

e-ISSN :

p-ISSN :

# TEVA

Technology and Energy Innovation

A BOOK OF INERGCY SERIES



**EDISI II • JILID A**

Tahun 2023

**PUBLISHED BY :**  
DEPARTMENT OF MARINE ELECTRICAL ENGINEERING  
SHIPBUILDING INSTITUTE OF POLYTECHNIC SURABAYA

**BUNGA RAMPAI**  
**TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM**  
**KENDALI**

Edisi 2 — Jilid A (2023)

**Pengarah**

Anggara Trisna Nugraha

**Editor**

Tim Penyunting TEVA

**Penyusun**

Patric Yuda Suharsono • Rachmat Marjuki1\* • Puspita Arifa Setyawati • Riezandini Rakis Putri •  
Rizal Faturrohman • Rizki Abdi Pradana • Rizky Wahyunto • Vania Hasna Kirana Sutrisna

*Penerbit TEVA — Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*

# **BUNGA RAMPAI TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM KENDALI**

Edisi 2, Jilid A (Tahun 2023)

Hak cipta © 2023 pada penulis.

Diterbitkan oleh TEVA (Technology and Energy Innovation), Himpunan Mahasiswa Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

Alamat: Jalan Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111, Jawa Timur, Indonesia.

Karya tulis dalam buku ini merupakan hasil kegiatan ilmiah INERGYC (Lomba Karya Tulis Ilmiah) yang diselenggarakan oleh TEVA.

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.

Cetakan Pertama, 2023.

Ukuran: 21 × 29,7 cm (A4).

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas selesainya penyusunan buku bunga rampai ini. Buku ini menghimpun karya tulis ilmiah mahasiswa di bidang elektronika daya dan sistem kendali yang dikembangkan melalui kegiatan INERGYC.

Edisi 2 Jilid A tahun 2023 ini memuat 11 bab yang membahas beragam topik, mulai dari pengaturan tegangan AC, rangkaian penyearah (rectifier), hingga penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID pada motor listrik.

Kami menyampaikan terima kasih kepada Bapak Anggara Trisna Nugraha selaku pengarah, para penyunting, serta seluruh penulis yang telah berkontribusi. Semoga buku ini bermanfaat bagi pembaca, khususnya mahasiswa dan praktisi di bidang teknik kelistrikan.

Surabaya, 2023

Tim Penyusun

## **PRAKATA**

Perkembangan teknologi elektronika daya dan sistem kendali menuntut pemahaman yang kuat terhadap konsep dasar sekaligus kemampuannya pada permasalahan nyata. Bunga rampai ini disusun sebagai wadah bagi mahasiswa untuk menuangkan gagasan dan hasil kajian mereka.

Setiap bab ditulis oleh penulis yang berbeda dengan gaya dan pendekatan masing-masing, namun tetap berada dalam payung tema besar elektronika daya dan kendali sistem. Pembaca dapat menelusuri setiap bab secara mandiri sesuai kebutuhan.

Kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan demi penyempurnaan edisi-edisi berikutnya.

## DAFTAR ISI

|   |           |
|---|-----------|
| Kata Pengantar.....   | 4         |
| Prakata .....   | 5         |
| Daftar Isi .....  | 6         |
| Daftar Gambar .....   | 7         |
| Daftar Tabel.....   | 10        |
| Daftar Singkatan .....  | 11        |
| <b>BAB I Application of a Single-phase AC Voltage Regulator to Improve Transformer Efficiency in Rural Electrification Programs.....</b>  | <b>12</b> |
| <b>BAB II Pengendalian Penyearah Terkendali Satu Fasa pada Motor AC .....</b>   | <b>23</b> |
| <b>BAB III Simulasi Pengendalian LQR-PID untuk Cold Storage Ikan Tenggiri .....</b>   | <b>30</b> |
| <b>BAB IV Implementasi Pendekatan Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) dalam Sistem Rem Otomatis untuk Meningkatkan Keamanan Kerja di Lingkungan Industri .....</b> | <b>38</b> |
| <b>BAB V Identifikasi Sistem Motor DC dan Pengendalian Linear Quadratic Regulator Berbasis Arduino-simulink Matlab .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>BAB VI Identifikasi Sistem Motor DC dan Pengendalian Linear Quadratic Regulator Berbasis Arduino-simulink Matlab .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>BAB VII PID Tuning for DC Motor Speed Regulation: a Comprehensive Evaluation in Engineering Applications .....</b>   | <b>60</b> |
| <b>BAB VIII Penerapan Pengendalian LQR untuk Kontrol Sikap Longitudinal Pesawat Flying Wing.....</b>  | <b>70</b> |
| <b>BAB IX Sistem Kontrol LQR-PID sebagai Pengendalian Laju Mesin Penggilingan Kopi .....</b>  | <b>78</b> |
| <b>BAB X Pengendalian Penyearah Terkendali Satu Fasa pada Motor AC .....</b>  | <b>83</b> |
| <b>BAB XI Pemodelan dan Pengendalian Optimal Motor DC Menggunakan Metode LQR dan LQT.....</b>   | <b>90</b> |
| Glosarium.....  | 96        |
| Indeks .....  | 97        |
| Biografi Penulis .....  | 99        |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 1.1.....   | 19 |
| Gambar 1.2.....   | 19 |
| Gambar 1.3.....   | 19 |
| Gambar 2.1.....   | 24 |
| Gambar 2.2.....   | 24 |
| Gambar 2.3.....   | 25 |
| Gambar 2.4.....   | 25 |
| Gambar 2.5.....   | 25 |
| Gambar 2.6.....   | 26 |
| Gambar 2.7.....   | 26 |
| Gambar 2.8.....   | 26 |
| Gambar 3.1.....   | 33 |
| Gambar 3.2.....   | 35 |
| Gambar 3.3.....   | 35 |
| Gambar 3.4.....   | 35 |
| Gambar 3.5.....   | 36 |
| Gambar 3.6.....   | 36 |
| Gambar 3.7.....   | 36 |
| Gambar 3.8.....   | 36 |
| Gambar 3.9.....   | 36 |
| Gambar 4.1.....   | 40 |
| Gambar 4.2 Rangkaian Motor DC Orde 1 .....  | 41 |
| Gambar 4.3 Rangkaian LQR .....  | 41 |
| Gambar 4.4 Rangkaian Subsystem LQR Tanpa Noise.....   | 41 |
| Gambar 4.5 Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise .....   | 41 |
| Gambar 4.6 Rangkaian LQT .....  | 41 |
| Gambar 4.7 Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise .....  | 41 |
| Gambar 4.8 Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise .....   | 41 |
| Gambar 4.9 Hasil Motor DC FL57BL02 Orde 1 .....   | 41 |
| Gambar 4.10 Hasil LQR tanpa Noise .....   | 42 |
| Gambar 4.11 Hasil LQR dengan Noise .....  | 42 |
| Gambar 4.12 Hasil LQT tanpa Noise .....   | 42 |
| Gambar 4.13 Hasil LQT dengan Noise .....  | 43 |
| Gambar 5.1.....   | 47 |
| Gambar 5.2 Diagram blok dari persamaan model Motor DC. $\Omega(s)$ III. IDENTIFIKASI<br>SISTEM MOTOR DC ..... | 47 |
| Gambar 5.3.....   | 48 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 5.4.....                                   | 48 |
| Gambar 5.5.....                                   | 48 |
| Gambar 5.6.....                                   | 48 |
| Gambar 5.7 Blok Simulink untuk akuisisi data..... | 48 |
| Gambar 5.8.....                                   | 49 |
| Gambar 5.9.....                                   | 49 |
| Gambar 5.10.....                                  | 49 |
| Gambar 5.11.....                                  | 49 |
| Gambar 5.12.....                                  | 49 |
| Gambar 5.13.....                                  | 49 |
| Gambar 5.14.....                                  | 49 |
| Gambar 5.15.....                                  | 50 |
| Gambar 5.16.....                                  | 51 |
| Gambar 6.1.....                                   | 55 |
| Gambar 6.2.....                                   | 55 |
| Gambar 6.3.....                                   | 56 |
| Gambar 6.4.....                                   | 56 |
| Gambar 6.5.....                                   | 56 |
| Gambar 7.1 Motor Symbol.....                      | 62 |
| Gambar 7.2 Model Simulink.....                    | 65 |
| Gambar 7.3 Waveform model 1.....                  | 65 |
| Gambar 7.4 Waveform model 1 after tuning.....     | 65 |
| Gambar 7.5 Waveform model 2.....                  | 66 |
| Gambar 8.1.....                                   | 73 |
| Gambar 8.2.....                                   | 73 |
| Gambar 8.3.....                                   | 74 |
| Gambar 8.4 Desain Wahana.....                     | 75 |
| Gambar 8.5.....                                   | 75 |
| Gambar 8.6.....                                   | 76 |
| Gambar 8.7.....                                   | 76 |
| Gambar 8.8.....                                   | 76 |
| Gambar 9.1 Grafik Setekah dipasang PID.....       | 80 |
| Gambar 9.2.....                                   | 81 |
| Gambar 9.3.....                                   | 81 |
| Gambar 10.1.....                                  | 84 |
| Gambar 10.2.....                                  | 85 |
| Gambar 11.1.....                                  | 90 |
| Gambar 11.2.....                                  | 90 |
| Gambar 11.3.....                                  | 91 |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Gambar 11.4  | Simulink Motor DC Circuits Series with PID .....                         | 92 |
| Gambar 11.5  | PID Simulation Circuits .....  | 92 |
| Gambar 11.6  | Simulink Motor DC Series Circuits with LQR.....                          | 92 |
| Gambar 11.7  | LQR Simulation Cicuits.....  | 92 |
| Gambar 11.8  | PID Simulation at 1300 rpm Reference Speed .....                         | 92 |
| Gambar 11.9  | Rotor Speed Response at 1300 rpm Reference Speed with PID . Control..... | 92 |
| Gambar 11.10 | PID Simulation at 1600 rpm Reference Speed .....                         | 93 |
| Gambar 11.11 | Rotor Speed Response at 1600 rpm Reference Speed with PID Control.....   | 93 |
| Gambar 11.12 | LQR Simulation Circuits at 1300 rpm Reference Speed .....                | 93 |
| Gambar 11.13 | Rotor Speed Response at 1300 rpm Reference Speed with LQR Control .....  | 93 |
| Gambar 11.14 | LQR Simulation Circuits at 1600 rpm Reference Speed .....                | 93 |
| Gambar 11.15 | Rotor Speed Response at 1600 rpm Reference Speed with LQR Control .....  | 94 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 1.1 .....   | 12 |
| Tabel 1.2 .....   | 20 |
| Tabel 4.1 .....   | 40 |
| Tabel 11.1 Results of Comparison of Rotor Speed Response with PID and LQR ..... | 94 |

