determination of PV Hosting Capacity in Rural Distribution Network: A Study Case for Bantul Area," *International Journal of Renewable Energy Research*, no. v9i2, 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i2.9385.g7687.
- [13] I. N. C. Artawa, I. W. Sukerayasa, and I. A. Dwi Giriantari, "Analisa Pengaruh Pemasangan Distributed Generation Terhadap Profil Tegangan Pada Penyulang Abang Karangasem," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 16, no. 3, p. 79, Dec. 2017, doi: 10.24843/MITE.2017.v16i03p13.
- [14] S. Shaddiq, D. B. Santoso, F. F. Alfarobi, Sarjiya, and S. P. Hadi, "Optimal capacity and placement of distributed generation using metaheuristic optimization algorithm to reduce power losses in Bantul distribution system, Yogyakarta," in *2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, IEEE, Oct. 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICITEED.2016.7863279.
- [15] M. G. S. Wicaksana, L. M. Putranto, F. Waskito, and M. Yasirroni, "Optimal Placement and Sizing of PV as DG for Losses Minimization Using PSO Algorithm: a Case in Purworejo Area," in *2020 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICSEEA50711.2020.9306134.
- [16] R. Sulistyowati, D. C. Riawan, and M. Ashari, "PV farm placement and sizing using GA for area development plan of distribution network," in *2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, IEEE, Jul. 2016, pp. 509–514, doi: 10.1109/ISITIA.2016.7828712.
- [17] M. H. Basri Paleba, L. Multa Putranto, and S. P. Hadi, "Optimal Placement and Sizing Distributed Wind Generation Using Particle Swarm Optimization in Distribution System," in *2020 12th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, IEEE, Oct. 2020, pp. 239–244, doi: 10.1109/ICITEE49829.2020.9271671.
- [18] M. S. S. Abad, J. Ma, D. Zhang, A. S. Ahmadyar, and H. Marzooghi, "Probabilistic Assessment of Hosting Capacity in Radial Distribution Systems," *IEEE Trans Sustain Energy*, vol. 9, no. 4, pp. 1935–1947, Oct. 2018, doi: 10.1109/TSTE.2018.2819201.
- [19] V. Quintero-Molina, M. Romero-L., and A. Pavas, "Assessment of the hosting capacity in distribution networks with different DG location," in *2017 IEEE Manchester PowerTech*, IEEE, Jun. 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/PTC.2017.7981243.
- [20] A. F. Gusnanda, Sarjiya, and L. M. Putranto, "Effect of Distributed Photovoltaic Generation Installation on Voltage Profile: A Case Study of Rural Distribution System in Yogyakarta Indonesia," in *2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, IEEE, Jul. 2019, pp. 750–755, doi: 10.1109/ICOIACT46704.2019.8938534.
- [21] F. M. Nuroglu and A. B. Arsoy, "Voltage Profile and Short Circuit Analysis in Distribution Systems with DG," in *2008 IEEE Canada Electric Power Conference*, IEEE, Oct. 2008, pp. 1–5, doi: 10.1109/EPC.2008.4763309.
- [22] D. R. Jintaka, A. Adi Kusuma, H. B. Tambunan, M. Ridwan, K. G. H. Mangunkusumo, and B. Sofianto Munir, "Analysis of Voltage and Power Factor Fluctuation due to Photovoltaic Generation in Distribution System Model," in *2019 International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy*, IEEE, Oct. 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/IEEECONF48524.2019.9102497.
- [23] B. Pranoto, S. N. Aini, H. Soekarno, A. Zukhrufiyati, H. Al Rasyid, and S. Lestari, "Potensi Energi Mikrohidro di Daerah Irigasi (Studi Kasus di Wilayah Sungai Serayu Opak)," *Jurnal Irigasi*, vol. 12, no. 2, p. 77, Mar. 2018, doi: 10.31028/ji.v12.i2.77-86.
- [24] M. Bollen and M. Häger, "Power quality: interactions between distributed energy resources, the grid, and other customers," Mar. 2004.
- [25] M. Bollen and S. Rönnberg, "Hosting Capacity of the Power Grid for Renewable Electricity Production and New Large Consumption

- Equipment,” *Energies (Basel)*, vol. 10, no. 9, p. 1325, Sep. 2017, doi: 10.3390/en10091325.
- [26] N. A. Iqteit, A. B. Arsoy, and B. Çakir, “A simple method to estimate power losses in distribution networks,” in *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2017, pp. 135–140.
- [27] R. Sulistyowati, D. C. Riawan, and M. Ashari, “PV farm placement and sizing using GA for area development plan of distribution network,” in *2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, 2016, pp. 509–514. doi: 10.1109/ISITIA.2016.7828712.
- [28] “Peta Kecamatan di Yogyakarta.” Accessed: Mar. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=cf3f3ae4febf4a94ae21ea4a467f13ee>
- [29] M. M. Prabowo, L. M. Putranto, and Sarjiya, “Desain Integrasi PLTS Sebagai Distributed Generation pada Jaringan Distribusi 20 kV,” Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2022. Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <http://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/213206>
- [30] P. A. Prasetyo, L. M. Putranto, and Sarjiya, “Desain Integrasi PLTMH sebagai Distributed Generation pada Jaringan Distribusi 20 kV,” Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2022. Accessed: Feb. 21, 2023. [Online]. Available: <http://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/213219>
- [31] “Technology Data for the Indonesian Power Sector Catalogue for Generation and Storage of Electricity,” 2017.
- [32] “Matahari Untuk PLTS di Indonesia.” Accessed: Oct. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/matahari-untuk-plts-di-indonesia>

Design of Direct Digital Synthesizer (DDS) Based on Field Programmable Gate Array (FPGA) for Electrical Impedance Tomography (EIT)

Isnan Nur Rifai^{1,*}, Wijayanti Dwi Astuti¹, Jans Hendry¹, Ardhi Wicaksono Santoso¹, Alief Purnomo Aji¹

¹Department of Electrical Engineering and Informatics, Universitas Gadjah Mada; wijayanti.dwi.a@ugm.ac.id, jans.hendry@ugm.ac.id, ardhi.wicaksono.s@mail.ugm.ac.id, alief.purnomo.aji@mail.ugm.ac.id

*Correspondence: isnan.nur@ugm.ac.id

Intisari — Direct Digital Synthesizer (DDS) memainkan peran penting dalam pembangkitan sinyal presisi tinggi untuk berbagai aplikasi seperti di bidang medis dan telekomunikasi. Penelitian ini mengeksplorasi pengembangan sistem DDS berbasis Field-Programmable Gate Array (FPGA), dengan fokus pada optimalisasi akurasi sinyal, efisiensi penggunaan sumber daya, dan tingkat signal-to-noise ratio (SNR). Studi ini mengimplementasikan dua desain DDS pada FPGA: satu berbasis algoritma CORDIC dan lainnya menggunakan pendekatan Look-Up Table (LUT). Komponen utama dari sistem ini meliputi phase accumulator, phase register, dan algoritma perhitungan frekuensi. Kinerja sistem dievaluasi dengan mengukur akurasi keluaran sinyal dan SNR, menggunakan DAC ISL6961IAZ dan RF Transformer PWB2010LC untuk konversi dan transmisi sinyal. Hasil menunjukkan bahwa DDS berhasil menghasilkan frekuensi mendekati target, yaitu 100,4 kHz untuk target 100 kHz dan 498,8 kHz untuk target 500 kHz. Desain berbasis LUT menunjukkan signal fidelity yang lebih baik, dengan pencapaian SNR sebesar 106 dB dibandingkan 92 dB pada desain berbasis CORDIC. Namun, analisis penggunaan sumber daya mengungkap perlu adanya kompromi antara efisiensi sumber daya Logic element dan penggunaan memori: desain CORDIC menggunakan 26% Logic element dan hanya 1% memori, sedangkan desain LUT menggunakan 8% Logic element namun 77% memori. Temuan ini menyoroti pentingnya menyeimbangkan pilihan desain berdasarkan kebutuhan aplikasi yang spesifik terhadap presisi, keterbatasan sumber daya, dan performa sistem.

Kata kunci – Direct Digital Synthesizer (DDS), FPGA, EIT, CORDIC, LUT, SNR.

Abstract — Direct Digital Synthesizer (DDS) systems play a critical role in high-precision signal generation for applications like medical imaging and RF communications. This research explores the development of a DDS system using Field-Programmable Gate Array (FPGA) technology, with a focus on optimizing signal accuracy, resource efficiency, and signal-to-noise ratio (SNR). The study implemented two DDS designs on an FPGA: one based on the CORDIC algorithm and the other using a Look-Up Table (LUT) approach. Key components of the system included a phase accumulator, phase register, and frequency calculation algorithms. The system's performance was evaluated by measuring signal output accuracy and SNR, utilizing the ISL6961IAZ DAC and RF Transformers PWB2010LC for signal conversion and transmission. The results showed that the DDS achieved near-target frequencies, with outputs of 100.4 kHz for a target of 100 kHz and 498.8 kHz for a target of 500 kHz. The LUT-based design demonstrated superior signal fidelity, achieving an SNR of 106 dB compared to 92 dB for the CORDIC-based design. However, resource utilization analysis revealed a trade-off between logic efficiency and memory usage: the CORDIC design consumed 26% of logic elements and only 1% of memory, while the LUT-based design used 8% of logic elements and 77% of memory. These findings highlight the importance of balancing design choices based on application-specific requirements for precision, resource constraints, and performance.

Keywords – Direct Digital Synthesizer (DDS), FPGA, EIT, CORDIC, LUT, SNR.

I. INTRODUCTION

Electrical Impedance Tomography (EIT) is a non-invasive medical imaging technique that utilizes the measurement of electrical impedance in tissues within the body to visualize the distribution of electrical conductivity [1]. The primary advantage of EIT is its ability to provide real-time imaging with portable, easily accessible equipment, at a relatively low cost, and without exposure to harmful radiation, compared to other medical imaging techniques such as MRI or CT scans [2]. EIT has been widely used for monitoring biomedical processes, such as sodium visualization in the skin [3], gastric organ imaging [4], breast cancer [5], neural activity [6], and brain imaging [7].

However, the development of EIT devices still faces several challenges, one of which is in terms of frequency precision and data acquisition speed [8]. A key component in EIT systems is the Direct Digital Synthesizer (DDS), which its functions is to generate the frequency signals required for impedance measurement [9]. Although conventional DDS has been used in EIT applications, there is a need to develop more efficient

and precise DDS designs, especially for high frequencies. Additionally, a major challenge of EIT in medical practice is the low frequency injection and the limitation in scanning speed, which requires a long time. Therefore, our research proposes the "Development of a Direct Digital Synthesizer (DDS) Design Based on Field Programmable Gate Array (FPGA) for Electrical Impedance Tomography (EIT) Systems", combining high-frequency injection and high scanning speed solutions to address the main obstacles associated with EIT implementation in clinical environments.

Currently, DDS have been widely used in various applications, but research on the development of DDS specifically for EIT applications, particularly at high frequencies, is still limited. Among the DDS system developments for EIT is the Multi-node Electrical Impedance Tomography (MnEIT), which was developed based on the AD9833 signal generator IC. The results showed that the relative error in amplitude measurement was quite small, at 2.42%, but the usable frequency range was limited to 100 Hz - 100 kHz [10].

The novelty of this research lies in its innovative integration of FPGA technology as both the main controller and the foundation for a DDS specifically optimized for EIT applications. By prioritizing precision and measurement speed which are critical requirements for EIT system, this work leverages FPGA's inherent advantages, such as parallelism, high-speed processing, to develop tailored solutions that enhance measurement quality, system flexibility, and responsiveness [11], [12]. These improvements aim to advance the understanding of electrical impedance phenomena while addressing the technical demands of real-world EIT implementations.

To achieve this, the study implemented two FPGA-based DDS architectures: one using the CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) algorithm and the other employing a Look-Up Table (LUT) approach. Core components such as a phase accumulator, phase register, and frequency calculation algorithms ensured precise signal generation. Performance evaluation focused on signal accuracy and signal-to-noise ratio (SNR), utilizing the ISL6961IAZ DAC (digital-to-analog converter) and RF Transformers PWB2010LC for signal conversion and transmission. The FPGA's ability to balance computational efficiency (via CORDIC) and rapid data retrieval (via LUT) underscores its suitability for generating high-frequency signals with optimal performance, making it a robust platform for advancing EIT system capabilities.

II. METHODOLOGY

A. Research Stage

The research methodology is divided into following steps:

- Literature Review: The aim is to thoroughly understand the theories and previous research related to DDS on FPGA for EIT optimization. In this stage, the research problem can be clearly and specifically formulated, and hypotheses

can be developed for testing in the study. At least five international journals have been referenced to build a strong theoretical foundation for the FPGA EIT application proposed in this research.

- DDS System Design: Conceptually designing the DDS system, including measurement circuits and algorithms to be used. Developing an experimental plan to measure amplitude and phase difference at various frequencies.
- DDS Implementation on FPGA: Implementing the DDS design on FPGA to produce high-frequency signals and process measurement signals for amplitude and phase difference. Prototyping the DDS and collecting measurement response data.
- DDS Algorithm Optimization: Analyzing the measurement response data obtained to identify potential improvements in accuracy or measurement speed. At this stage, the DDS on FPGA is expected to be capable of generating high frequencies.
- Validation and Calibration: Conducting validation tests to ensure that the DDS system on FPGA provides consistent and reliable results and performing system calibration to adjust and enhance measurement accuracy.

B. Direct Digital Synthesizer

Development method for the DDS is carried out in two stages: DDS configuration and DDS integration. DDS configuration involves designing the internal structure of the FPGA and determining parameters such as sample frequency, data length, and input/output configuration which involves writing code that can calculate amplitude and phase difference to produce input signals at various frequencies, especially high frequencies [13]. While DDS Integration is about design and integration of a DDS system with the DAC and RF Transformers for signal generation in a high-frequency application.

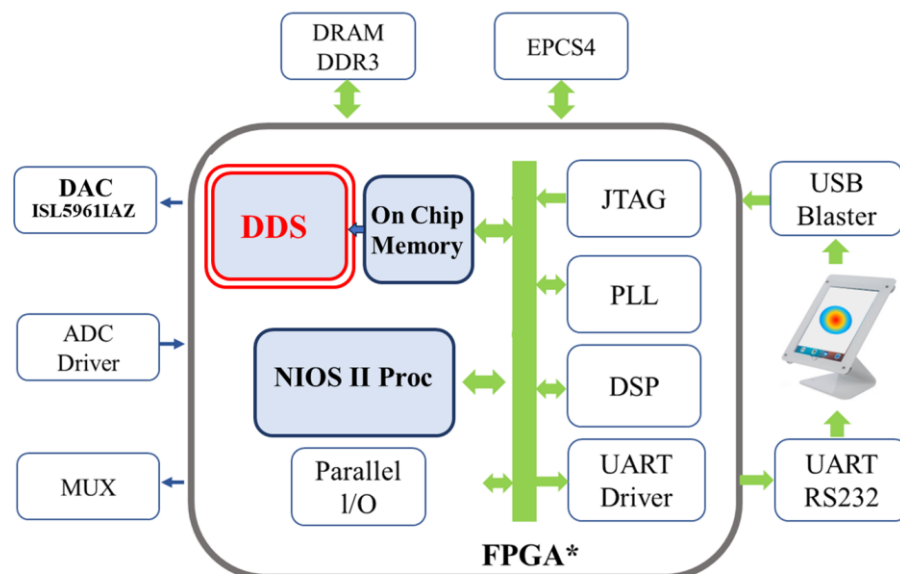


Figure 1. Block diagram of FPGA design

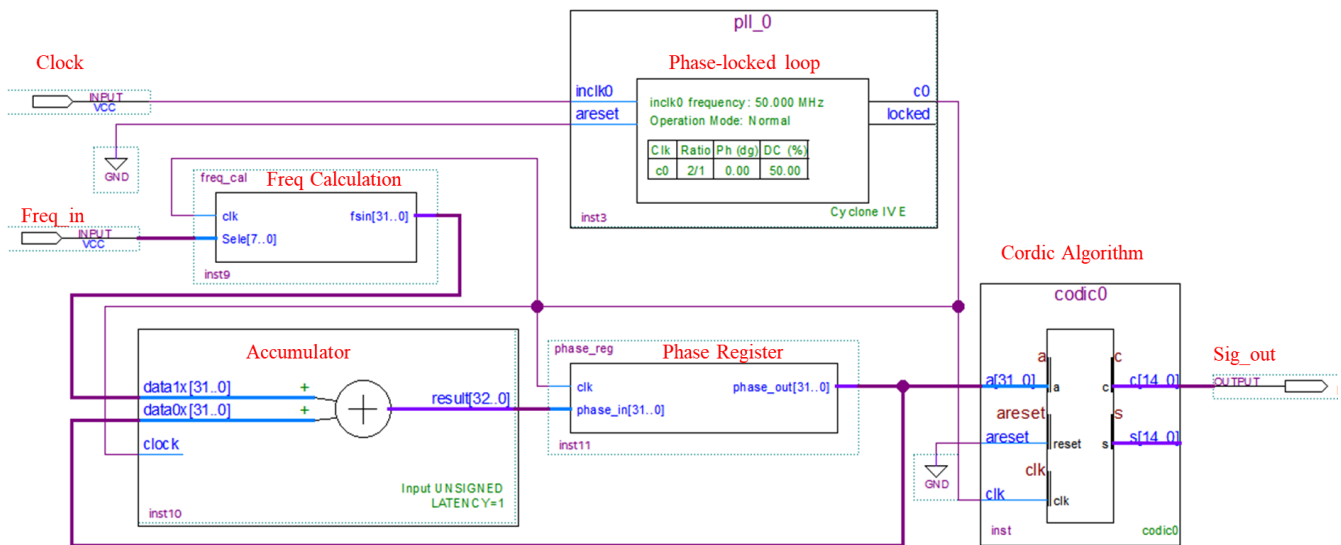


Figure 2. Block diagram of FPGA design

1) *DDS Configuration*: Figure 1 shows the FPGA design, which is created using NIOS II Processor. NIOS II Processor is a reprogrammable processor widely used in FPGA-based system applications. Its primary function is to manage and coordinate the operation of the entire system. In amplitude and phase difference measurements, the NIOS II Processor is used to control the measurement workflow, organize data acquisition, and manage interactions with other components.

DDS is used to generate a sinusoidal wave with a frequency according to the requirements. The DDS system primarily consists of a phase accumulator, a phase modulator, and a sinusoidal ROM lookup table. From here, the output, which is still in digital form, will be converted into an analog signal by a DAC, and then smoothed using a low-pass filter. Figure 2 shows the block diagram of the DDS structure.

Phase-Locked Loop (PLL) is often used in DDS systems to stabilize and multiply the reference clock frequency, ensuring a stable high-frequency clock signal that drives the DDS. It helps synchronize the output frequency with an external reference, improving signal stability.

The output frequency of the DDS is determined by the binary input M which is loaded into a frequency register. Here this research needs a Frequency Calculation (for Register Based on n-bit Phase Accumulator). This output value is used in the phase accumulator to step through the phase of the waveform. The formula for output frequency is in (1).

$$f_{out} = \frac{Mf_c}{2^n} \quad (1)$$

where f_{out} is the output frequency of the DDS, M is the binary input, f_c is the reference clock frequency, and n is the total length of the phase accumulator (in bits). In this research we

use an n-bit phase accumulator = 32, an M value of 0000...0001 will cause the phase accumulator to overflow after 2^{32} clock cycles. If the M value is changed to 0111...1111, the phase accumulator will overflow after only 2 clock cycles (the minimum value required based on Nyquist). For example, in order to generate sine wave with frequency f_{out} 1 MHz, PLL frequency $f_c = 100$ MHz, and 32-bits phase accumulator will get $M = 42949673$.

The phase accumulator is a key part of the DDS system. It increments its value based on the input frequency word M and the clock signal. The accumulated phase is used to address a lookup table that contains values for the waveform (typically sinusoidal). The phase accumulator determines the phase progression of the output waveform.

Phase Register is to holds the current phase value, which is updated every clock cycle by the phase accumulator. It stores the phase information, which is then used to retrieve the corresponding amplitude values from the lookup table.

The study implemented two FPGA-based DDS architectures: one using the CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) algorithm and the other employing a LUT approach. The CORDIC algorithm is often used in DDS to efficiently compute trigonometric functions like sine and cosine without needing large lookup tables. It can be used to generate sine waves in real-time, reducing memory usage while maintaining accuracy, especially when the system requires a dynamic phase shift or when phase modulation is involved [14]. The other dds architecture is a LUT approach. LUT stores precomputed values of the sine and cosine functions for a set of discrete phase points. During operation, the phase accumulator output is used as an index to retrieve the corresponding sine or cosine value from the table. Typically, LUTs are stored in memory or ROM [15].

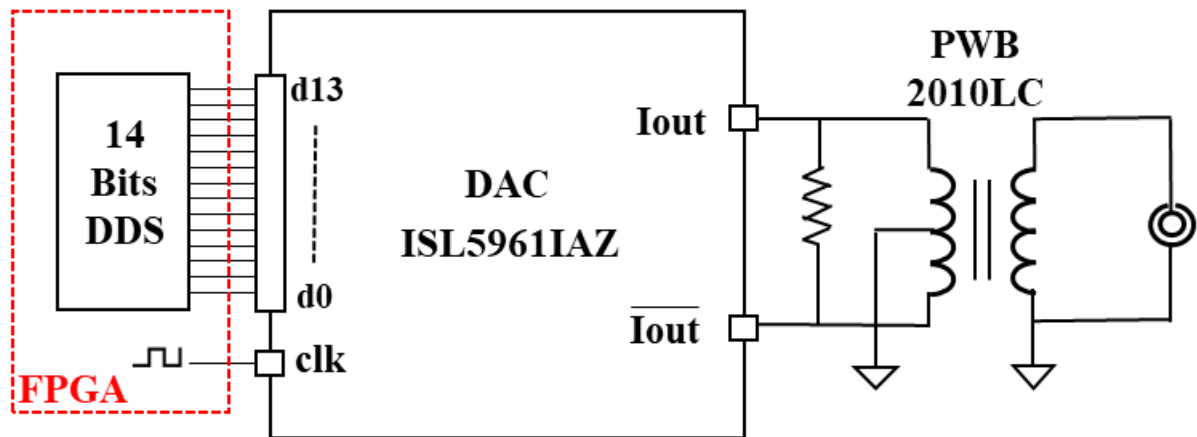


Figure 3. DDS integration with DAC and RF transformer

2) *DDS Integration:* The DDS system generates a sinusoidal waveform with a user-defined frequency, phase, and amplitude. Figure 3 shows DDS Integration with DAC and RF Transformer. The digital waveform generated by the DDS needs to be converted into an analog signal, which is achieved using ISL6961IAZ DAC. Following the DAC stage, the PWB2010LC RF transformer is used to perform impedance matching and provide the appropriate signal transformation for RF applications.