## DAFTAR SINGKATAN

|                |  |
|----------------|--|
| <b>AC</b>      | Alternating Current (arus bolak-balik)                       |
| <b>DC</b>      | Direct Current (arus searah)                                 |
| <b>LQR</b>     | Linear Quadratic Regulator                                   |
| <b>LQT</b>     | Linear Quadratic Tracking                                    |
| <b>PID</b>     | Proportional Integral Derivative                             |
| <b>PWM</b>     | Pulse Width Modulation                                       |
| <b>THD</b>     | Total Harmonic Distortion                                    |
| <b>SCR</b>     | Silicon Controlled Rectifier                                 |
| <b>RMS</b>     | Root Mean Square   |
| <b>RPM</b>     | Rotation Per Minute  |
| <b>SISO</b>    | Single Input Single Output                                   |
| <b>PSIM</b>    | Power Simulation (perangkat lunak simulasi elektronika daya) |
| <b>MATLAB</b>  | Matrix Laboratory  |
| <b>PPNS</b>    | Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya                        |
| <b>TEVA</b>    | Technology and Energy Innovation                             |
| <b>INERGYC</b> | Kompetisi Karya Tulis Ilmiah yang diselenggarakan TEVA       |
| <b>LKTI</b>    | Lomba Karya Tulis Ilmiah                                     |

## BAB I

### Application of a Single-phase AC Voltage Regulator to Improve Transformer Efficiency in Rural Electrification Programs

Anggara Trisna Nugraha <sup>1,\*</sup>, Rama Arya Sobhita <sup>2</sup>, Yulian Fatkur Rohman <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Marine Electrical Engineering, Shipbuilding Institute of Polytechnic Surabaya, Indonesia

<sup>2</sup> Marine Electrical Engineering, Shipbuilding Institute of Polytechnic Surabaya, Indonesia

<sup>3</sup> Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University, Taiwan

<sup>1</sup> [anggaranugraha@ppns.ac.id](mailto:anggaranugraha@ppns.ac.id); <sup>2</sup> [ramasobhita@student.ppns.ac.id](mailto:ramasobhita@student.ppns.ac.id); <sup>3</sup> [g112040516@mail.nchu.edu.tw](mailto:g112040516@mail.nchu.edu.tw)

\* corresponding author

**Tabel 1.1**

|   |  | ABSTRACT   |  |
|---|--|--|--|
| Keywords<br>AC voltage<br>Single phase<br>Voltage regulator |  | Voltage stability is a fundamental requirement for ensuring a reliable power supply, particularly in rural electrification initiatives that aim to enhance community well-being. Maintaining a consistent voltage level in electrical circuits is essential, as fluctuations during transmission can lead to severe operational issues. These variations, often caused by voltage drops in distribution networks, negatively impact the lifespan and efficiency of electrical appliances in both residential and industrial settings. Several factors contribute to voltage instability, including excessive transmission line loading, constraints in reactive power management, dynamic adjustments in load-tap-changing transformers, |  |

|  |  | <b>ABSTRACT</b>   |  |
|--|--|---|--|
|  |  | <p>and variations in load characteristics. This study focuses on the development of a single-phase AC voltage regulator to improve transformer efficiency, particularly in rural electrification applications. A voltage regulation circuit was designed using PSIM software, integrating essential components such as thyristors, transformers, Silicon-Controlled Rectifiers (SCRs), and other supporting elements. The findings of this research offer valuable insights for the development of resilient and sustainable electrification solutions tailored to the unique challenges faced.</p> |  |
|  |  |   |  |

## **A. Introduction**

Judging by the output frequency characteristics, alternating voltage regulation circuits can be broadly classified into two primary categories: AC regulators and cycloconverter circuits. This study focuses on AC regulator circuits, which are power electronic systems designed to convert an alternating current (AC) voltage source into another AC voltage source with a constant frequency but an adjustable output voltage [1]. These circuits are particularly advantageous for applications requiring precise voltage regulation, including voltage stabilizers, lamp dimmers, and heating controllers. In this research, the application of an AC regulator circuit is analyzed within the framework of rural electrification initiatives to ensure a stable voltage supply for critical community infrastructure [2].

Voltage fluctuations are a prevalent issue that can significantly affect the performance of electrical and electronic devices. Such instability can lead to reduced operational efficiency and a shorter lifespan for household and industrial equipment [3][4]. In rural areas, where voltage irregularities are more pronounced, these fluctuations may cause malfunctions in essential appliances, disrupting daily activities and productivity. This underscores the

necessity of employing voltage stabilizers or similar regulation systems to maintain AC voltage within acceptable limits, ensuring the longevity and efficiency of electrical devices [5].

This research explores the integration of thyristors into transformers within an AC voltage regulator circuit. The study evaluates whether incorporating thyristors can stabilize and maintain a consistent voltage output, particularly in environments prone to frequent power fluctuations. By enhancing voltage stability, this approach contributes to improving the reliability of power distribution networks in rural settings, ultimately supporting socio-economic development through more effective electrification solutions [6].

The significance of this study is twofold: it offers both technical advancements and societal benefits. From a technical perspective, the implementation of AC voltage regulators with thyristor-based control provides an effective solution for managing voltage instability. Socially, the research aligns with broader community development efforts by addressing a fundamental infrastructure challenge in rural electrification. A stable electricity supply is instrumental in supporting education, healthcare services, and economic activities, thereby generating widespread benefits for underserved populations.

The findings of this study highlight the transformative potential of adopting advanced voltage regulation technologies in rural electrification programs. The integration of these systems ensures not only electricity availability but also its reliability, fostering sustainable development and narrowing the infrastructure gap between urban and rural communities.

## **B. The Proposed Method**

### **C. SCR (Silicon Control Rectifier)**

A Silicon-Controlled Rectifier (SCR) is a semiconductor device classified under the thyristor family, functioning similarly to a diode but with an additional gate that enables phase-angle control. Structurally, an SCR comprises four alternating semiconductor layers (PNPN—Positive-Negative-Positive-Negative) and contains three PN junctions, labeled J1, J2, and J3, beginning from the anode. This layered configuration allows for precise regulation of electrical current flow [7]. The SCR is activated when a small voltage is applied between the gate and cathode, permitting gate current to flow and switching the device into its conductive state [8]. Once triggered, the SCR remains in conduction mode, allowing continuous current flow from the anode to the cathode until external conditions force it to turn off.

The SCR operates within a phase angle range of  $0^\circ$  to  $180^\circ$ , making it particularly suitable for phase control applications [9]. This capability is essential for regulating voltage output across various electrical systems. To interrupt the current flow through the SCR, a process known as commutation is required, which involves reducing the voltage across the device to zero, effectively ceasing conduction [10]. In this non-conductive state, the SCR remains inactive until another triggering signal is applied to the gate. This characteristic makes SCRs highly effective in controlling phase angles and managing power flow in alternating current (AC) circuits.

Within rural electrification initiatives, SCR technology plays a crucial role in ensuring stable and efficient power distribution. The incorporation of SCRs into single-phase AC voltage regulators enhances the stability of voltage supplied to transformers and other essential infrastructure. This improvement contributes to increased operational efficiency of electrical systems while extending the longevity of household and industrial equipment. Given that voltage fluctuations are a common challenge in rural areas, such advancements are critical for achieving reliable and sustainable electrification solutions.

Integrating SCR-based voltage regulators into rural power systems aligns with broader community development efforts by addressing key issues related to power quality and stability. A consistent and regulated voltage supply significantly impacts various aspects of rural development, including the operation of educational institutions, healthcare facilities, and small-scale industries. This study underscores the transformative potential of SCR technology in overcoming electrification challenges in underserved regions, ultimately fostering socio-economic progress through improved energy infrastructure.

#### **D. Thyristor**

A thyristor, also known as a controlled rectifier, is a power electronic device distinguished by its four-layer PNPN semiconductor configuration and three PN junctions. It consists of three main terminals: the anode, cathode, and gate. These terminals enable precise regulation of electrical current flow, with the gate serving as a crucial control mechanism for activating the device [11]. To switch the thyristor into conduction mode, a small positive voltage is applied between the gate and cathode terminals, allowing current to flow. This gate-controlled activation facilitates efficient power regulation, making thyristors essential in applications requiring stable and adaptable power management [12].

The activation of a thyristor is highly dependent on the timing of the gate current, often synchronized with the zero-crossing point of the alternating current (AC) waveform. This

phase-sensitive control is critical for accurately managing voltage and current levels in electrical systems [13]. To deactivate the thyristor, the forward current must be reduced below the holding current threshold ( $I_H$ ), a process known as commutation. This mechanism ensures that the thyristor ceases conduction and reverts to its off-state until a new triggering signal is applied. Such control capabilities are vital in AC systems, where maintaining power stability and efficiency is essential.

In the context of rural electrification, thyristors play a significant role beyond their technical applications, contributing to broader community development efforts. The integration of thyristor-based voltage regulators into single-phase AC networks can greatly enhance transformer efficiency and voltage stability [11]. These improvements help mitigate common challenges such as fluctuating power supplies, which can lead to damage in household appliances and industrial equipment. For rural communities, the adoption of such technologies presents a sustainable approach to improving the reliability and longevity of electrical infrastructure, ultimately supporting socio-economic progress.

The implementation of thyristor-controlled voltage regulation aligns with broader initiatives aimed at expanding access to reliable and high-quality electricity [14]. This study highlights the necessity of incorporating advanced power electronics into electrification strategies to overcome infrastructure constraints. Additionally, the widespread adoption of these systems contributes to the long-term resilience of rural energy networks, ensuring that electrification projects yield lasting benefits for education, healthcare, and economic development in underserved regions.

## **E. Transformer**

A transformer is a fundamental electrical device designed to transfer electrical energy between different voltage levels [15]. Its primary function is to either increase (step-up) or decrease (step-down) voltage to accommodate specific power distribution requirements. The efficiency and reliability of a transformer are largely influenced by its structural design and operational stability. In rural electrification initiatives, transformers serve a vital role in distributing electricity across extensive areas, where maintaining consistent and stable voltage is essential for supporting residential and community activities.

The voltage output of a transformer is directly affected by fluctuations in electricity demand within the network it serves [16]. In rural regions, where infrastructure limitations and unpredictable consumption patterns are common, such fluctuations often lead to voltage instability. This instability not only diminishes transformer efficiency but also increases the

likelihood of damage to electrical appliances and equipment, ultimately impacting the overall quality of life within the community. The implementation of single-phase AC voltage regulators presents a viable solution to this challenge by ensuring stable voltage levels, thereby optimizing transformer performance.

From a community development perspective, incorporating voltage regulation technologies into rural power distribution networks is crucial. These initiatives aim to empower underserved populations by enhancing their access to reliable electricity, which, in turn, fosters improvements in productivity, education, healthcare, and other essential sectors. The deployment of advanced electronic components, such as thyristor-based voltage regulators, offers a practical and effective approach to improving transformer efficiency and durability in rural settings. This aligns with the broader objectives of promoting sustainable rural development and ensuring long-term energy resilience.

Moreover, research on enhancing transformer efficiency through voltage regulation contributes valuable insights to the field of rural electrification. Addressing key concerns regarding technical accuracy and practical application, this study aligns with the broader academic discourse on originality and societal impact [17]. By integrating innovative power regulation technologies into electrification strategies, this work highlights the potential for transformative change, not only advancing academic knowledge but also delivering tangible benefits to rural communities. This dual focus on scientific rigor and real-world impact underscores the importance of bridging technological advancements with community-centered development efforts.