The DDS output, which is in a digital format, is converted into an analog waveform by the ISL6961IAZ. The high-speed nature of this DAC ensures that the frequency and phase information from the DDS is accurately translated into the analog domain. The ISL6961IAZ is a high-speed DAC that provides high precision for analog signal generation, wide output bandwidth, low noise and distortion. This characteristic is ideal for communication and signal processing applications.

The PWB2010LC is connected to the output of the ISL6961IAZ DAC to provide impedance matching between the DAC and the EIT, improving signal quality and transmission efficiency. The PWB2010LC is a RF transformer designed to operate in wide-range frequencies which is critical in ensuring the signal is transmitted efficiently without reflections or signal loss.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Signal Accuracy

The DDS system was tested to generate signals at two target frequencies. Figure 4 shows signals measurement at frequencies 100 kHz and 500 kHz. When set to 100 kHz, the actual signal measured on the oscilloscope was 100.4 kHz. For the 500 kHz target, the measured signal was 498.8 kHz.

These slight deviations are typical in DDS systems and can be attributed to factors such as clock jitter, finite resolution of

the phase accumulator, quantization errors during digital-to-analog conversion, and tolerances in the electronic components. Clock Jitter or Phase Noise is slight variations in the reference clock's stability. Even small amounts of jitter can introduce slight deviations in the output signal. While Finite Resolution of Phase Accumulator means DDS resolution is determined by the number of bits used. If the frequency tuning word cannot exactly match the desired frequency due to limited resolution, small errors occur.

Despite these minor discrepancies, the system exhibits a high level of accuracy, with errors of only 0.4% at 100 kHz and 0.24% at 500 kHz. These error levels fall within acceptable limits for most practical applications [16].

B. Cordic vs Lookup Table (LUT)

DDS both cordic and LUT are implemented on FPGA Cyclone IV E, EP4CE6E22C8 with software Quartus Prime Version 18.1.0 Lite Edition. Tabel 1 shows the resource usage differences between CORDIC and LUT.

The resource usage differences between the CORDIC algorithm and the LUT in a DDS implementation on an FPGA can be understood by analyzing how each method operates and the specific hardware resources they require. Logic elements (LEs) in an FPGA represent the basic building blocks used to perform logic operations like addition, subtraction, and shifting. CORDIC performs iterative computations for each sine and cosine value using shift and add operations. Each step involves performing multiple arithmetic operations, which requires a larger number of logic elements to implement. The complexity grows as the resolution and precision of the output increase, leading to more logic element consumption (1632, or 26% of total LEs). However, since CORDIC calculates values dynamically, it doesn't need to store precomputed values. The only memory usage is for intermediate variables, making it very memory-efficient (86 bits, or <1% of total memory).

Tabel 1. The resource usage between CORDIC and LUT

FPGA EP4CE6E22C8	Resources	Cordic Usage	LUT Usage
Total logic elements	6,272	1,632 [26%]	508 [8%]
Total registers	millions	1,464 [<1%]	364 [<1%]
Total pins	92	15 [16%]	15 [16%]
Total memory bits	27,6480	86 [<1%]	212,992 [77%]
Multiplier 9-bit elements	30	0 [0%]	0 [0%]
Total PLLs	2	1 [50%]	1 [50%]

The LUT method on the other hand, avoids complex calculations by storing precomputed values of sine and cosine. As a result, it only needs simple logic to fetch these values from memory and output them, which significantly reduces the need for logic elements (508, or 8% of total LEs). But LUT stores all the necessary waveform data ahead of time, which requires a large amount of memory. The size of the LUT is proportional to the precision of the DDS output. The higher the resolution and frequency precision required, the larger the lookup table, resulting in extensive memory usage (212,992 bits, or 77% of total memory).

C. Signal to Noise Ratio (SNR)

The SNR is a critical metric for evaluating the quality and performance of the generated signal [17]. It represents the ratio between the desired signal (useful information) and the unwanted noise (distortion or errors), and it is usually expressed in decibels (dB) as (2),

$$\text{SNR} = -20 \log \left(\frac{\psi}{\mu} \right) \quad (2)$$

where ψ is average noise floor, and μ is the value of measured voltage at injection frequency. In DDS applications, SNR is directly linked to the clarity, accuracy, and usability of the signal for real-world applications.

Figure 5 shows the SNR measurement between LUT and Cordic. Based on signal measurements, the CORDIC algorithm produced a signal with a SNR of 92 dB, while the LUT method

resulted in a signal with an SNR of 106 dB. The difference in SNR indicates that the lookup table method generates a cleaner signal with less noise compared to the CORDIC algorithm. This is likely due to the fact that LUT-based implementations directly store precomputed values for the waveform, leading to higher precision and fewer computational artifacts. In contrast, the CORDIC algorithm approximates trigonometric functions through iterative calculations, which, although efficient in terms of hardware resources, can introduce minor inaccuracies and contribute to slightly higher noise levels in the output signal. As a result, the LUT method offers superior signal quality, at the cost of increased memory usage, while the CORDIC algorithm is more resource-efficient but may have a lower SNR due to computational limitations.

The choice between CORDIC and LUT for DDS design depends on the specific needs of the application; CORDIC is ideal for systems with limited memory or where FPGA resources are constrained. While it provides adequate performance, the slightly lower SNR might not be suitable for applications requiring very high signal fidelity. While LUT is preferred for applications where signal accuracy is crucial, such as in high-performance RF systems or high-fidelity audio, even though it demands more memory.

In summary, the CORDIC algorithm is more efficient in terms of computational resources, but sacrifices some signal quality, whereas the LUT method provides superior signal quality at the cost of higher memory consumption. The choice



Figure 4. Signals measurement at two target frequencies 100 kHz and 500 kHz

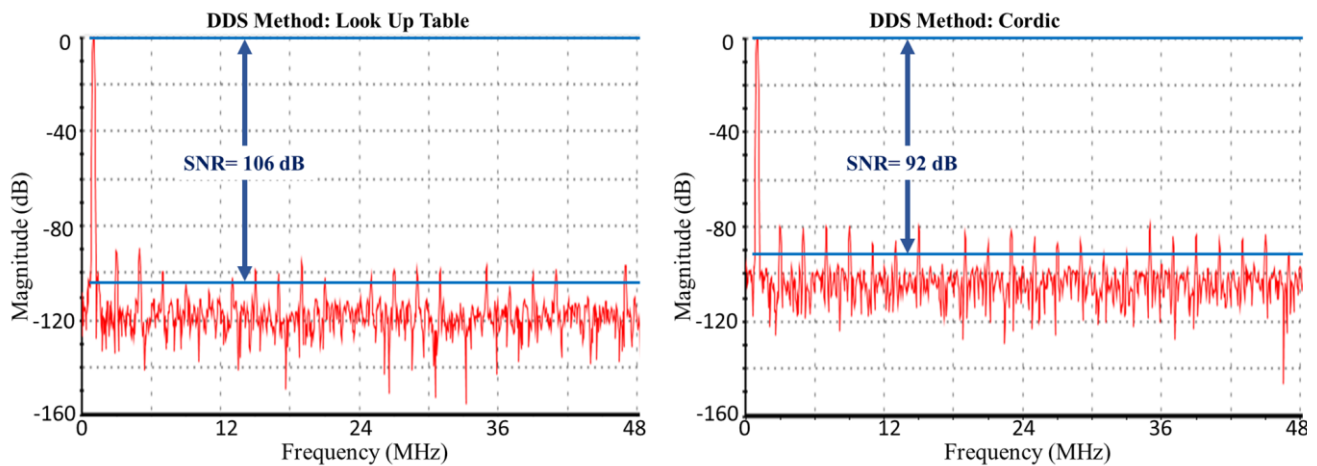


Figure 5. The SNR measurement between LUT and Cordic

between these two methods involves balancing resource availability and desired signal performance.

IV. CONCLUSION

The development of a Direct Digital Synthesizer (DDS) based on Field-Programmable Gate Array (FPGA) technology represents a significant step forward in the area of high-precision signal synthesis. This research demonstrates the successful implementation of two DDS architectures—one based on the CORDIC algorithm and the other utilizing a Look-Up Table (LUT) approach. Both designs achieved high accuracy in generating target frequencies, with only minimal deviations observed. Notably, the LUT-based implementation offered superior signal fidelity, achieving a Signal-to-Noise Ratio (SNR) of 106 dB compared to 92 dB for the CORDIC-based design. However, this improvement came with a trade-off in resource utilization: the CORDIC design consumed 26% of the available logic elements while using only 1% of memory, whereas the LUT-based design required significantly more memory—77% of the total—but only 8% of the logic elements. These results underscore the importance of balancing design choices based on application-specific constraints, particularly in terms of logic efficiency, memory availability, and the required signal quality. The higher SNR achieved by the LUT-based system highlights its potential for applications demanding low-noise and high-precision performance, while the CORDIC-based design remains a viable alternative where logic resources are limited and moderate signal fidelity is acceptable.

FUTURE WORK

At this stage of the research, while the implementation of the DDS in FPGA has shown promising results, there are several areas where further work can be focused to enhance system performance and address some of the current limitations. The DDS implementation, utilizing both CORDIC and LUT algorithms, has demonstrated distinct trade-offs between resource usage and signal quality. Future work can focus on improving the SNR further, particularly for applications that demand extremely high signal fidelity, such as advanced

biomedical imaging or high-precision RF systems. This could involve refining the CORDIC algorithm to reduce computational noise or optimizing the LUT size and resolution to further increase the accuracy of signal generation.

The implementation of post-processing filters, such as adaptive or programmable filters, also can be explored to smoothen the output waveform and further reduce spurious noise. This would be particularly useful in mitigating any residual noise introduced by the DAC or imperfections in signal synthesis, leading to cleaner signal generation, especially at higher frequencies.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the Academic Excellence Program 2024, Scheme C from Universitas Gadjah Mada, Assignment Number: 6530/UN1.P1/PT.01.03/2024. We extend our gratitude to the university for their financial support and resources, which made this work possible. Additionally, we would like to thank our colleagues and collaborators for their valuable input and assistance for this project.

REFERENCES

- [1] M. R. Baidillah, A. A. S. Iman, Y. Sun, and M. Takei, "Electrical impedance spectro-tomography based on dielectric relaxation model," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 24, pp. 8251–8262, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2710146.
- [2] G. Setyawan, P. A. Sejati, K. A. Ibrahim, and M. Takei, "Breast cancer recognition by electrical impedance tomography implemented with Gaussian relaxation-time distribution (EIT-GRTD)," *J. Electr. Bioimpedance*, vol. 15, no. 1, pp. 99–106, 2024, doi: 10.2478/joeb-2024-0011.
- [3] I. N. Rifai, M. R. Baidillah, R. Wicaksono, S. Akita, and M. Takei, "Sodium Concentration Imaging in Dermis Layer by Square-wave Open Electrical Impedance Tomography (SW-oEIT) with Spatial Voltage Thresholding (SVT)," *Biomed. Phys. Eng. Express*, vol. 9, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1088/2057-1976/acd4c6.
- [4] K. Sakai, P. N. Darma, P. A. Sejati, R. Wicaksono, H. Hayashi, and M. Takei, "Gastric functional monitoring by gastric electrical impedance tomography (gEIT) suit with dual-step fuzzy clustering," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–11, 2023, doi: 10.1038/s41598-022-27060-7.
- [5] G. Setyawan *et al.*, "Detection of invasive ductal carcinoma in quadrant breast areas by electrical impedance tomography implemented with gaussian relaxation-time distribution (EIT-

- GRTD),” *Biomed. Phys. Eng. Express*, vol. 10, no. 5, 2024, doi: 10.1088/2057-1976/ad5db1.
- [6] J. Hope, F. Vanholsbeeck, and A. McDaid, “Drive and measurement electrode patterns for electrode impedance tomography (EIT) imaging of neural activity in peripheral nerve,” *Biomed. Phys. Eng. Express*, vol. 4, no. 6, p. 67002, Sep. 2018, doi: 10.1088/2057-1976/aadff3.
- [7] X. Shi *et al.*, “Design and implementation of a high-precision electrical impedance tomography data acquisition system for brain imaging,” *Proc. - 2016 IEEE Biomed. Circuits Syst. Conf. BioCAS 2016*, pp. 9–13, 2016, doi: 10.1109/BioCAS.2016.7833712.
- [8] X. Yue and C. McLeod, “FPGA design and implementation for EIT data acquisition,” *Physiol. Meas.*, vol. 29, no. 10, pp. 1233–1246, 2008, doi: 10.1088/0967-3334/29/10/007.
- [9] D. Trebbels, D. Woelki, and R. Zengerle, “High precision phase measurement technique for cell impedance spectroscopy,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 224, no. 1, 2010, doi: 10.1088/1742-6596/224/1/012159.
- [10] P. A. Sejati, B. Sun, P. N. Darma, T. Shirai, K. Narita, and M. Takei, “Multi-node Electrical Impedance Tomography (mnEIT) throughout Whole-body Electrical Muscle Stimulation (wbEMS),” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3282295.
- [11] F. Measurement, I. N. Rifai, P. A. Sejati, S. Akita, M. Takei, and S. Member, “FPGA-Based Planar Sensor Electrical Impedance Tomography (FPGA-psEIT) System Characterized by Double Feedback Howland Constant- Current Pump and Programmable,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1109/TIM.2024.3441023.
- [12] B. B. Murti, “Rancang Bangun Sistem Pemonitor Gelombang Otak Nirkabel Berbasis Mikrokontroler,” *J. List. Instrumentasi dan Elektron. Terap.*, vol. 2, no. 2, pp. 7–13, 2021, doi: 10.22146/juliet.v2i2.70751.
- [13] A. S. Tucker, R. M. Fox, and R. J. Sadleir, “Biocompatible, high precision, wideband, improved howland current source with lead-lag compensation,” *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.*, vol. 7, no. 1, pp. 63–70, 2013, doi: 10.1109/TBCAS.2012.2199114.
- [14] P. Revathi, M. V. N. Rao, and G. R. Locharla, “Architecture Design and FPGA Implementation of CORDIC Algorithm for Fingerprint Recognition Applications,” *Procedia Technol.*, vol. 6, pp. 371–378, 2012, doi: 10.1016/j.protcy.2012.10.044.
- [15] S. Senthamizh and Y. Sathi, “Area reduction in cordic processor using lookup table Method,” pp. 493–496, 2013.
- [16] X. Wang and Q. Mei, “High-Precision Design of DDS Based on FPGA,” in *2012 Third Global Congress on Intelligent Systems*, 2012, pp. 386–389, doi: 10.1109/GCIS.2012.20.
- [17] E. I. Alwi, “Analisis Kualitas Sinyal Wifi Pada Universitas Muslim Indonesia,” *INFORMAL Informatics J.*, vol. 4, no. 1, p. 30, 2019, doi: 10.19184/isj.v4i1.10153.

Analisis Penerapan Tapis LC pada *Inverter Static* Tiga Tingkat di PT INKA Madiun

Lailiyana Tri Rahmawati¹, Hidayat Nur Isnianto^{1*}, Achmad Sugandi²

¹Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol, Universitas Gadjah Mada; lailiyanatrirahmawati17@mail.ugm.ac.id

²Sistem Komponen Tier 1 dan 2, PT. Industri Kereta Api; achmad.sugandi@inka.co.id

*Korespondensi: hnIsnianto@ugm.ac.id

Abstract – *The use of three tingkat inverters in the SIV series in this research can support the operation of KRL and KRDE in Indonesia, especially when PT INKA can produce the system independently. In this LC filter value analysis research, the author used two parameters in the comparative analysis of L and C filter components, namely the Zheta and THD parameters. THD (total harmonic distortion) is the percentage value between the harmonic quantity compared to the fundamental quantity. Zheta is a parameter obtained from the derivative of the LC filter equation at order 2. Zheta plays a role in determining the LC value input process and for analyzing bad harmonic values at multiples of 50Hz (the basic frequency used by the system). From the research results, if the inductance and capacitance are reduced, it can be concluded that the optimum ACL and ACC values are the ACL value is 300 μ H and the ACC value is 300 μ F with the previous switching frequency value of 1000 Hz changed to 3000 Hz. Because with the values above, when simulated, an output graph is obtained that matches what is needed. This can also be seen from the FFT signal, that at a multiple of 3000 there is no significant increase in the graph. It could be said to be an ideal value because the ACPTU value when the THD is 50Hz with load and no load conditions is below 10%.*

Keywords – *SIV, three level inverter, zheta, thd, inductance, capacitance*

Intisari – Penggunaan KRL dan KRDE di daerah Sumatra dan Jawa memudahkan mobilisasi masyarakat dan membantu dalam mengurangi penggunaan transportasi pribadi dan dapat mengurangi tingkat kemacetan, sehingga sistem pendistribusian dan pengendalian daya listrik yang baik pada KRL dan KRDE merupakan salah satu hal penting yang digunakan dalam pengoperasian kereta. Sistem kelistrikan yang digunakan kereta di PT INKA pada saat ini masih berupa SIV dua tingkat yang memiliki kelemahan pada keluarannya berupa gelombang harmonik yang belum sesuai dengan yang dibutuhkan. Oleh karena itu perlu dirancang rangkaian elektrik *inverter* nilai filter LC yang tepat sehingga dapat menghasilkan *total harmonic distortion* (THD) yang sesuai untuk sistem kelistrikan kereta agar sistem dapat berjalan dengan baik dan stabil. Pada penelitian ini akan dilakukan analisis nilai filter LC menggunakan dua parameter yaitu Zheta dan THD. Dari hasil penelitian jika induktansi dan kapasitansi diturunkan, maka nilai optimum ACL adalah 300 μ H dan nilai ACC 300 μ F dengan nilai frekuensi *switching* yang sebelumnya 1.000 Hz diganti menjadi 3.000 Hz, karena saat disimulasikan didapatkan grafik *output* yang sesuai dengan yang dibutuhkan dan sinyal FFT pada kelipatan 3.000 tidak ada peningkatan grafik yang signifikan, sehingga nilai ACPTU pada saat frekuensi 50 Hz, nilai THD dengan keadaan berbeban dan tidak berbeban dibawah 10%.

Kata kunci – *SIV, inverter tiga tingkat, zheta, thd, induktansi, kapasitansi*

I. PENDAHULUAN

Penggunaan Kereta Rel Listrik (KRL) dan Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) di Jabodetabek serta beberapa daerah di Sumatra dan Jawa memudahkan mobilisasi masyarakat dapat membantu dalam mengurangi penggunaan transportasi pribadi sehingga dapat mengurangi tingkat kemacetan. Menurut data dari PT. Kereta Api Indonesia (PT KAI) per Februari 2023, sekitar 77% pengguna jasa layanan KRL Jabodetabek dari PT KAI merupakan pengguna sehari-hari yang berjumlah sekitar delapan juta penumpang dan diperkirakan akan terus meningkat [1]. Oleh karena itu, sangat banyak orang yang memiliki ketergantungan atas kelancaran perjalanan menggunakan KRL maupun KRDE. Dengan demikian, sistem pendistribusian dan pengendalian daya listrik yang baik pada KRL dan KRDE merupakan salah satu hal penting yang digunakan dalam pengoperasian kereta.

Untuk sistem kelistrikan yang digunakan kereta di PT INKA pada saat ini masih *static inverter* (SIV) dua tingkat [2], [3] yang memiliki kelemahan pada keluarannya terdapat gelombang harmonik yang belum sesuai dengan yang dibutuhkan. Oleh karena itu untuk menurunkan gelombang harmonik dirancang *inverter* dengan filter LC yang tepat agar

dapat menghasilkan *total harmonic distortion* (THD) yang sesuai untuk sistem kelistrikan kereta, sehingga sistem dapat berjalan dengan baik dan stabil.

Perancangan rangkaian *inverter* tiga tingkat yang dikombinasikan dengan filter LC dan sistem kontrol loop tertutup ini memiliki tujuan utama untuk mendapatkan THD yang sesuai dengan dibutuhkan dan tidak memiliki permasalahan pada berat atau massa. Integrasi ini penting karena untuk mendapatkan tegangan berkualitas tinggi, sehingga tidak memicu adanya permasalahan lainnya pada sistem kelistrikan kereta, misalnya menurunnya efisiensi sistem kelistrikan kereta disebabkan beratnya beban filter LC. Peningkatan *inverter* dari dua tingkat menjadi tiga tingkat merupakan cara yang dinilai paling tepat untuk mengatasi permasalahan yang sedang terjadi pada sistem kelistrikan kereta [4], nilai filter LC yang tepat dapat menghasilkan gelombang harmonik (THD) yang sesuai untuk sistem kelistrikan kereta sehingga dapat berjalan dengan stabil. [5]

Filter LC dapat mengurangi harmonik tegangan keluaran dan mendapatkan THD sesuai yang diprasyaratkan [6]. Untuk meningkatkan kinerja dan meminimalkan THD, maka,

desain filter dapat dioptimalkan menggunakan model kontrol prediktif (MPC) [7]. Penggunaan filter LCL pada *inverter* tiga level telah terbukti mengurangi harmonisa secara signifikan, mencapai tingkat THD di bawah 5% dalam aplikasi praktis [8][9].

Selain perancangan filter LC dan sistem kontrol loop tertutup pada *inverter* tiga tingkat, juga diamati pengaruh disipasi pada komponen IGBT (*insulated gate bipolar transistor*) [10], [11] yang merupakan jumlah daya yang diubah menjadi energi panas pada saat IGBT bekerja. Hasil disipasi akan dijadikan perbandingan pada rancangan *inverter* dua tingkat dan rangkaian *inverter* tiga tingkat. Rangkaian *inverter* dua tingkat tiga fase yang masih digunakan dalam sistem kelistrikan kereta diketahui jika nilai disipasi IGBT yang dihasilkan masih cukup besar, hal ini dapat menimbulkan gangguan suhu yang cukup tinggi ke lingkungan sekitar menjadi lebih panas dan mengganggu komponen-komponen lainnya.