## **F. 1 Phase AC**

Rectification is a fundamental process in power electronics, facilitating the conversion of alternating current (AC) into direct current (DC). This conversion plays a vital role in numerous applications, particularly in areas where a reliable and stable electricity supply is essential for daily operations, such as in rural electrification initiatives [18]. The rectification process helps regulate power distribution, ensuring consistent energy delivery to residential and industrial consumers, thereby enhancing quality of life and supporting economic development in underserved regions.

Rectifiers are generally categorized into three main types: uncontrolled, half-controlled, and fully controlled. In the context of rural electrification and voltage regulation, fully controlled rectifiers—such as those utilizing thyristors or Silicon-Controlled Rectifiers (SCRs)—offer distinct advantages. These devices enable precise control over output voltage,

allowing adjustments tailored to the specific power requirements of local communities [19]. The efficiency of the controlled rectification process depends on the input voltage and the precise moment in the AC waveform at which the thyristor is triggered, commonly known as the "trigger angle." This level of control enhances flexibility and efficiency in managing voltage levels within rural power distribution systems.

From a community development perspective, the integration of controlled rectifiers into rural power grids represents a strategic intervention designed to address the unique energy challenges faced by these regions. Such technological advancements align with broader objectives of improving community welfare, promoting sustainable infrastructure, and ensuring equitable access to electricity. By enhancing transformer efficiency through controlled rectification, this approach not only contributes to advancements in electrical engineering and academic research but also delivers tangible benefits to rural populations. Ultimately, optimizing power regulation through rectification fosters long-term socio-economic growth and supports the resilience of rural electrification programs [20].

## **G. Method**

The methodology adopted in this research begins with the design and simulation of a full-wave, controlled single-phase AC voltage regulator circuit utilizing a Silicon-Controlled Rectifier (SCR) [11][12]. The circuit is tested under varying load conditions to evaluate its performance and efficiency. Following the simulation phase, the design is physically implemented for experimental validation, during which data is systematically collected for further analysis. This methodological approach ensures that the study can assess the practical feasibility of the proposed circuit for rural electrification projects, with the objective of enhancing transformer efficiency.

In the context of rural electrification initiatives aimed at delivering stable and reliable power to underserved communities, the use of simulation tools such as PSIM software plays a critical role. These tools enable accurate modeling and testing of the circuit within a controlled environment, thereby minimizing potential design errors and inefficiencies [11]. By simulating circuit behavior prior to physical implementation, the study seeks to mitigate risks and reduce losses associated with direct experimentation, ensuring a cost-effective and reliable deployment in real-world applications.

The experimental phase involves constructing a physical prototype of the designed circuit, followed by comprehensive testing to verify its functionality and effectiveness under real operating conditions. Data collected from these experiments will be analyzed to assess

the system's capability in enhancing transformer efficiency. This phase is particularly significant in understanding how the circuit responds to varying load conditions and how it can contribute to optimizing power regulation in rural electrification efforts, ultimately improving the quality of life in these communities.

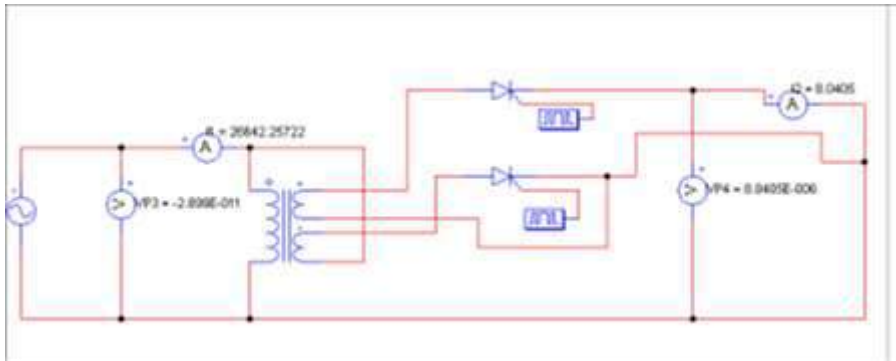
A rigorous data analysis process will be conducted to evaluate the success of the research. Experimental data will be examined to identify patterns, efficiency levels, and potential areas for further improvement in the circuit design [12]. The insights derived from this analysis will form the basis for conclusions regarding the effectiveness of the AC voltage regulator in stabilizing voltage and improving transformer efficiency. This methodological framework aligns with broader objectives of advancing rural community development and promoting energy sustainability, ensuring that the benefits of electrification reach households and local industries alike.

## **H. Results and Discussion**

### **I. Simulation**

In designing this AC voltage regulator circuit, the researcher utilizes two Silicon-Controlled Rectifiers (SCRs) arranged in parallel, in conjunction with a transformer. This configuration aims to enhance voltage regulation and improve transformer efficiency. After constructing the circuit as shown in Figure 1, the system is powered on to verify its functionality and ensure it performs as anticipated. This step is crucial for evaluating the design's effectiveness, particularly when applied to rural electrification projects, where providing stable and reliable electricity is vital for improving the living conditions of local communities.

The experimental phase involves assessing the circuit's performance under real-world conditions, with a focus on its capacity to regulate AC voltage while optimizing transformer efficiency. The objective is to determine whether the circuit can maintain consistent voltage levels despite fluctuating loads, a common challenge in rural areas. By testing the circuit's performance, the research seeks to generate valuable insights that can contribute to the development of more efficient and sustainable energy solutions for rural communities, thus supporting broader initiatives aimed at community empowerment and development.

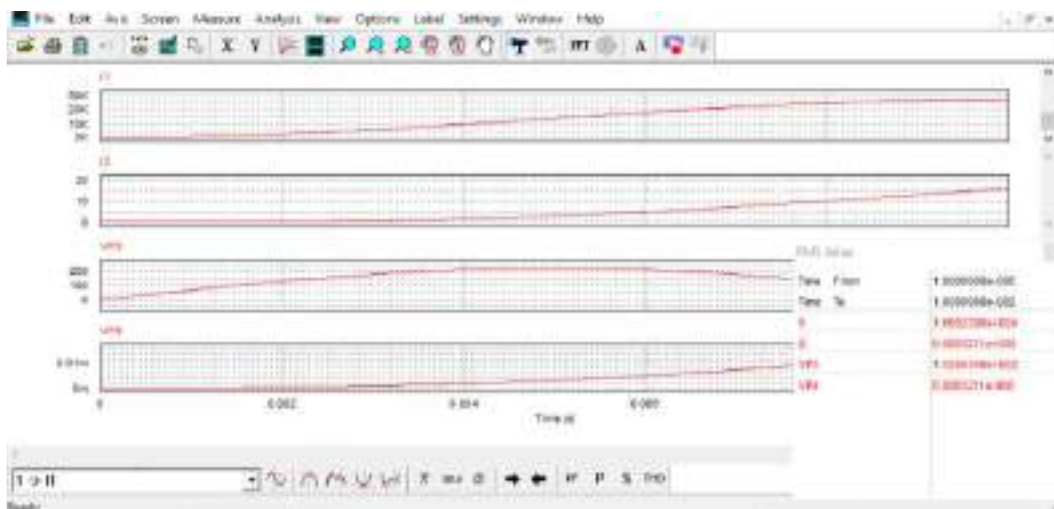


Gambar 1.1

### Simulation circuit

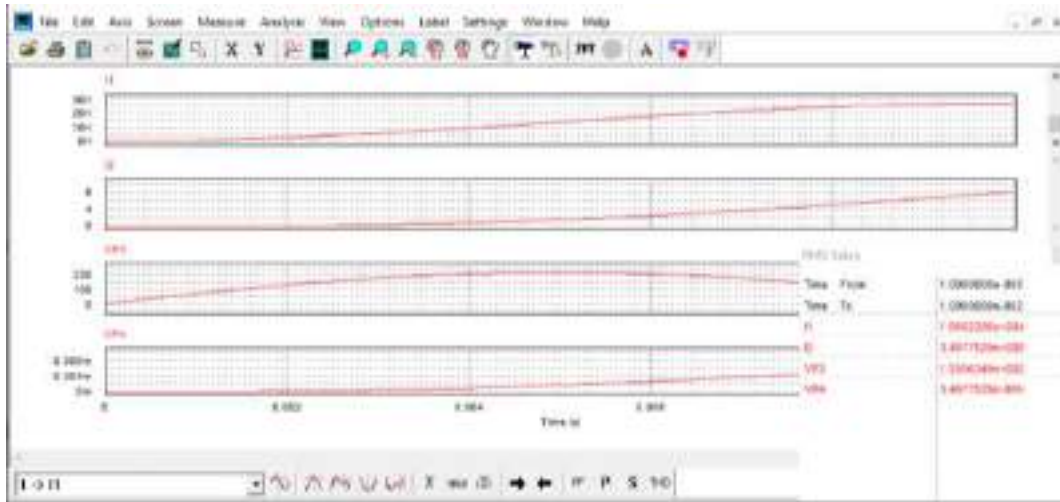
The outcomes of the circuit tests are presented in Figures 2 and 3, which illustrate the waveform produced by the system. In this experiment, two distinct input voltage levels, 30 Volts and 60 Volts, were tested to assess the performance of the regulator under different conditions. Each test was conducted with a thyristor frequency set to 5000 Hz, ensuring stable operation and providing a clear comparison between the two voltage settings.

The experimental configuration was designed to evaluate the circuit's ability to maintain a stable output voltage under varying load conditions, a critical factor for rural electrification projects where voltage fluctuations are frequent. By analyzing the waveforms produced at these voltage levels, the study aims to demonstrate the efficacy of the single-phase AC voltage regulator in improving transformer efficiency. This could contribute to the development of more reliable and sustainable electrical systems for rural communities, enhancing the longevity of electrical equipment and improving the quality of life for residents.



Gambar 1.2

waveform results from the experimental circuit with a voltage of 30 volts



Gambar 1.3

waveform results from the experimental circuit with a voltage of 60 volts

The experimental outcomes, which facilitated the calculation of the RMS (Root Mean Square) value, are summarized in Table 1. This table presents the current and voltage measurements recorded during two distinct experiments, offering a comprehensive comparison of the performance of the single-phase AC voltage regulator under varying conditions.

These results are essential for assessing the effectiveness of the regulator in stabilizing voltage and enhancing transformer efficiency, particularly in the context of rural electrification initiatives. By analyzing the variations in current and voltage, the research aims to illustrate how this approach can be applied to resolve the voltage instability challenges commonly encountered by rural communities. The insights gained from this experiment are anticipated to contribute to the development of more reliable and sustainable power systems, ultimately benefiting both residential and industrial users in underserved regions.

#### Result simulation

Tabel 1.2

| Voltage (V) | Frequency | I1 rms (A)     | I2 rms (A)     | V1 rms (V)     | V2 rms (V)      |
|-------------|-----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 30          | 5000      | 1,6602306e+004 | 6,8863211e+000 | 1,5556349e+002 | 6,8883211e-006  |
| 60          | 5000      | 1,6602306e+004 | 3,4677529e+000 | 1,5556349e+002 | 3,46775229e-006 |

In the two experiments conducted with different voltage values of 30V and 60V, the results demonstrated that the current remained consistent across both trials. Despite the

application of two distinct voltage levels, there was no significant variation in the current. This outcome underscores the regulator's capacity to maintain a stable current, even when the input voltage fluctuates.