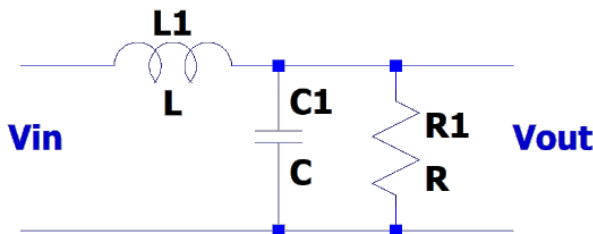
Penggunaan *inverter* tiga tingkat pada rangkaian SIV mendukung pengoperasian KRL dan KRDE di Indonesia terutama saat PT INKA telah dapat memproduksi sistem tersebut secara mandiri [12]. Dengan sistem tersebut, diharapkan pengoperasian kereta dapat tetap berjalan dan dapat mengantarkan penumpang dengan aman dan nyaman sampai tujuan.

II. METODOLOGI

Terdapat dua parameter dalam analisis perbandingan komponen filter L C, yaitu parameter Zheta dan THD. THD adalah nilai persentase antara besaran harmonik berbanding dengan besaran fundamental [13], [14]. THD adalah suatu cara kuantifikasi besarnya distorsi harmonik terhadap sistem distribusi yang dapat dinyatakan dengan (1):

$$THD = \frac{\Sigma V_{harmoni k}}{\Sigma V_{fundamental}} \quad (1)$$

Zheta merupakan sebuah parameter yang didapatkan dari turunan persamaan filter LC pada orde dua dengan rangkaian seperti pada Gambar 1. Sistematika filter LC seperti Gambar 1, dapat diselesaikan dengan (2), (3), (4)



Gambar 1. Rangkaian filter LC

$$Z_0 = \frac{X_C}{R}; X_C = \frac{1}{S_C} \quad (2)$$

$$Z_{tot} = Z_0 + X_C = Z_0 + S_C = \frac{R}{SRC + 1} + S_C \frac{(SRC + 1)}{SRC + 1}$$

$$Z_0 = \frac{X_C \times R}{X_C + R} = \frac{1/S_C \times R}{1/S_C + R} = \frac{R/S_C}{1/S_C + R} \times \frac{S_C}{S_C} = \frac{R}{SRC + 1} \quad (3)$$

$$Z_{tot} = \frac{R + S_C(SRC + 1)}{SRC + 1}$$

$$Z_{tot} = \frac{R + S^2 LRC + S_C}{SRC + 1}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Z_0}{Z_{tot}} = \frac{\frac{R}{SRC + 1}}{\frac{R + S^2 LRC + S_C}{SRC + 1}} = \frac{R}{S^2 LRC + S_C + R}$$

$$= \frac{1}{S^2 LC + \frac{SL}{R} + 1} \times \frac{\frac{1}{LC}}{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

$$\frac{Z_0}{Z_{tot}} = \frac{\frac{1}{LC}}{S^2 + S \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}}$$

Persamaan filter LC orde 2 dituliskan pada (5):

$$G(s) = \frac{\omega n^2}{s^2 + 2\zeta \omega n s + \omega n^2} \approx \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + S \frac{1}{RC} + \frac{1}{LC}} \quad (5)$$

dengan diketahui bahwa $\omega n^2 = \frac{1}{LC}$, $\omega n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ maka jika diambil nilai Zheta akan didapatkan (6), (7):

$$2\zeta \omega n = \frac{1}{RC}$$

$$2\zeta = \frac{1}{RC \omega n} = \frac{1}{RC \frac{1}{\sqrt{LC}}} = \frac{\sqrt{LC}}{RC} = \frac{\sqrt{C}\sqrt{L}}{R\sqrt{C}\sqrt{C}} \quad (6)$$

$$\zeta = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

Simbol ζ di sini berperan dalam menentukan saat proses *input* nilai L dan C. Dari (7) dapat diketahui bahwa nilai Zheta sebanding dengan L dan berbanding terbalik dengan C. Nilai Zheta dapat juga digunakan untuk analisis nilai harmonik yang buruk pada frekuensi kelipatan 50 Hz yang merupakan frekuensi dasar yang digunakan sistem.

Sistem kontrol *inverter* terdiri dari kontrol loop tertutup dan transformasi ABC to DQ. Transformasi ABC ke DQ merupakan kombinasi dari transformasi Clark (ABC ke $\alpha\beta$) dan transformasi Park ($\alpha\beta$ ke DQ). Transformasi Clarke (ABC ke $\alpha\beta$) merupakan transformasi yang mengubah tegangan maupun arus tiga fase menjadi tegangan atau arus dua fase ($\alpha\beta$) dalam sistem koordinat stasioner. Transformasi Clarke adalah transformasi yang mengubah tegangan maupun arus dua fase ($\alpha\beta$) pada sistem koordinat stasioner menjadi dua fase (DQ) menjadi sistem koordinat yang berputar sinkron. Untuk persamaan matriks transformasi sumbu ABC to DQ pada (8) dan (9).

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{pmatrix} \quad (9)$$

Keluaran SIV memiliki keluaran gelombang sinus 3 fase, maka dibutuhkan sesuatu untuk mendiadakan gelombang tersebut. Proses transformasi ABC to DQ ini dapat mengendalikan gelombang AC yang bergerak menggunakan gelombang DC yang diam.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

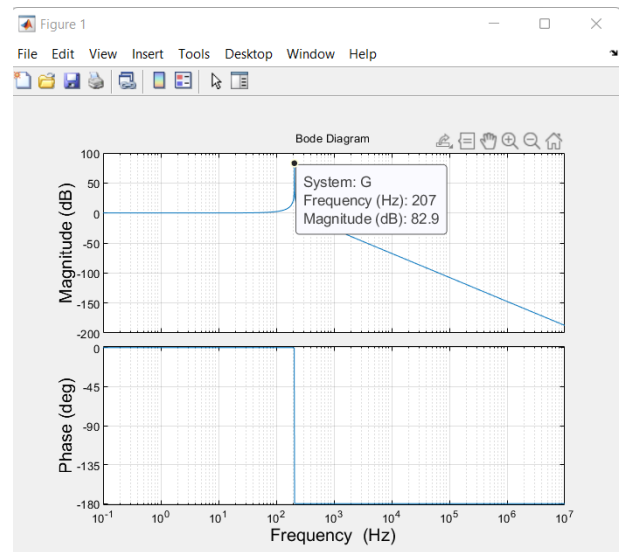
Dalam percobaan yang dilakukan, terdapat empat macam kondisi filter LC yang terdiri dari kondisi normal yaitu kondisi filter LC terpasang, kemudian kondisi penurunan nilai L dari nilai kondisi normal, penurunan nilai C dari nilai kondisi normal, dan penurunan kedua nilai komponen LC.

Setiap kondisi memiliki dua perbedaan yaitu tanpa beban dan dengan beban. Beban yang dimaksudkan adalah nilai dari resistor beban yang memberikan efek redaman dari gelombang yang akan dihasilkan dengan harapan mampu meredam gain yang muncul pada gelombang *output* filter LC. Berikut merupakan kondisi serta analisis yang telah dilakukan:

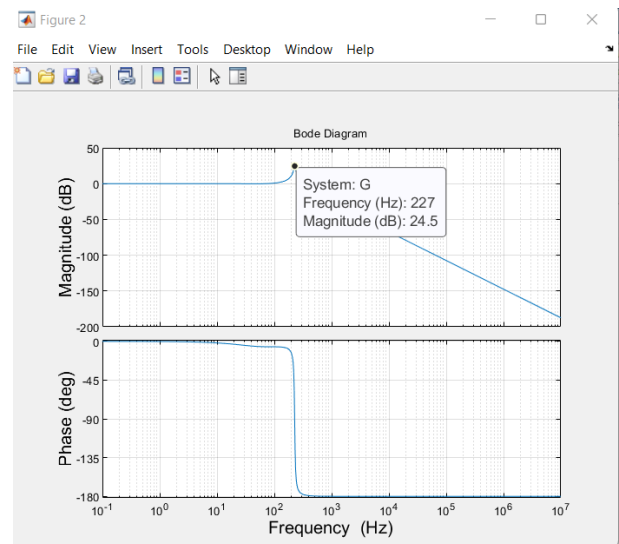
A. Kondisi Normal

Inverter tiga tingkat dengan filter LC, yang terdiri dari induktor (L) 600 μ H dan kapasitor (C) 1.080 μ F, memiliki karakteristik yang berbeda dalam keadaan tidak berbeban dan berbeban. Ketika *inverter* tiga tingkat tidak memiliki beban yang terhubung, karakteristik filter LC akan dominan. Filter LC bertujuan untuk meredam harmonisa yang mungkin dihasilkan oleh *inverter* tiga tingkat. Grafik tanggapan respons dari sitem dala kondisi tak berbeban dan berbeban disajikan dalam Gambar 2 dan Gambar 3. Magnitudo diplot dalam desibel (dB) sedangkan fase diplot dalam derajat ($^\circ$). Untuk kedua plot, sumbu horizontal adalah frekuensi (f) atau frekuensi sudut (ω), masing-masing diukur dalam Hz atau rad/s. Sumbu horizontal dalam skala logaritmik (yaitu meningkat dengan faktor 10).

Pada Gambar 2 ketika kondisi tidak berbeban, nilai fase stabil sampai pada frekuensi *cut off* dari filter LC, dan menurun secara tajam diatas frekuensi *cut off*nya, tetapi ketika dalam kondisi berbeban, maka ketika frekuensi dinaikkan mendekati frekuensi *cut off*, maka fasenya cenderung menurun, dan akan menurun tajam diatas frekuensi *cut off* seperti terlihat pada Gambar 3. Sehingga terlihat perbedaan kondisi tanpa beban dan berbeban pada fiter LC yang dipasang.



Gambar 2. Hasil bode diagram kondisi normal saat tidak berbeban

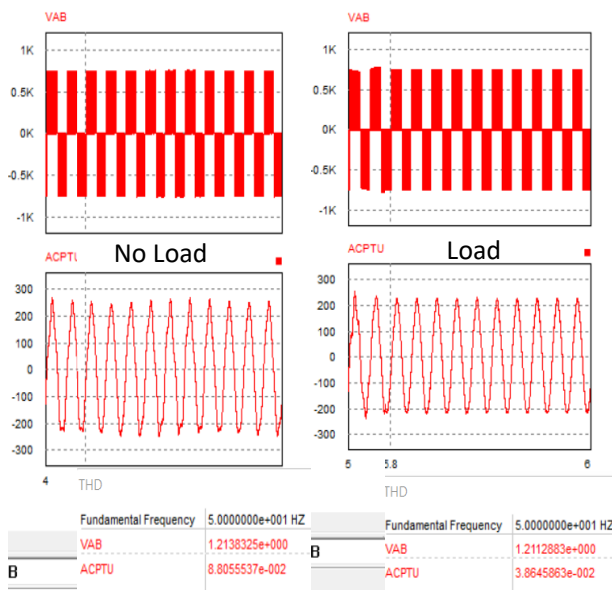


Gambar 3. Hasil bode diagram kondisi normal saat berbeban

Workspace		Workspace	
Name ^	Value	Name ^	Value
frek	206.5033	frek	206.5033
zheta	3.5681e-05	zheta	0.3398

Gambar 4. Hasil Zheta kondisi normal saat tidak berbeban dan berbeban

Nilai Zheta menurut Persamaan (7) digunakan untuk analisis nilai harmonik pada frekuensi kelipatan dasar dari 50 Hz yang nilainya sebanding dengan L dan berbanding terbalik dengan C, maka dari Gambar 4 diketahui bahwa kondisi berbeban nilai harmoniknya semakin bertambah besar dari kondisi tanpa beban.