Additionally, the waveform generated during the experiments exhibited a consistent indentation, indicating that the voltage regulator was effectively stabilizing the output. This pattern suggests that the single-phase AC voltage regulator can sustain a constant output, even when the input voltage changes. Such stability is particularly vital for rural electrification programs, where voltage fluctuations are frequent, and a reliable power supply is essential for both residential and industrial applications. These findings highlight the potential of this technology to improve transformer efficiency and enhance the overall reliability of power distribution in rural communities.

## **J. Conclusion**

The experimental results validated the successful design and implementation of the single-phase AC voltage regulator circuit. The system demonstrated its intended functionality by effectively stabilizing the output voltage and maintaining the current within the desired range throughout the testing phase. This achievement is particularly significant for rural electrification projects, where reliable and stable voltage regulation is essential for the proper operation of household appliances and small-scale industries.

Moreover, Researcher acknowledges several limitations that may have affected the accuracy and reliability of the study. These limitations include constraints related to available resources, time for experimentation, and the scope of the experimental setup. Such factors could have influenced the precision of the results and the extent to which the voltage regulator circuit was evaluated under varying operational conditions.

## **Daftar Pustaka**

- [1] Nugraha, AT, Farikh, MDI, Agna, DIY and ad, RF As'. "Penyearah Terkontrol Satu Fasa Gelombang Penuh terhadap Motor DC 3 HP." *Elektriase: Jurnal Sains Dan Teknologi Elektro* 13.1, 2023, pp. 42-49.
- [2] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Agna, DIY, Ashlah, MB, Fathurrohman, MF and .... "Analisis Optimalisasi Penggunaan Konverter CUK Pada PLTA Menggunakan Simulasi Proteus." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 62-67.
- [3] Primaningtyas, WE, Utomo, AP, Wulandari, KD, Alfanda, BD, Cahyono, L and .... "DISEMINASI PEMBUATAN PAPLAS (PAVING PLASTIK) SEBAGAI SARANA DEMARKASI AREA POTENSI BAHAYA DI LINGKUNGAN SEKOLAH." *Jurnal Cakrawala Maritim* 4.2, 2021

- [4] Cahyono, L, Apriani, M, Nugraha, AT and Utomo, AP. "TIME RISK ANALYSIS OF IMPLEMENTATION SELF-MANAGED COMMUNITY PROJECT IN KALIANYAR-BANGIL VILLAGE." *Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil* 11.2, 2022, pp. 142-151.
- [5] Nugraha, AT, Budi, PS, Yuniza, SI and Ivannuri, F. "Penyearah Tak Terkontrol Satu Fasa Setengah Gelombang Terhadap Generator AC Tiga Fasa." *Elektrise: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 36-44.
- [6] Haj, MI, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Performance Analysis of DC Motor in SISO Circuit Using LQR Control Method: A Comparative Evaluation of Stability and Optimization." *ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems* 1.1, 2025, pp. 23-30.
- [7] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Distributed Panel-based Fire Alarm Design." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...)*, 2022
- [8] Pradana, SY, Hazim, A and Nugraha, AT. "Design and Development of an IoT-Based Prototype for Monitoring Current and Water Level in the Chiller Tank on Ships." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 3.1, 2025
- [9] NUGRAHA, AT, ALFARISI, N, AZIS, A, HARDIANSYAH, MM, HARIS, GR and .... "Trainer Kit Elektronika Daya." ID Patent EC00,202,316,986, 2023
- [10] Asri, P, Widodo, HA, Nugraha, AT, Rachman, I, Rahmat, MB, Poetro, JE and .... "Desain Hybrid Panel Surya dan Generator Set pada Kapal Ikan Pesisir Selatan Jawa." *Jurnal Inovtek Polbeng* 12.1, 2022, pp. 46-53.
- [11] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Controlled Single-Phase Full-Wave Rectifier Experiment for DC Shunt Motor Control." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 1.1, 2023, pp. 1-10.
- [12] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Setiawan, J, Rochmawati, NW, Sena, AI and .... "PERANCANGAN BUCK-BOOST CONVERTER UNTUK CHARGING BATERAI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 22-33.
- [13] Nugraha, AT. "Tracking Quadcopter Menggunakan Metode Command-Generator Tracker Dengan Efek Integrator." *Jurnal Teknologi Elektro* 8.2, 2017, p. 143151.
- [14] Nugraha, AT, Firdaus, AA, Sobhita, RA and Wicaksono, Z. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.2, 2025, pp. 14-25.
- [15] Nugraha, AT, Azam, AI, Sobhita, RA and Sunarno, E. "IOT-Based Smart Home Control Design Using Blink Application and Esp8266 Wi-Fi Module." *Mein: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.1, 2024, pp. 7-11.
- [16] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Hazim, A, Rochmawati, NW, Sena, AI and .... "ANALISIS PENGENDALI KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC MENGGUNAKAN BUCK CONVERTER." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 15-22.
- [17] Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Konsep Dasar Elektronika Daya." Deepublish, 2022
- [18] Nugraha, AT and Ravi, AM. "Experimental Study of the Effect of Excitation Current on the Output Voltage of a Self-excited Synchronous Generator.", 2023
- [19] Fatqurrochman, MI, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Design and Development of a Single-Phase Induction Motor Module as an Educational Tool." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1, 2025
- [20] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "ALAT PENJEMUR KOPI DENGAN KENDALI LQR-PID." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 72-77.

## BAB II

### Pengendalian Penyearah Terkendali Satu Fasa pada Motor AC

#### Abstrak

*DC motor speed regulation is the easiest among other motor speed settings. At this time there are still many who use conventional control by rotating the autotransformer. As we know that setting with an autotransformer there are various kinds of weaknesses. Among other things, from an economical point of view, an autotransformer that is damaged will have difficulty getting a component or replacement with a new one because the price is quite expensive.*

**Kata Kunci:** Rectifier, Full-Wave, Single Phase

I. INTRODUCTION of the output of a full-wave single-phase controlled In everyday life, almost all household appliances or rectifier on the speed of a DC motor. electronic equipment use DC electric current. Meanwhile, the supply voltage from the provider is in II. LITERATUR REVIEW the form of AC electricity with a power source of 220 a. Rechifer Circuit volts/50 Hz. Therefore, we need a circuit that can A rectifier circuit or rectifier is a circuit that can convert convert AC electricity into DC electricity. The circuit alternating current (AC) voltage into direct current (DC) is a rectifier circuit voltage. Basically, the main component used is a diode. A rectifier circuit is a circuit that converts This is because the diode only conducts electric current AC voltage to DC. Controlled rectifier is a circuit that in one direction and inhibits electric current from the uses a thyristor as a rectifier component that can opposite direction. So that when the diode is powered by control the DC output voltage. Controlled rectifiers AC current, only half the wave can pass through the diode, while the other half will be blocked. According to can be divided into fully controlled and semi- Moorthy (2005), Lander (1993), or Singh and controlled rectifiers. This rectifier can be used for DC Kanchanadhani (2007), the rectifier circuit can be motor speed regulation. classified into three, namely uncontrolled rectifier, half- DC motor speed regulation can be done in controlled rectifier and fully-controlled rectifier. several ways, including by adjusting the terminal b. Full wave rectifier voltage ( $V_t$ ). Setting the terminal voltage on the In producing a full wave rectifier there are armature winding can be directly used to adjust the two ways to get it. The two ways are by using 2 speed at the time of starting (starting) and at the same diodes or 4 diodes. In a full wave rectifier circuit time while running (running). Setting the  $V_t$  becomes using 2 diodes it must use a CT transformer. While easier and more efficient when using power electronic the full wave rectifier using 4 diodes does not have to equipment. use a CT transformer. This paper will discuss the simulation of The 4-diode full-wave rectifier is often called DC motor speed control using a full wave single

the Full Wave Bridge Rectifier and is also the type of phase rectifier circuit. To adjust the speed of the DC rectifier that is most often used in Power Supply motor is done by adjusting the terminal voltage on the circuits because it provides better performance DC motor. This means that the DC motor terminal compared to other types of rectifiers. voltage is the output of a full-wave single-phase controlled rectifier circuit. This simulation will be carried out on PSIM software to determine the effect

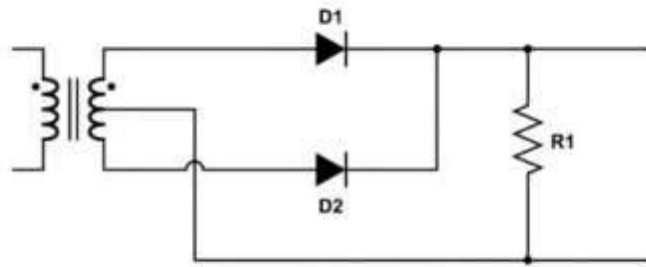
usually uses four SCR components as switches. The output voltage of this circuit can be regulated through the ignition angle of the SCR. This rectifier circuit requires 2 pairs of trigger pulses, namely a pair in the positive half-wave region and another pair in the negative half-wave region [15019-full]. In a full-wave single-phase controlled rectifier circuit, there are three Rectifier Full-Wave 2 diode (left) 4 diode types of circuits, namely a full-wave single-phase (right) controlled rectifier with CT, a full-wave single-phase controlled rectifier with bridge connections, and a semi-controlled full-wave single-phase rectifier.

c. Half wafe retchifer All single-phase rectifiers use a solid state device as their primary AC-to-DC conversion device. The single-phase uncontrolled half-wave rectifier is the simplest and probably the most widely used. For uncontrolled rectifier circuits, semiconductor diodes are the most commonly used devices and are arranged in such a way as to make a half- wave or full-wave rectifier circuit. The advantage of using diodes as rectifier devices is that by Full-wave rectifier controlled single phase The DC output voltage can be obtained in the design they are unidirectional devices having an following equation: inbuilt one-way pn-junction.  $V_m V_o(dc) = [1 + \cos \alpha] \dots \dots \dots (2.1) \pi$

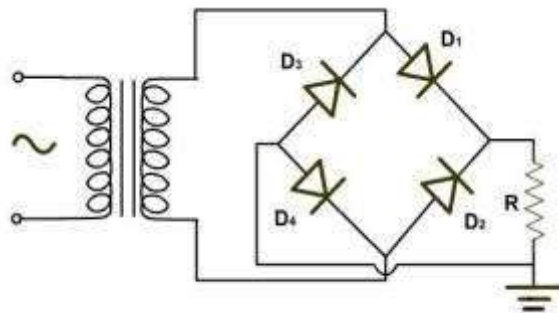
As for the rms output voltage is :  $V_m \alpha \sin(2\alpha) V_o(rms) = \sqrt{1 - + \dots \dots \dots (2.2) \sqrt{2} \pi$   
 $2\pi$