Gambar 5. Hasil output VAB dan ACPTU beserta nilai THD saat tidak berbeban dan berbeban

Gelombang VAB seperti pada Gambar 5 merupakan keluaran inverter, sedangkan gelombang VBC, dan VCA pada inverter sama dengan VAB hanya memiliki beda fase 120° . Pada Gambar 5 juga disajikan perbandingan THD dan ACPTU dalam kondisi tidak berbeban dan berbeban. Dalam keadaan tidak berbeban maka Induktor (L) dengan nilai 600 μH akan menyediakan impedansi yang relatif tinggi terhadap frekuensi-frekuensi tinggi. Hal ini mengakibatkan filter LC memberikan penyaringan yang baik terhadap harmonisa tinggi yang dihasilkan oleh *switching inverter*. Kapasitor (C) 1.080 μF akan bekerja sebagai penyaring untuk tegangan DC yang mungkin ada pada *output inverter*. Kapasitor ini membantu mempertahankan tegangan rata-rata pada tingkat yang diinginkan dan meredam fluktuasi tegangan DC yang mungkin terjadi.

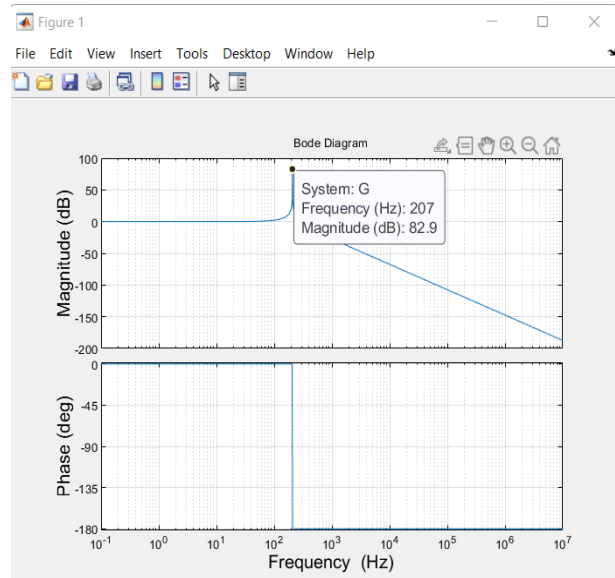
Ketika *inverter* tiga tingkat memiliki beban yang terhubung, karakteristik sirkuit akan berubah maka Induktor (L) 600 μH akan tetap berfungsi sebagai bagian dari filter LC, namun reaktansinya akan mempengaruhi arus yang mengalir ke beban. Induktor akan membantu menyediakan arus yang lebih stabil dan mengurangi lonjakan arus saat beban beralih. Kapasitor (C) 1.080 μF akan tetap berfungsi untuk menyaring tegangan DC dan mengompensasi fluktuasi tegangan yang mungkin terjadi akibat perubahan beban.

B. Kondisi Saat Induktansi Diturunkan

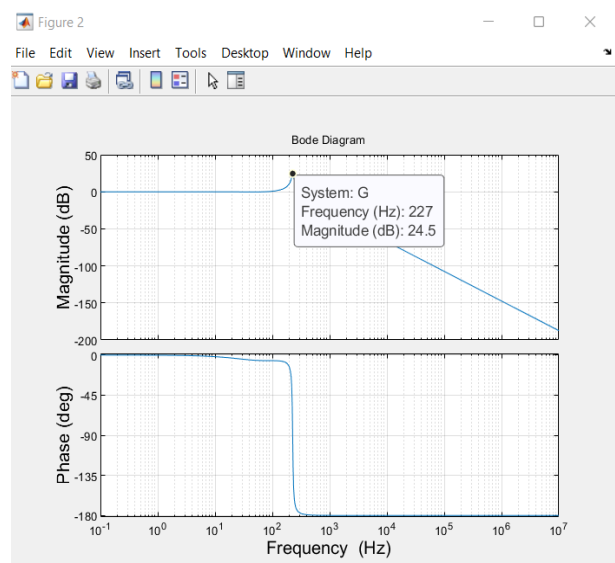
Hasil simulasi dengan nilai $L = 550 \mu\text{H}$ dan $C = 1.080 \mu\text{F}$ dalam bentuk grafik frekuensi respon dari sistem disajikan dalam Gambar 6 ketika kondisi tidak berbeban, nilai fase stabil sampai pada frekuensi cut off dari filter LC, dan menurun secara tajam diatas frekuensi cut offnya, tetapi ketika dalam kondisi berbeban, maka ketika frekuensi dinaikkan mendekati frekuensi *cut off*, maka fasenya cenderung menurun, dan akan menurun tajam diatas frekuensi cut off seperti terlihat pada Gambar 7. Sehingga terlihat

perbedaan kondisi tanpa beban dan berbeban pada filter LC yang dipasang.

Nilai Zheta yang dihasilkan ketika nilai induktans diturunkan sesuai (7) diperoleh seperti pada Gambar 8 di mana kondisi berbeban nilai harmoniknya semakin bertambah besar dibandingkan dengan ketika kondisi tanpa beban.



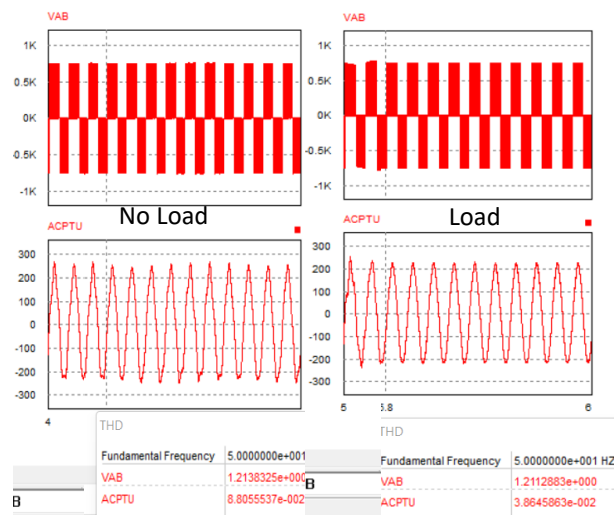
Gambar 6. Hasil bode diagram kondisi normal saat tidak berbeban.



Gambar 7. Hasil bode diagram kondisi normal saat berbeban.

Workspace		Workspace	
Name	Value	Name	Value
frek	206.5033	frek	206.5033
zheta	3.5681e-05	zheta	0.3398

Gambar 8. Hasil Zheta kondisi saat tidak berbeban dan berbeban



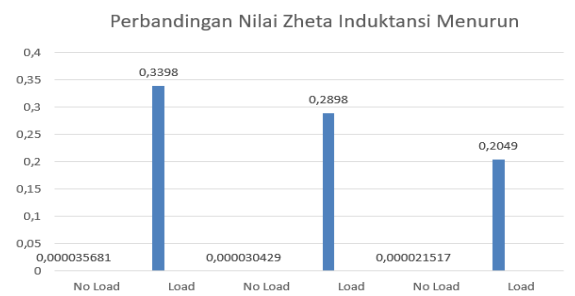
Gambar 9. Hasil output VAB dan ACPTU beserta nilai THD saat tidak berbeban dan berbeban

Pada Gambar 9 ditunjukkan bentuk gelombang keluaran inverter posisi VAB. Selain itu juga disajikan perbandingan THD dan ACPTU dalam kondisi tidak berbeban dan berbeban. Dalam keadaan tidak berbeban, maka induktor (L) 550 μ H akan menghasilkan impedansi yang tinggi pada frekuensi tinggi. Hal ini mengakibatkan filter LC memberikan penyaringan yang baik terhadap harmonisa tinggi yang dihasilkan oleh *switching inverter*. Kapasitor (C) 1.080 μ F akan bekerja sebagai penyaring untuk tegangan DC pada output inverter, sehingga membantu mempertahankan tegangan rata-rata pada tingkat yang diinginkan dan meredam fluktuasi tegangan DC. Hasil pengujian ketika nilai induktansi (L) pada filter LC diturunkan disajikan pada Tabel 1.

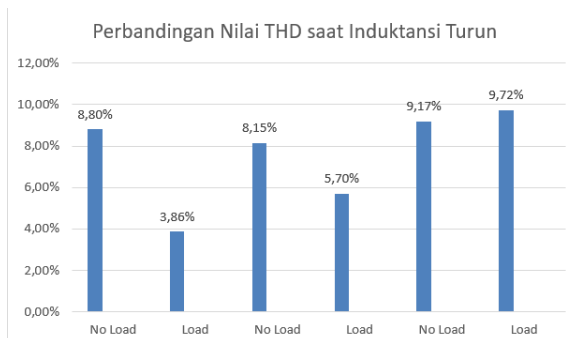
Tabel 1. Kondisi saat nilai induktansi diturunkan

L (μ H)	Kondisi	f (Hz)	MATLAB		PSIM THD ACPTU (%)
			Mag (dB)	Zheta	
600	NO	242	84,3	3,04e-05	8,00
	LOAD	260	28,3	0,289	5,73
550	NO	342	87,3	2,15e-05	9,17
	LOAD	345	64,2	0,2049	9,72

Dari Tabel 1 diketahui bahwa nilai zheta mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya nilai induktansi, menunjukkan bahwa zheta berbanding lurus dengan induktansi, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan $\zeta = 1/2R\sqrt{L/C}$. Selain itu, nilai THD cenderung meningkat ketika nilai induktansi menurun. Hal ini disebabkan oleh penurunan impedansi filter pada frekuensi-frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) akibat berkurangnya induktansi, sehingga sinyal harmonik lebih mudah lolos melalui filter dan bercampur dengan sinyal fundamental, yang pada akhirnya menyebabkan kenaikan nilai THD.