III. Thyristor A thyristor is a component whose working principle is similar to a diode, but is equipped with a d. Controlled Rectifier gate that can be adjusted by the conduction phase. Controlled rectifier is a power electronics circuit that can convert alternating current (AC) voltage into direct current (DC) voltage with an adjustable value. The semiconductor component used is usually an SCR which operates as a switch, converter, and regulator. To get the desired output voltage value, you can make adjustments through the gate of the semiconductor component of the SCR. According to the input voltage source, the controlled rectifier circuit is divided into two, namely a single- phase controlled rectifier circuit and a three-phase controlled rectifier circuit. a. Working Principle of Thyristor e. Full Wave Single Phase Controlled The thyristor operates when the collector of Rectifier Circuit transistor Q1

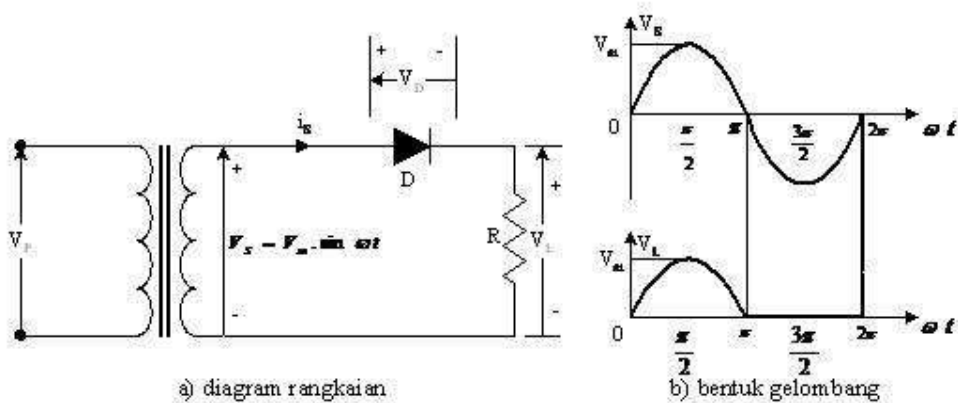
is connected to ground of transistor Q2, and vice versa, the collector of transistor Q2 is Single-phase controlled rectifier is a circuit connected to ground of transistor Q1. The transistor that converts AC power to DC electricity which circuit shows a current amplification loop in the VOL. 3, NO. 4, November 2021 9



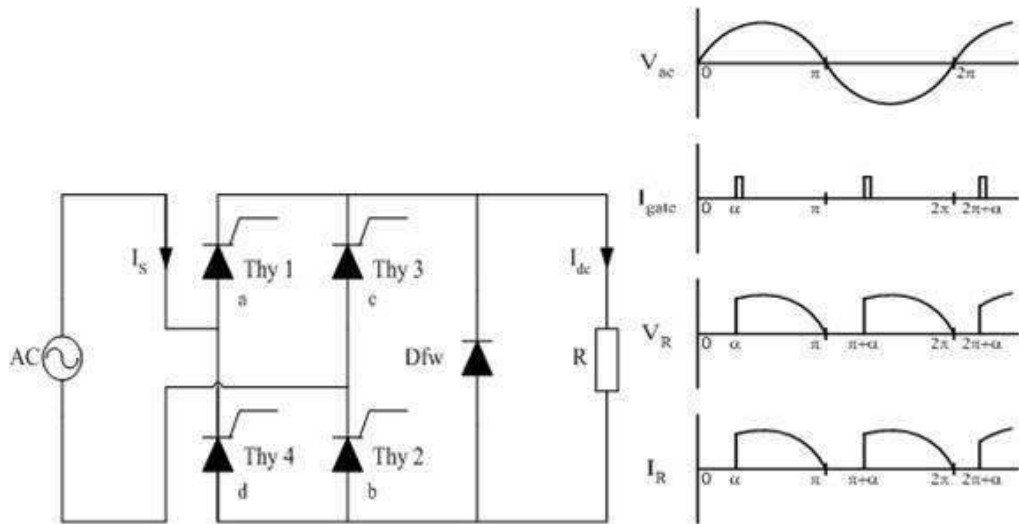
Gambar 2.1



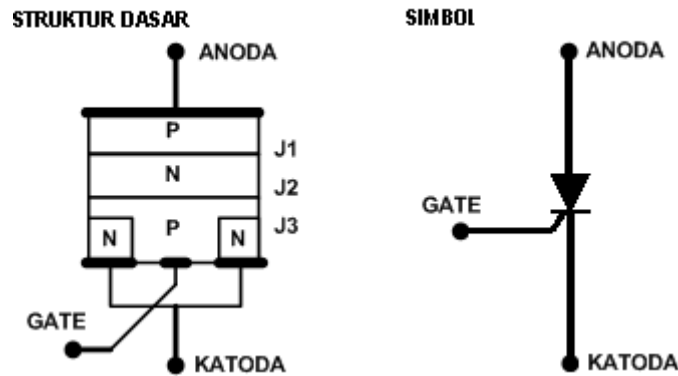
Gambar 2.2



Gambar 2.3



Gambar 2.4



Gambar 2.5

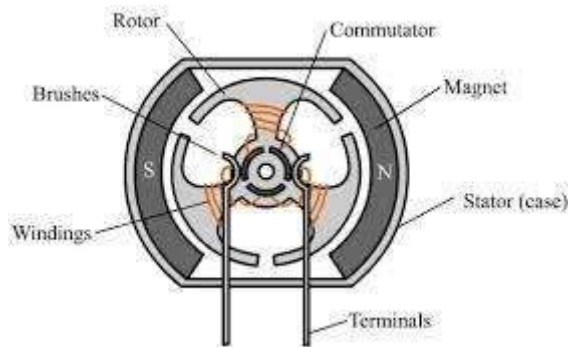
middle. Knowing this, the collector current is the gain  $\beta I_b$ . Methode of the fin current. For example, when current flows The type of research used in this research is from  $I_b$  to transistor Q2, current  $I_c$  flows to the quantitative research using experimental methods. The collector of Q2. Since this collector current is the experimental procedure is carried out by designing a collector current  $I_b$  of transistor Q1, the collector schematic and running a simulation on the PSIM current of transistor Q1 is amplified. The collector software current of transistor Q1 is the charge current of Software transistor Q2. The PN junction of this thyristor in the In this full-wave single-phase controlled middle shrinks and disappears, leaving the P and N rectifier circuit simulation, PSIM software will be layers on the outside. When this condition is reached, used. That is by assembling a circuit in the PSIM the structure becomes the known PN (anode-cathode) software which will then be simulated diode structure. Therefore, it can be said that the thyristor is in the ON state and current flows from the a. Analyze anode to the cathode like a diode. System requirements analysis is the

stage of b. Motor DC preparing the needs for tools and materials in the A DC motor or DC motor is a device that converts simulation that will be used later. The tools and electrical energy into kinetic energy or motion. This materials used in the simulation of a full-wave DC motor is also known as a DC motor. As the name single-phase controlled rectifier circuit on PSIM implies, a DC motor has two terminals that require are: direct current (DC) to power it. DC or DC Electric 1. Variac (Variable Alternating Current) Motors Known as rpm or RPM (revolutions per 2. Trafo 1 fasa minute), these motors rotate clockwise or counterclockwise by reversing the electrical polarity 3. Thyristor exerted on the DC motor. DC electric motors are 4. Resistor available in various sizes and speed shapes. Most DC electric motors provide speeds of around 3000 rpm to 5. Ampermeter 8000 rpm with an operating voltage of 1.5 V to 24 V. 6. Voltmeter 7. Osiloskop 8. DC Motor

b. Block diagram system

Variac (Variable Transformator 1 Alternating Current ) phasa

Construction DC Motor To calculate the speed of the motor can be done in the The rectification process is following equation: Output DC carried out by the Thyristor  $V_t - I_a \cdot R_a$   $n(rpm) = k\phi$  .....(2.3) description :  $V_t$  = terminal voltage(V)  $I_a$  = armature current(A) The results of DC Pengujian  $R_a$  = rangkar resistance (ohm)  $K$  = konstanta electricity become a source kecepatan motor of energy in a DC motor  $\phi$  = fluks magnet



Gambar 2.6

V. Result Tabel 2

a. Circuit Ignition Angle Torsi Anchor Voltage ( $V_a$ ) Anchor Current (RPM) ( $^\circ$ ) (Nm) (Volt) ( $I_a$ ) (Ampere)

|    |   |     |     |         |
|----|---|-----|-----|---------|
| 0  | 0 | 177 | 1   | 1517.92 |
| 15 | 0 | 165 | 1   | 1493.72 |
| 30 | 0 | 131 | 0.8 | 1353.75 |