Gambar 10. Perbandingan nilai Zheta induktansi turun



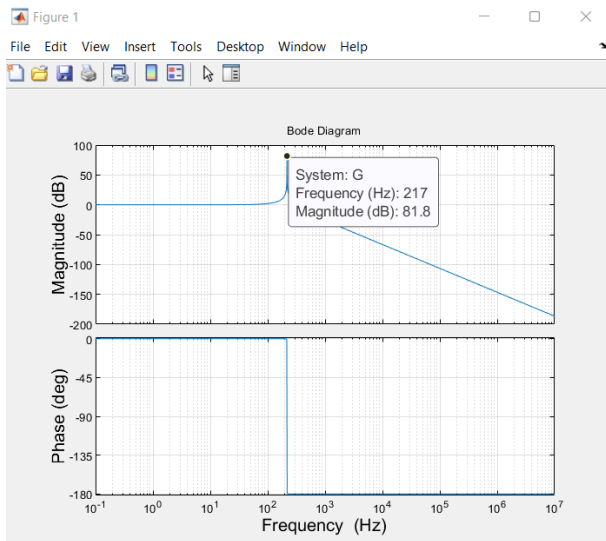
Gambar 11. Perbandingan nilai THD induktansi turun

Dari Gambar 10 dapat diketahui bahwa nilai Zheta akan semakin turun seiring dengan turunnya nilai induktansi, hal ini membuktikan bahwa nilai Zheta sebanding dengan nilai induktansi, sesuai dengan Persamaan (7). Selanjutnya dari Gambar 11 diketahui nilai THD dengan *No Load* biasanya lebih besar dibanding dengan yang *Load* apabila penurunan nilai induktansi terjadi secara signifikan (sedikit-sedikit). Tapi ada juga keadaan yang menyebabkan nilai THD pada *Load* lebih besar dibanding dengan yang *No Load* (hal ini biasanya terjadi jika nilai induktansi menurun drastis mendekati nilai 0). Hal ini dapat terjadi karena dengan menurunnya nilai induktansi maka impedansi filter pada frekuensi-frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) juga akan menurun. Ini memungkinkan sinyal harmonik untuk lebih mudah melewati filter dan dicampurkan dengan sinyal fundamental, sehingga mempengaruhi nilai THD.

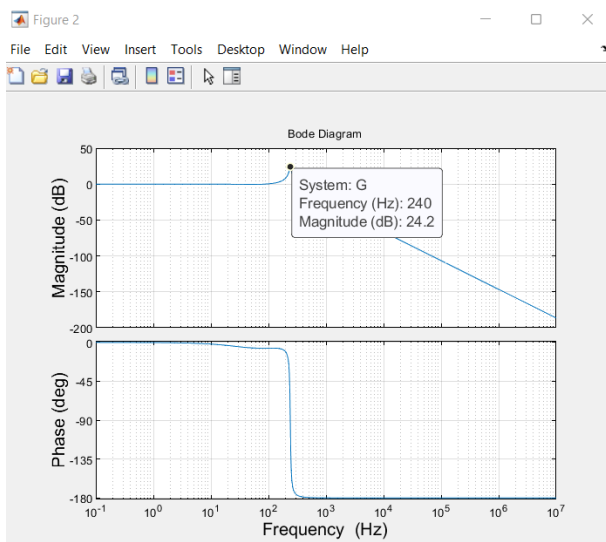
C. Kondisi Saat Kapasitans Diturunkan

Hasil Simulasi dengan nilai L= 600 μ H dan C = 900 μ F. Jika nilai Zheta dengan beban dan tanpa beban akan semakin tinggi seiring dengan turunnya nilai kapasitans, hal ini membuktikan bahwa nilai Zheta berbanding terbalik dengan nilai kapasitans, di mana sesuai dengan (7).

Nilai THD akan semakin meningkat seiring dengan menurunnya nilai kapasitans yang digunakan oleh rangkaian. Hal ini dapat terjadi karena dengan menurunnya nilai kapasitans maka impedansi filter pada frekuensi-frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) juga akan menurun. Hal ini memungkinkan sinyal harmonik untuk lebih mudah melewati filter dan dicampurkan dengan sinyal fundamental, sehingga mempengaruhi nilai THD.



Gambar 12. Hasil bode diagram kondisi normal saat tidak berbeban.



Gambar 13. Hasil bode diagram kondisi normal saat berbeban.

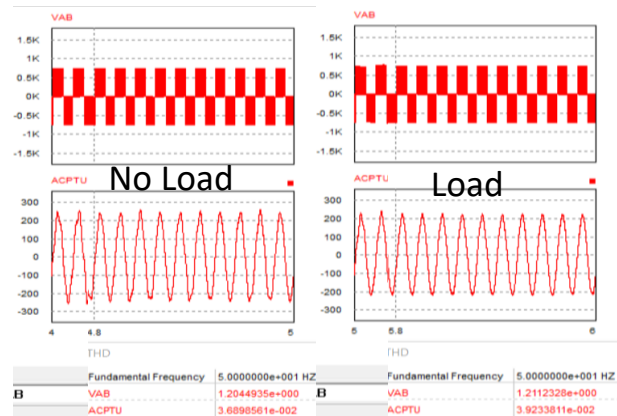
Pada Gambar 12 nilai fase stabil sampai pada frekuensi *cut off* dari filter LC, dan menurun secara tajam diatas frekuensi *cut off*nya, tetapi dalam kondisi berbeban ketika frekuensi dinaikkan mendekati frekuensi *cut off*, maka fasenya cenderung menurun, dan akan menurun tajam diatas frekuensi *cut off* seperti terlihat pada Gambar 13.

Workspace		Workspace	
Name ▲	Value	Name ▲	Value
frek	216.5824	frek	216.5824
zheta	4.0825e-05	zheta	0.3887

Gambar 14. Hasil Zheta kondisi saat tidak berbeban dan berbeban

Nilai Zheta menurut (7) diketahui bahwa kondisi berbeban nilai harmoniknya semakin bertambah besar dari kondisi tanpa beban seperti pada Gambar 14. Gelombang VAB seperti pada Gambar 15 merupakan keluaran inverter,

sedangkan gelombang VBC, dan VCA pada inverter sama dengan VAB hanya memiliki beda fase 120°. Pada Gambar 15 juga disajikan perbandingan THD dan ACPTU tidak berbeban dan berbeban.

Gambar 15. Hasil *output* VAB dan ACPTU beserta nilai THD saat tidak berbeban dan berbeban

Hasil pengujian ketika nilai kapasitans (C) pada filter LC diturunkan disajikan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 diketahui bahwa nilai zheta mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya nilai kapasitans, menunjukkan bahwa zheta berbanding terbalik dengan kapasitans, sebagaimana dinyatakan dalam persamaan $\zeta = 1/2R\sqrt{L/C}$. Selain itu, nilai THD cenderung meningkat ketika nilai kapasitans menurun. Hal ini disebabkan oleh kenaikan impedansi filter pada frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) akibat berkurangnya kapasitans, sehingga sinyal harmonik lebih mudah lolos melalui filter dan bercampur dengan sinyal fundamental, yang pada akhirnya menyebabkan kenaikan nilai THD.

Tabel 2. Kondisi saat nilai kapasitans diturunkan

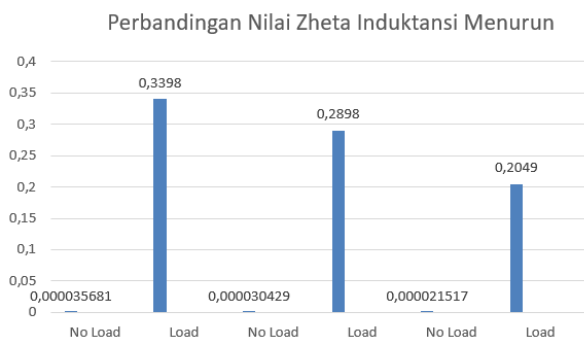
C (μF)	Kondisi	f (Hz)	MATLAB		PSIM
			Mag (dB)	Zheta	THD ACPTU (%)
1080	NO	237	81	4,47e-05	6,00
	LOAD	263	24,9	0,4258	4,73
900	NO	265	80	5e-05	8,76
	LOAD	294	25,7	0,4761	14,00

Dari Gambar 16 dapat diketahui bahwa nilai Zheta akan semakin naik seiring dengan turunnya nilai kapasitans, hal ini membuktikan bahwa nilai Zheta berbanding terbalik dengan nilai kapasitans yang sesuai dengan (7). Selanjutnya dari Gambar 17 diketahui nilai THD dengan *No Load* lebih besar dibanding dengan yang *Load* apabila penurunan nilai kapasitans terjadi secara signifikan.

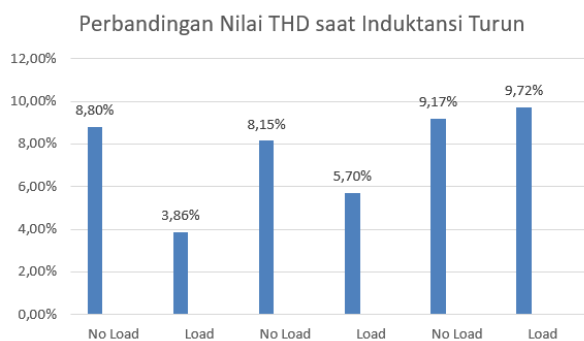
D. Kondisi Saat Induktansi dan Kapasitor Diturunkan

Hasil simulasi dengan nilai L= 300 μH dan C = 300 μF dalam bentuk grafik frekuensi respon dari sistem disajikan dalam Gambar 18 dan Gambar 19. Pada Gambar 18 ketika

kondisi tidak berbeban, nilai fase stabil sampai pada frekuensi *cut off* dari filter LC, dan menurun secara tajam di atas frekuensi *cut off*-nya, tetapi ketika dalam kondisi berbeban, maka ketika frekuensi dinaikkan mendekati frekuensi *cut off*, maka fasenya cenderung menurun, dan akan menurun tajam di atas frekuensi *cut off* seperti terlihat pada Gambar 19. Sehingga terlihat perbedaan kondisi tanpa beban dan berbeban pada filter LC yang dipasang.



Gambar 16. Perbandingan nilai Zheta Induktansi Turun

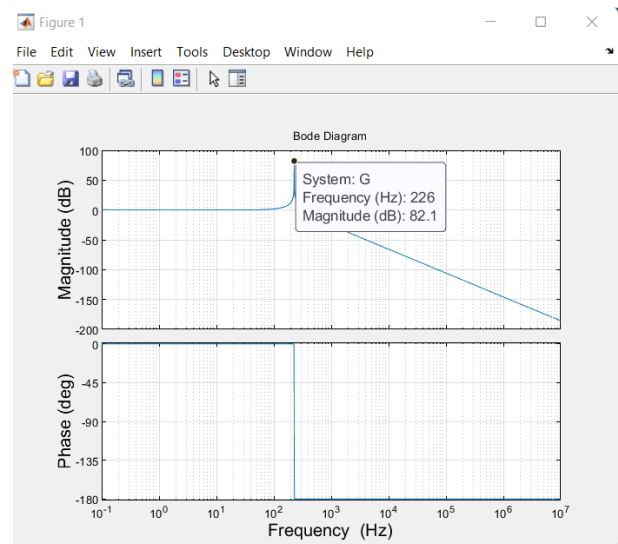


Gambar 17. Perbandingan nilai THD induktansi turun

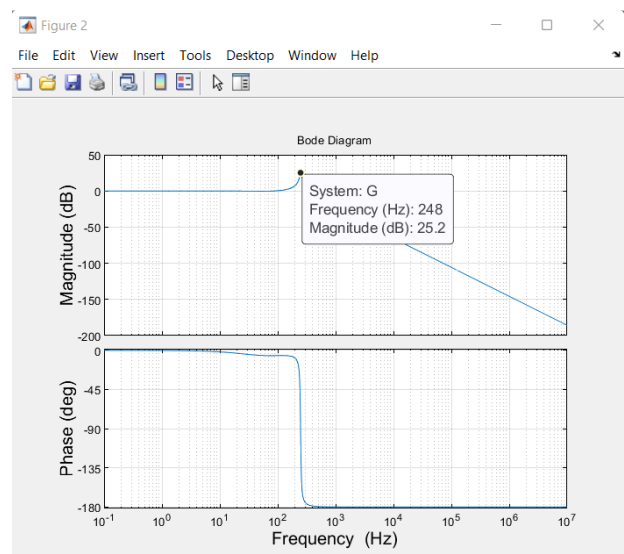
Pada Gambar 20, nilai Zheta sesuai (7) diketahui bahwa kondisi berbeban nilai harmoniknya semakin bertambah besar dari kondisi tanpa beban. Gelombang VAB seperti pada Gambar 21 merupakan keluaran *inverter*, sedangkan gelombang VBC, dan VCA pada *inverter* sama dengan VAB hanya memiliki beda fase 120°.