45 0 84 0.6 1047.42

60 0 38 0.5 588.54

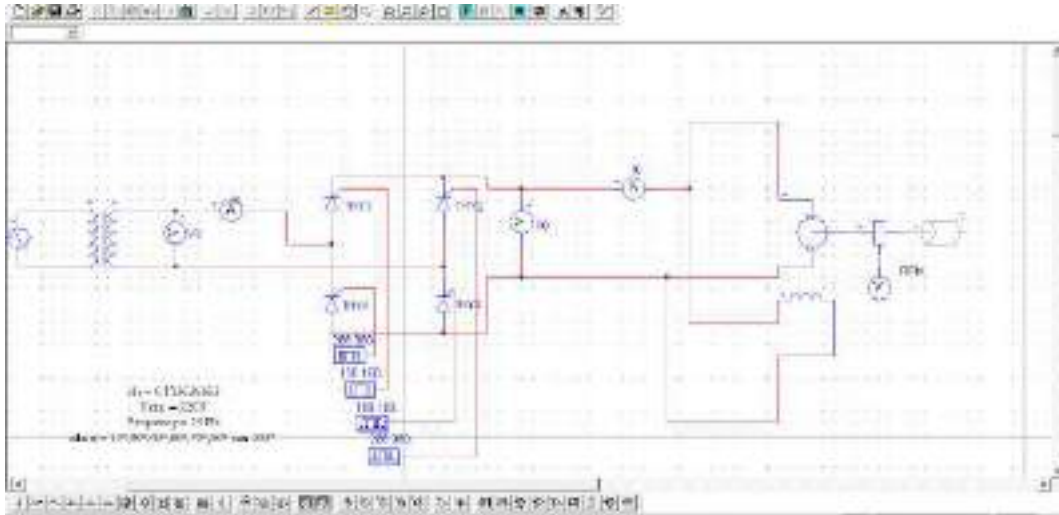
75 0 3.5 0.5 51.09

90 0 177 1 1517.92

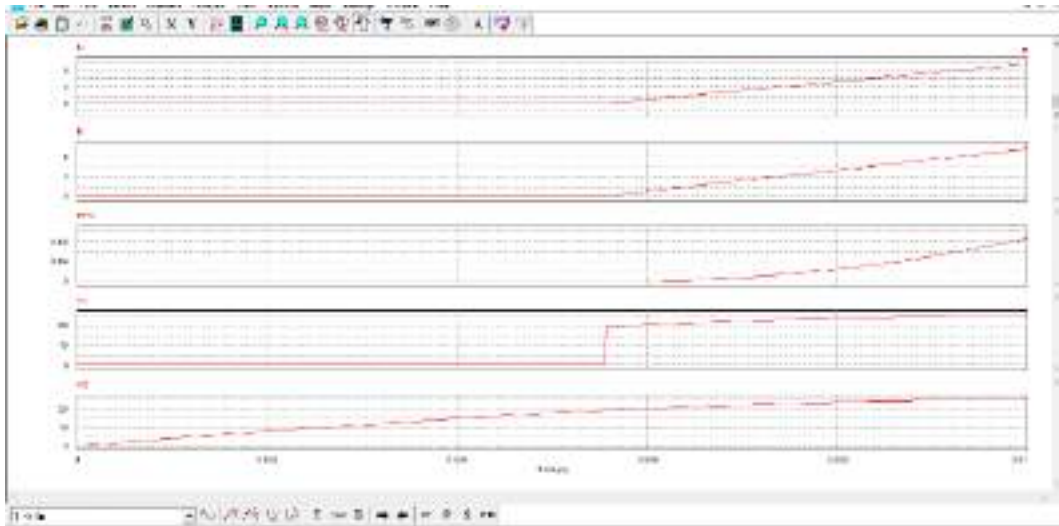
Based on the PSIM software simulation b. Simulation results, it can be concluded from the control circuit data tested that the full-wave commutator of a single- phase DC motor can affect the motor speed. The speed of the self-boosted series DC motor is controlled using a thyristor, namely by changing the firing angle ( $\alpha$ ) of the thyristor. In this study, the launch angle ( $\alpha$ ) is used as: 00, 300, 600, 600, 900, 1200, 1500, 1800. The following is a graph of the characteristics of the firing angle ( $\alpha$ ) of the thyristor and the rotational speed (N) of the DC motor.

VI. Conclusion Based on the analysis of the experimental c. Tabel data, several conclusions can be drawn as follows: Tabel 1 Ignition Angle Torsi Anchor Voltage (Va) Anchor Current a. The controlled rectifier that has been made (RPM) ( $^{\circ}$ ) (Nm) (Volt) (Ia) (Ampere) has been successfully realized to control the 0 0 184 0.6 2927.94 output voltage, output current and input 15 0 176 0,6 2903,72 current of a single-phase full-bridge rectifier, 30 0 172 0,6 2895.25 so that we can determine what output voltage 45 0 155 0,5 2738,94 and current values we want. 60 0 137 0.5 2701.85

75 0 114 0,5 2583,61 b. PSIM simulation software can help the system 90 0 90,5 0,5 2271.98 planning process that can prevent losses in the event of a failure during the design of a system. The development of this research compared to previous research is in this study using a fully controlled rectifier system where to control a DC motor speed that is by adjusting the ignition angle on the thyristor. DC motor speed regulation in series with fully controlled rectifier is used for systems that require a motor speed with a speed value



Gambar 2.7



Gambar 2.8

lower than the specifications for a series Tampilan LCD," Jurnal Logitech, vol. I, no. amplifier DC motor. In the experiment the 2, pp. 33-34, 2019. author uses a motor specification with a speed 7. D. Amarullah, M. Djaohar and M. Subekti, of 1500 RPM, when given a load of torque = "Pengaturan Kecepatan Motor DC Seri 1 Nm with an ignition angle of 00, the speed Berbasis Arduino UNO," Electrical value is 1517.92 RPM. The magnitude of the Vocational Education and Technology, vol. IV, no. 2, pp. 8-10, 2020. speed of a series amplifier DC motor can be 8. A. Yusuf, I. P. Faza and T. Tohir, "Simulasi reduced by increasing the angle of ignition Pengendali Kecepatan Motor DC Seri c. At an angle of ignition using an SCR greater Dengan Menggunakan Penyearah Terkendali than 90o the output voltage of the power Penuh Berbasis PSIM," SENTER VI 2021, circuit will be negative and this system is vol. VI, pp. 87-97, 2021. called an inverter which is used for 9. Q. Hidayati and M. E. Prasetyo, regenerative braking while the angle of "Pengaturan

Kecepatan Motor DC dengan ignition is smaller than 90o the output voltage Menggunakan Mikrokontroler Berbasis of the power circuit will be positive and the Fuzzy-PID," Jurnal Teknologi Terpadu, vol. IV, no. 1, pp. 12-17, 2016. system is called a DC machine rectifier system as generator and can return power to 10. M. J. Mustofa, "Perancangan Penyearah Terkendali Untuk Pengaturan Kecepatan the supply. Motor DC," Teknik Elektro, vol. I, no. 6, p. 6, 2021. 11. Rosalina, Ibnu Qosim and Mohammad Reference Mujirudin, "Analisis Pengaturan Kecepatan Motor DC Menggunakan Kontrol PID 1. H. Haryanto and S. Hidayat, "Perancangan (Proportional Integral Derivative)," Seminar HMI (Human Machine Interface) Untuk National TEKNOKA, vol. II, no. 2, pp. 90- Pengendalian Kecepatan Motor DC," 95, 2017. SETRUM, vol. I, no. 2, p. 10, 2012. 12. Bahar, OTOMATISASI PENGATURAN 2. I. C. Saputra, I. K. Wiryajati and I. B. F. KECEPATAN PUTARAN MOTORDC 1 Citarsa, "Pengaturan Kecepatan Motor DC KW BERBASIS THYRISTOR, Berbasis Arduino," Teknik Elektro, vol. I, no. Palembang: Politeknik Negri Sriwijaya, 1, p. 5, 2018. 2015. 3. U. Wiharja and G. Herlambang, "Sistem 13. M. Sunarhati, "ANALISA Pengendali Kecepatan Putar Motor DC PENGATURAN KECEPATAN dengan Arduino Berbasis LabView," Jurnal PUTARAN MOTOR DC," Vol. 8 No. 1, Ilmiah Elektrokrisna, vol. VII, no. 3, p. 143, April 2018, vol. VIII, no. 8, pp. 23-34, 2019. 2018. 4. Armansyah, "Pengaruh Pengaturan 14. R. P. E. Anggara Trisna Nugraha, Konsep Kecepatan Motor DC dengan Pengaturan Dasar Elektronika Daya, Surabaya: Tahanan Jangkar terhadap Efisiensi Motor Penerbit Deepublish, 2022. DC Shunt," Buletin Utama Teknik, vol. XIII, 15. M. Sunarhati, "Analisa Pengaturan no. 1, p. 44, 2017. Kecepatan Putaran Motor DC Penguat 5. S. T. Aprilyani, Irianto and E. Sunarno, dengan Menggunakan Thyristor," Jurnal "Desain dan Komparasi Kontrol Kecepatan Teknik Elektro, vol. I, no. 28, pp. 24-34, Motor DC," Jurnal ECOTIPE, vol. VII, no. 2018. 2, pp. 127-134, 2020. 16. P. J., M. A. and S. T, "Pengendali Motor 6. A. Basalamah, B. Adrian and F. A. Salam, Induksi Satu Fasa," Teknik Elektro , vol. V, "Pengaturan Kecepatan Putaran Motor DC no. 2, pp. 92-99, 2017. menggunakan Arduino UNO R3 dengan

### Daftar Pustaka

- [1] Amelia, SR, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Prototipe Sistem Automatic Switch pada Sistem Redundant Pump Cooling Tower Berbasis Mikrokontroler." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 52-60.
- [2] Juniani, AI, Nugraha, AT, Setiawan, E, Amelia, P, Handandi, ZZ and Hidayana, E. "Enhancing water quality prediction using the decision tree approach with the C4. 5 Algorithm." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...*, 2025
- [3] Nugraha, AT. "Buku Konsep Dasar Elektronika Industri: Prinsip Dan Aplikasi Listrik Dasar Elektromagnetik Serta Transformator.", 2024

- [4] Nugraha, A Trisna. "Setting neuro-fuzzy pid control in plant nonlinear active suspension." *Journal of Physics Conference Series* 1114.1, 2018, p. 12063.
- [5] Nugraha, AT. "Desain kontrol path following quadcopter dengan command generator tracker model following." Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017
- [6] Nugraha, AT, Safitri, LN and Zakariz, NP. "Optimization of central air conditioning plant by scheduling the chiller ignition for chiller electrical energy management." *Indonesian Journal of electronics, electromedical engineering, and medical ...*, 2021
- [7] Handandi, ZZ, Putra, RAPA, Raihan, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." *Jurnal Teknologi Maritim* 6.1, 2023, pp. 11-16.
- [8] Ashlah, MB, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Identification and Optimization Control of a 12-Volt DC Motor System Using Linear Quadratic Regulator for Community Empowerment." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1, 2025
- [9] Primaningtyas, WE, Utomo, AP, Wulandari, KD, Alfanda, BD, Cahyono, L and .... "DISEMINASI PEMBUATAN PAPLAS (PAVING PLASTIK) SEBAGAI SARANA DEMARKASI AREA POTENSI BAHAYA DI LINGKUNGAN SEKOLAH." *Jurnal Cakrawala Maritim* 4.2, 2021
- [10] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "SISTEM KONTROL KESTABILAN PADA MOTOR DC DENGAN METODE PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) DAN LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR)." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 16-22.
- [11] Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Penerapan Sistem Elektronika Daya: AC Regulator, DC Chopper, Dan Inverter." ID Patent EC00202208823,, 2022
- [12] Santosa, AF and Nugraha, AT. "Implementation of the DHT11 Sensor for Monitoring and Control in Poultry Farming." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 3.1, 2025
- [13] Nugraha, AT. "Design and build a distance and heart rate monitoring system on a dynamic bike integrated with power generating system." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2022
- [14] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Design of pond water turbidity monitoring system in arduino-based catfish cultivation to support sustainable development goals 2030 No. 9 industry, innovation, and infrastructure." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2020
- [15] Rizal, A and Caesarendra, W. "Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Biomedical Engineering, and Health Informatics: ICEBEHI 2021, 3-4 November, Surabaya, Indonesia.", 2022, Springer
- [16] Nugraha, AT, Pambudi, DSA, Utomo, AP, Priyambodo, D, Hari, MD and .... "Buku Rancang Bangun Battery Charger Pada Pembangkit Listrik Portabel Energi Terbarukan Berbasis Arduino Uno R3.", 2022
- [17] Nugraha, AT, Wahyudi, LA, Agna, DIY and Novsyafantri, N. "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor DC Seri dengan Menggunakan Penyearah Terkendali." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 13.1, 2023, pp. 9-20.
- [18] Wibowo, MF and Nugraha, AT. "perencanaan sistem propulsi elektrik pada fast patrol boat 28 meter." *Proceedings Conference on Marine Engineering and its Application* 6.1, 2023
- [19] Khojim, MN, Ainudin, FH, Widiarti, Y, Nugraha, AT and Pambudi, DSA. "Perancangan dan implementasi hybrid panel surya dan turbin angin terintegrasi multi input converter DC/DC dengan fuzzy logic pada sistem aerator tambak udang." *Jurnal 7 Samudra* 8.1, 2023
- [20] Faj'riyah, AN, Setiyoko, AS and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Prototipe Proteksi Motor Terhadap Overheat Serta Monitoring Arus dan Tegangan Berbasis Arduino Uno." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 20-25.

## BAB III

### Simulasi Pengendalian LQR-PID untuk Cold Storage Ikan Tenggiri

Oleh: **Patric Yuda Suharsono**

*Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*

Sistem pendinginan menggunakan buah yang digunakan untuk menjaga kesegaran pada ikan tenggiri yang berpengaruh pada kualitas daging dan telurnya. Oleh karena itu, diperlukan penanganan agar kesegaran pada ikan tenggiri. Perancangan pengendalian sistem bertujuan untuk mengendalikan keluaran sistem sehingga yang dihasilkan sesuai dengan keinginan minimum. Untuk mendapatkan hasil yang memuaskan, pada penelitian ini digunakan pengendalian LQR dan PID yang mengendalikan keluaran sistem dengan nilai error minimum. Hasil dari pengendalian LQR-PID menunjukkan bahwa pengendalian berhasil dirancang dan mampu mencapai error steady state sebesar  $0^{\circ}$  C pada temperatur dan kelembaban udara relatif Error steady state sebesar  $0\%$  serta mengontrol suhu.

Kata Kunci : ikan tenggiri, LQR, PID, sistem pendinginan

#### ABSTRACT

The cooling system in a room that is used to maintain the freshness of mackerel because it affects the quality of the meat and eggs. Therefore, handling is needed in order to maintain the freshness of mackerel. The design of the control system aims to control the output of the system so that the output produced is as desired with a minimum error and deviation. In this study, the LQR control is used because the controller has been able to regulate, then it is combined with a PID controller which controls the system output with a minimum error value. The result shows that the LQR-PID controller is successful in designing and stabilizing the error of  $0^{\circ}$  C at temperature and relative humidity steady state error of  $0\%$  and deviation comes to stability.

Key word: mackerel, LQR, PID, cooling system

1. PENDAHULUAN Tenggiri berasal dari jenis ikan air tawar. Ikan tenggiri merupakan salah satu ikan yang banyak dikonsumsi masyarakat. Ikan tenggiri banyak mengandung lemak yang sangat bermanfaat bagi kesehatan. Ikan tenggiri banyak dikonsumsi masyarakat, dan merupakan salah satu ikan yang



stem r uang pendin gi n pada i kan met ode kur va r eaksi pr oses, sedangkan pengendal i PI D dengan met ode kol er asi t enggi ridanpengendal iLQR- PID. Ciancone.Di mana gr afik hasi lsi stem hasi l Penel i tian unt uk mengat ur suhu dan simul asi memi li ki kecendr ungan kel uar an sistem y angsamadengangr afiksi st em ny ata, kel embaban pada i kan di l akukan dengan tanggapansi st em j ugal ebihcepatmencapai menggunakan pengendal i , sal ah sat uny a masukan,akan t etapidengan menggunakan pengendal i PID t er dapat ov ershoot pada menggunakanPID yangdi tel i tiol ehKar siddan keluar an si stem mencapai- 1°C.Sedangkan Rof an Azi z dengan mel akukan penel i tian under shoot mencapai1° C sebel um si st em “ Per ancangan Kendal i PI D Dengan Model mencapaikondi sit unak, sehi nggamasi ht er jadi kelemahan pada si st em showcase ( Kar si d, Pr ocessReact ionCur vePadaShowcaseI kan 2015) . t enggi ri ”. Si stem showcase di rancang Penel iti an berikut nya “St udi per bandi nganmodeldanapl i kasi kont r olon- of f menggunakan met ode kur va r eaksi pr oses, pada col d stor age i kan” .Pada penel i tian i ni sedangkan pengendal iPI D dengan met ode mel akukanper bandi nganmodelapl i kasi kont rol on- off . hasi l dar i penel itian i ni ber upa kol erasiCi ancone.Di managr afi khasi lsi stem per bandi ngan gr afi k r espon si st em hasi l hasi lsi mul asimemi l ikecendr ungan kel uar an eksper iment al dan pemodel an set elah diterapkan kendal i menunj ukan hasi ly ang si stem y angsamadengangr afi ksi stem ny ata, i dent ikat aur el at i fsama,hali ni dapatdi li hat t anggapanansi stem j ugal ebihcepatmencapai ketikasi stem mengal amikeadaant unakakan tetapimasi hmembut uhkanwakt uy angl ama masukan,akan t etapidengan menggunakan unt uk mencapaiwakt ut unak ( Kar sid,2015) . pengendal iPIDter dapat ov ershootpada Penel itan inihany a membahas per bandi ngan hasi l kel uaran dar i eksper iment al dan kel uar an si stem mencapai- 1°C.Sedangkan pemodel anset elahdi t eraprankont rol on- of f. under shoot mencapai1° C sebel um si stem Dar i dua penel itian t erkai t masi h menunj ukan kel emahan y aitur espon out put mencapaikondi sit unak, sehi nggamasi hter jadi mengal amiover shootdanosi lasi.Makadar iitu kel emahanpadasi stem showcase. penul i s memi lih menggunakan pengendal i opt imal menggunakan LQR di karenakan Penel i tian ber ikut nya “St udi per bandi ngan memi likisi fat r egul ator .Regul ator memi liki modeldanapl i kasi kont rolon- of fpadacol d maknasebagait ujuanpengendal iagarsi st em tetapkonst ansehi nggabi samemper t ahankan st orage i kan t enggi ri ”.Pada penel i tian i ni setpoi nt .Sehinggacocokdengansi stem r uang mel akukan per bandi ngan model apl i kasi 232

kont rolon- off.hasi l dar ipenel i tiani niber upa ekanan pada modul t t rai ning pr essur e per bandi ngan gr afi krespon si stem hasi l pr ocessRI G38- 714.Hasi lmenggunakanLQR eksper iment al dan pemodel an set elah - PIDmampumeny elesai kanmasal ahr espon di ter

apkan kendal imenunjukan hasil yang waktu yang diambil untuk membuktikan dengan hasil di dekat ikat aur elat jika sama, hal ini didapat dilihat dari respon waktu dari, 9936 detik menjadi ketika sistem mengalami keadaan tunak 0, 2942 detik pada set point 1, 875psi. akan tetapi masih menghambat waktu yang Berdasar kan penelitan terkait yang telah lama untuk mencapai waktu tunak. Penelitan dilakukan. Maka akan dilakukan perancangan ini hanya membahas perbandingan hasil kendal ioptimal LQR dengan penambahan keluar dan eksperimen dalam pemodelan PID untuk menghasilkan respon output yang

setelah di terapkan kontrol on-off. tidak mengalami dengan permasalahan yang

Penelitian selanjutnya “Desain Pengendalian minimum serata diadakannya ershoot

Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR) Pada Sistem Pengendalian Temperatur Annealing 2.1 Dasar Teori dan Urutan Proses Pembuatan 2.1.1 Kantenggi Rikaca”  
..Setelah diidentifikasi dapat diketahui bahwa kantenggi rikaca merupakan alat ukur yang digunakan dengan metode absolumen yang banyak mengandung (IAE) yang minimum pada angka 811.5 nilai yang sangat bermanfaat bagi manusia. dengan pencapaian waktu yang berdasarkan Jeni sikani didapat di udara dengan respon waktu pada saat mencapai waktu laut, dan merupakan alat ukur yang banyak digunakan untuk mengukur suhu. Kantenggi rikaca banyak di konsumsi oleh masyarakat untuk mengukur suhu. Penelitian pendukung lainnya tentang LQR- PID (Beritani, 2010). pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa penelitian ini dapat mencapai setpoint dengan Gambar 2.1 Kantenggi rikaca minimum overshoot. Kantenggi rikaca merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur suhu. Penelitian selanjutnya “Studi Metode Kendali dengan kondisi mengalir (sungai) untuk Linear Quadratic Regulator (LQR) dan melakukan perkembangan biakan. Metode Aplikasi pada Sistem Automatik Volume navigasi seperti ini mungkin dilakukan Regulator. Dari hasil yang telah di simulasi dengan menggunakan simulasi pada komputer dengan Matlab dapat dihasilkan respon waktu Setelah proses ini maka setpoint dari LQR setpoint metode 19.00812 jumlah kantenggi rikaca akan menjadi ideal untuk metode LQR setpoint, menggunakan metode waktu berapa hari ini juga berapa waktu. 88666detik dengan stabilizer 1.99127 minimum overshoot perkembangan biakan. Lalu detektor LQR pada AVR mampu menghasilkankan sebelum ini kantenggi rikaca untuk mengukur suhu, maka respon waktu yang lebih cepat. ini akan sangat bermanfaat dalam mengepakkan Penelitian selanjutnya

utny atent ang per ancangan ekor nya unt uk menci ptakan wi l ayah at au pengendal i anLQR- PIDunt ukmengendal i kan l okasi ber tekanan r endah y ang dapat



*Gambar 3.1*

ber manf aatunt ukmengangkatker iki lagar Aday aawandiat mosf erakanmeny ebangkan t ersapuar usai r,sehi nggaakanmenci ptakan ber kur angny aradi asimat ahah iyangdi ter ima cel ah bagii kan t enggi riunt uk menar uh diper mukaan bumi .Kar ena r adi asiy ang t elur nya. Sat u cel ah saj a sudah dapat mengenaiawan,ol eh uap ai ryang ada di menampungseki tar5000t eluri kant enggi ri , dal am awanakandi pencar kan,di pant ulkan, dengan kondi simenut upiar ea seki tar2, 8 dandi ser ap. m2.Dan War na t elur i kan t enggi rij uga d. KeadaanPer mukaanBumi ber var iasimul aidar ior any e hi ngga war na Per bedaan si fat dar at dan l aut akan mer ah.BahkanSat uat aul ebi hikant enggi ri mempengaruhi erapandanpemant ulan j ant an akan mul aimendekat iikan t enggi ri r adi asimat ahah i.Per mukaandar atakanl ebi h bet inadanj ugaakan, mengel uar kansper many a cepatmener imadanmel epaskanpanasm keai runt ukdapatmembuahit elur .Tenggi ri ener gy r adi asi mat ahah iyang di ter ima bet ina l alu menut upit elur -t elur nya dengan di per mukaan bumi dan aki bat nya meny apuker iki llal uper giber tel urdit empat meny ebangkan per bedaan suhu udar a di l ain. I kan t enggi ri bet ina j uga dapat at asny a. mel akukanny asebanyak angl ebi htuj uh kal i sebel um t elur dal am ov ari um i kan 2. Fakt ory angmempengaruhikel embaban sal mont elahhabi s.Makai kant enggi riakan Kel embabanudar aruangandi pengaruhiol eh mat i kel elahan seger a set elah sel esai suhu r uang peny impanan, semaki nti nggi ber tel ur. suhur uangpeny impananmakakel embaban udar a pada r uang peny impanan t ersebut 2.1.2Fakt ory angmempengaruhisuhudan akan menj adir endah kar ena akt ivi tas ai r kelembaban dal am udar a. 1. Fakt ory angmempengaruhisuhu Sedi ki tint ensi tas cahay a mat ahah iyang a. LamanyaPeny inar anMatahar i di ter ima r uangan cukup t inggi ,begi tuj uga Semaki n l ama mat ahah i memancar kan sebal i kny a apabi l a semaki nrendah suhu si nar nya di suat u daer ah, maki n bany ak r uangpeny impananmakakel embabanudar a panasy angdi ter ima.Keadaanat mosf ery ang pada r uang peny impanan