Pada Gambar 21 juga disajikan perbandingan THD dan ACPTU tidak berbeban dan berbeban. Hasil pengujian ketika nilai kapasitans dan induktans diturunkan disajikan pada Tabel 3. Dari Tabel 3 diketahui bahwa nilai zheta mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya nilai induktansi dan kapasitans, hal ini menunjukkan bahwa zheta berbanding lurus dengan induktansi dan berbanding terbalik dengan kapasitans. Selain itu, nilai THD cenderung meningkat ketika nilai induktansi dan kapasitans menurun. Hal ini disebabkan oleh penurunan impedansi filter pada frekuensi tinggi (frekuensi harmonik) sehingga sinyal harmonik lebih mudah lolos melalui filter dan bercampur dengan sinyal fundamental, yang pada akhirnya menyebabkan kenaikan nilai THD.

Dari Gambar 22 diketahui bahwa tinggi rendahnya nilai Zheta apabila kedua komponen diturunkan adalah dengan cara membagi nilai induktansi dengan kapasitans sesuai dengan persamaan, dengan begitu nilai Zheta akan sebanding dengan hasil bagi antara induktansi dengan kapasitans, sesuai dengan (7).



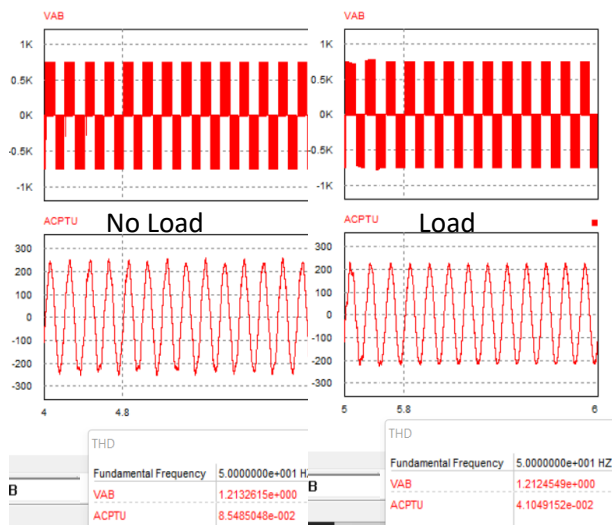
Gambar 18. Hasil bode diagram kondisi normal saat tidak berbeban



Gambar 19. Hasil bode diagram kondisi normal saat berbeban

Workspace		Workspace	
Name ▲	Value	Name ▲	Value
frek	226.2130	frek	226.2130
zheta	3.9087e-05	zheta	0.3722

Gambar 20. Hasil Zheta kondisi saat tidak berbeban dan berbeban

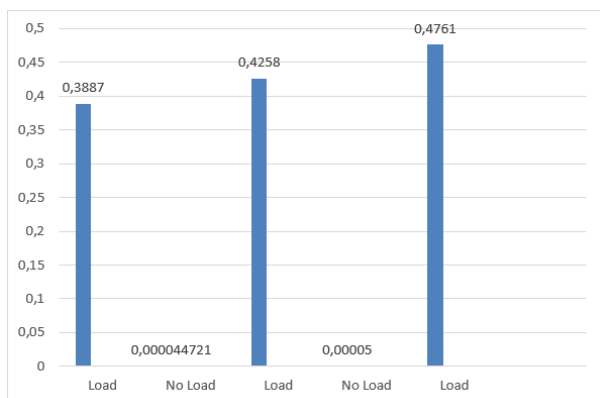


Gambar 21. Hasil output VAB dan ACPTU beserta nilai THD saat tidak berbeban dan berbeban

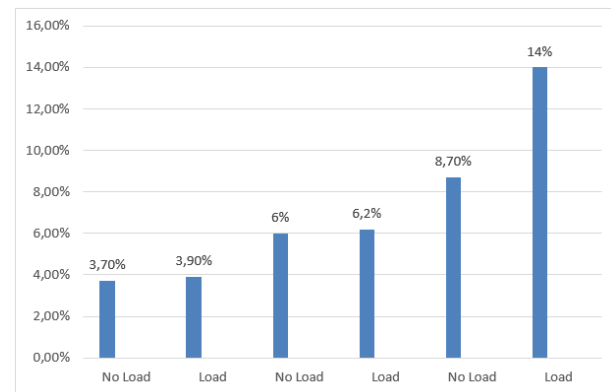
Selanjutnya adalah nilai THD dengan *No Load* biasanya lebih besar dibanding dengan yang *Load* apabila penurunan nilai induktansi terjadi secara signifikan (sedikit-sedikit) seperti pada Gambar 23. Tapi ada juga keadaan yang menyebabkan nilai THD pada *Load* lebih besar dibanding dengan yang *No Load* (hal ini biasanya terjadi jika nilai induktansi menurun drastis mendekati nilai 0).

Tabel 3. Kondisi saat induktansi dan kapasitor diturunkan

L (μH) dan C (μF)	Kondisi	F (Hz)	MATLAB Mag (dB)	ZHETA	PSIM THD ACPTU (%)
L=600 C=1080	NO LOAD	291	80,8	4,56e-05	19,00
	LOAD	317	27,9	0,4346	9,80
L=300 C=300	NO LOAD	531	80	5e-05	29,00
	LOAD	561	37,1	0,4761	30,00



Gambar 22. Perbandingan nilai ZHeta ketika L dan C turun



Gambar 23. Perbandingan nilai THD ketika L dan C turun

IV. SIMPULAN

Dari simulasi yang telah dilakukan, didapatkan nilai optimum dari ACL 300 μH dan ACC 300 μF dengan frekuensi *switching* 1.000 Hz diganti menjadi 3.000, karena dapat dilihat dari FFT gelombang harmonik pada kelipatan 3.000 tidak ada peningkatan yang signifikan. Selain itu, nilai ACPTU pada saat THD bernilai 50 Hz ketika tidak berbeban nilai THD nya 7,5 % dan kondisi ketika berbeban nilai THD nya adalah 1,4 %, keduanya di bawah 10 %.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT Industri Kereta Api (INKA) Madiun yang telah memberikan kesempatan, dukungan, dan fasilitas dalam penelitian ini terutama pada divisi Sistem Komponen Tier 1 dan 2.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Saidah, "Kualitas pelayanan *Commuter Line*" *J. Manaj. Transp. Logistik (JMTRANSLOG)*, vol. 4, no. 1, pp. 51–58, 2017.
- [2] P. Ray and K. R. Satyajit, "A novel approach towards static inverter circuit design," *PIICON 2020 - 9th IEEE Power India Int. Conf.*, pp. 5–8, 2020, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9112889.
- [3] A. Andang, T. A. Pamungkas, N. Busaeri, R. S. Hartati, I. B. G. Manuaba, and I. N. S. Kumara, "Three-phase Four-leg Inverter LC Filter Using FCS MPC," *ICSGTEIS 2021 - 2021 Int. Conf. Smart-Green Technol. Electr. Inf. Syst. Adv. Smart Green Technol. Towar. Soc. 5.0, Proc.*, no. October, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1109/ICSGTEIS53426.2021.9650376.
- [4] N. Fadhillah, "Implementasi sistem kendali dengan metode sinusoidal pulse width modulation (SPWM) pada inverter 3 level 3 phase untuk static inverter (SIV)," Proyek Akhir, Universitas Gadjah Mada, 2020.
- [5] S. Ridha, "Perancangan rangkaian three level inverter untuk sistem static inverter (SIV) pada kereta rel diesel elektrik (KRDE)," Proyek Akhir, Universitas Kristen Duta Wacana, 2020. [Online]. Available: <https://katalog.ukdw.ac.id/6167/>
- [6] F. Herrera, A. Mora, R. Cárdenas, M. Díaz, J. Rodríguez, and M. Rivera, "An optimal switching sequence model predictive control scheme for the 3L-NPC converter with output LC filter," *Processes*, vol. 12, no. 2, p. 348, 2024, doi: 10.3390/pr12020348.
- [7] Y. Yang, Y. Xiao, M. Fan, K. Wang, X. Zhang, and J. Hu, "A novel continuous control set model predictive control for LC-filtered three-phase four-wire three-level voltage-source inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 38, no. 4, pp. 4572–4584, Apr. 2023, doi: 10.1109/TPEL.2023.3233995.

-
- [8] Y. H. Yeoh, T. J. Liang, K. H. Chen, W. C. Chen, Y. F. Chen, and G. T. Peng, "Design and implementation of three-phase three-level T-type inverter with grid-following control," *2023 IEEE Int. Future Energy Electron. Conf. (IFEEEC)*, Sydney, Australia, 2023, pp. 473–477, doi: 10.1109/IFEEEC58486.2023.10458660.
- [9] Z. X. Xiao, G. X. Zheng, H. F. Xue, J. J. Xiong, W. L. Liu, and J. Gao, "Design and development of three-level inverter," *2023 Int. Conf. Power Syst. Technol. (PowerCon)*, Jinan, China, 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/PowerCon58120.2023.10330920..
- [10] J. Zhang, X. Du and S. Zheng, "Condition Monitoring of IGBT Module and Forced Air Cooling System Using Time Constants of Heat Sink Temperature Cooling Curve," *2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, New Orleans, LA, USA, 2020, pp. 2554–2558, doi: 10.1109/APEC39645.2020.9124134.
- [11] Y. Wen and L. Ruan, "Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Fully-immersed Evaporative Cooling IGBT," *2022 Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2022*, pp. 1–4, 2022, doi: 10.1109/ICEMS56177.2022.9982874.
- [12] S. D. Ratrey, A. Hota, V. Sonti, and S. Jain, "A New Three-Phase Three-Level Inverter Obtained From Two-Level Inverter By Considering the Effect of Device Junction Capacitance Across the Switch," *2023 IEEE 3rd Int. Conf. Sustain. Energy Futur. Electr. Transp. SeFet 2023*, pp. 1–5, 2023, doi: 10.1109/SeFeT57834.2023.10245984.
- [13] J. Li, H. Dong, P. Yang, Y. Shi, and J. Liu, "Research on the Service Life of High-Voltage Vacuum Circuit Breaker of High-speed Train," *Proc. 2021 IEEE 4th Int. Electr. Energy Conf. CIEEC 2021*, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510823.
- [14] A. P. Andrienko, A. A. Andrienko, L. Zhorniak, O. Maksymovych, and V. Sichenko, "An Electric Drive Traction Transmission of Diesel Train Based on The Induction Motor with A Phase Rotor," *Proc. 5th Int. Conf. Mod. Electr. Energy Syst. MEES 2023*, pp. 1–5, 2023, doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402534.
-