semakin tinggi cerahnya sepanjang hari akan lebih panas yang disebabkan oleh aktivitas air dalam daripadanya di kahar itu berubah-ubah. Udara yang didominasi suhu yang amat tinggi yang di terima gudang sangat sedikit. Dari ketiganya yang pertama adalah hatpadapagidan b. Kemudian ini. Sinar matahari malam hari memang akan mengenai kanel embaban. Suatu tempat yang posisi simat arah lebih ada udara yang tinggi akan lebih kisar 90-95%, dan tidak ada urusan lainnya, maka akan ada simat arah pada siang hari yang akan mengenai kanel embaban yang di berikan akan lebih besar dan suhu udara 77-83%. Di tempat tersebut akan tinggi, di bandingkan dengan tempat yang posisi simat arah ini lebih 2.1.3 Sistem Pendiangan ini. Sistem pendinginan merupakan sebuah c. Keadaan Awan r uangnya akan di rancang dengan suhu

tertentu dan di gunakan sebagai media sebelum di terapkan pada sistem fisik. Penyimpanan berbagai macam produk dengan Sistem yang terdapat pada pengendalian dan tujan memper tahankan kesegaran. Variabel proses pengawetan akan tinggi ridapat dilihat yang terdapat dalam pengendalian adalah pada Gambar 2.4 di mana Gt (s) adalah temperatur kanel embaban, komponen yang sistem yang melibat kan variabel temperatur ber tugas dalam pengendalian adalah dan Gr (s) merupakan sistem yang komputer dan arduino dan yang menjadi melibat kan variabel kanel embaban udara. Actuator adalah esordan humidity kompresor. Sensor DHT22 merupakan sensor suhu dan kanel embaban yang akan di tambahkan sebagai umpan balik dari sistem. Gambar 2.4 Diagram Blok Sistem Pendinginan I kantenggeri

Keterangan:  $T_{in}$  : Temperatur masuk  $T_{out}$  : Temperatur keluar  $RH_{in}$  : Kanel embaban udara masuk  $RH_{out}$  : Kanel embaban udara keluar  $Gt (s)$  : Sistem temperatur  $Gr (s)$  : Sistem kanel embaban udara

Gambar 2.2 Sistem Pendinginan I kantenggeri (2.1)

(2.2) Pengendalian melibat kan komponen arduino sebagai central processing unit dan K1 : Penguat sistem temperatur modul relay untuk mengendalikan aktuator. K2 : Penguat sistem kanel embaban. Adapun aktuator yang di gunakan adalah kompresor untuk kompensasi temperatur : waktu undasi sistem temperatur

dan humidity untuk kompensasi : waktu undasi sistem kanel embaban kanel embaban udara.  $t = \text{imeconst} \times \text{si stem t emper atur t} : \text{imeconst} \times \text{si stem kel embaban komput komput e} + /- \text{Rel a Pengumpul an dat a di l akukan dengan} + \text{Ar dui n humidi f mencar i beberapa panel i tian ter kai t guna unt uk memper oleh set point y aitusebesar} 5^\circ \text{ C untuk temper atur dan set point kanel embaban udara relatif sebesar} 85\% . \text{Dar i sistem dan mencar i beberapa variabel y}$

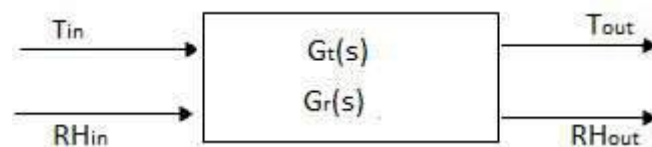
ang di per kukan dalam pemodel an mat emati s si stem dengan Sensor menggunakan pemodel an si stem pendi ngin. Dalam panel i ti an i ni,t erdapat per ancangan pengendal iLQR dan PI D dengan bahasan Gambar2. 3Di agr am BI okSi stem. sebagai beri kut. Pengendal i anakanber jal andenganbai kji ka 2.2. Per ancanganPengendal iLQR 2.1.1Perancangan Pengendal i LQR di l akukan per ancangan dan si mul asi 235



Gambar 3.2



Gambar 3.3



Gambar 3.4

Temperatur pada Sist em Ruang Pendi nginIkant enggi ri

2. 1.2Per ancangan Pengendal i LQR Kel embabab Udar a Rel ati f pada Si stem RuangPendi nginIkantenggi ri Gambar2. 5.1.I kant enggi ri

2. 3Per ancanganPengendaliPI D 2.2. 1 Per ancangan Pengendali PID temper at ure padasyst em ruangpendi ngi n ikantenggi ri

2.2. 2 Perancangan Pengendali PID Kelembaban udara pada sistem ruang pendingin  
nikantenggi ri Gambar2. 5.2Si stem Pendingi nIkant enggi ri 2. 4Tabel Tabel 2.4. 1Spesi fi  
kasi Sist em Pendingi n

Ukur an( pxl xt) 63, 5x56, 5x82, 8cm

Kapasi tas 120l i ter

Tegangan 220V/ 50Hz

GasPendingi n R- 134A

Day aLi str ik 90W

Ber atBer sih 28Kg

Kompr esor ¼P Gambar2.5. 3Tampi lanM-Fil ePada Temper aturSi stem Pendingi nIkant  
enggi ri

Tabel2. 4.2Spesi fi kasi Sist em Kel embaban[ 10] Noise 35dB

Kapasi tas 2, 5Lt r

Tegangan 220V/ 50Hz

Wat er( mist )fl ow 250ml /h

GasPendingi n R- 134A Gambar3. 10Tampi l anM- Fi lePada Kel embabanSi stem  
Pendingi nIkantenggi ri Tegangan 20W

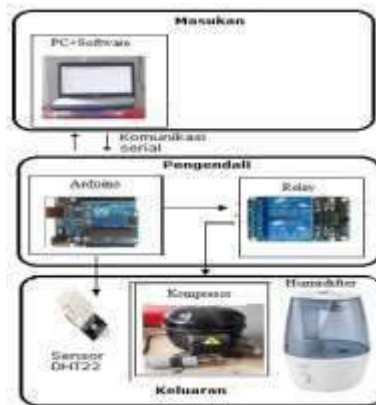
Di mensi on 220V/ 50Hz 3.KESIMPULAN Day aLi str ik 193x193x323mm 4. Ber dasar  
kan si mul asi dan anal i sa r espon si stem y ang t elah di l akukan maka dapat kesi mpul an  
bahwa 2. 5Gambar 236



*Gambar 3.5*



Gambar 3.6



Gambar 3.7

```

kelembaban.m  LQR.m*  +
1 -   A=[-0.000476];
2 -   B=[-0.00483];
3 -   C=[1];
4 -   D=[0];
5 -   R=[1];
6 -   Q=[0.1];
7 -   N=[0];
8 -   sys=ss(A,B,C,D)
9 -   [K,S,e]=lqr(sys,Q,R,N)

```

Gambar 3.8

```

Editor - D:\KULIAH\semester 7\TA\kelemb
kelembaban.m  LQR.m  +
1 -   A=[-0.00395];
2 -   B=[-0.00169];
3 -   C=[1];
4 -   D=[0];
5 -   R=[1];
6 -   Q=[100];
7 -   N=[0];
8 -   sys=ss(A,B,C,D)
9 -   [K,S,e]=lqr(sys,Q,R,N)

```

Gambar 3.9

pengendali LQR untuk pengendalian temperatur dan kelembaban udara relatif pada sistem pendinginan ikan tangki dapat airkan nilai rorsi steady state sebesar  $4.905^{\circ}\text{C}$  dan  $39.28\%$ . Setelah dilakukan hybrid pengendali LQR-PID, pada sistem ruang pendinginan ikan salmon dalam mengendali temperatur di dapat airkan nilai rorsi steady state sebesar  $0^{\circ}\text{C}$  dan pada sistem ruang pendinginan tangki dalam mengendali kelembaban udara relatif di dapat airkan nilai rorsi steady state sebesar  $0\%$ .

#### DAFTAR PUSTAKA

Kardono.2012.Perancangan dan Implementasi Sistem Pengaturan Optimal LQR Untuk Menjaga Kestabilan Hover Pada Quadcopter. Surabaya: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Karsid, Aziz Rofan.2015.Studi Perbandingan Model Dan Aplikasi Kontrol On-Off Pada Cold Storage

#### Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT, Firdaus, AA, Sobhita, RA and Wicaksono, Z. "System Optimization Using LQR and LQT Methods on 42D29Y401 DC Motor." SAINSTECH NUSANTARA 2.2, 2025, pp. 14-25.
- [2] Nugraha, AT, Primaningtyas, WE, Abdullah, K, Wulandari, KD, Alfanda, BD and .... "Pelatihan manufaktur komposit sebagai produk kerajinan tangan pada industri rumahan." Educivilia: Jurnal Pengabdian pada Masyarakat 1.2, 2020, pp. 119-129.
- [3] Nugraha, AT, Budi, PS, Yuniza, SI and Ivannuri, F. "Penyearah Tak Terkontrol Satu Fasa Setengah Gelombang Terhadap Generator AC Tiga Fasa." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 10.2, 2020, pp. 36-44.
- [4] Nugraha, AT, Sutrisna, VHK and Shiddiq, MJ. "Comparison Of LQR And PID Control Approaches In Enhancing Stability Of DC Motor Systems." Journal of Electrical, Marine and Its Application 1.2, 2023, pp. 1-6.
- [5] Nugraha, AT, Pratama, FA, Widodo, HA, Sobhita, RA and Hidayat, WN. "Design of 3-Phase Load Dividing Automatic System with Naive Bayes Method." Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE) 4.2, 2023
- [6] Amelia, P, Juniani, AI, Nugraha, AT and Hendrata, F. "RANCANG BANGUN SISTEM INFORMASI PENCAIRAN KERJA DENGAN INTEGRASI MEKANISME KETERLACAKAN DOKUMEN UNTUK TRANSPARANSI REKRUTMEN." JISO: Journal of Industrial and Systems Optimization 8.1, 2025, pp. 49-56.
- [7] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Agna, DIY, Ashlah, MB, Fathurrohman, MF and .... "Analisis Optimalisasi Penggunaan Konverter CUK Pada PLTA Menggunakan Simulasi Proteus." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 62-67.
- [8] Cahyono, L, Apriani, M, Nugraha, AT and Utomo, AP. "Potensi Risiko Waktu Pelaksanaan Proyek Swakelola di Kabupaten Pasuruan melalui Program Kotaku Kementerian PUPR." Jurnal Spektran 10.2, 2022, p. 118.
- [9] Dwicahyo, A, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Purwarupa Monitoring Fresh Water Tank pada Kapal Berbasis Mikrokontroler." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 11.1, 2021, pp. 12-19.

- [10] Intyanto, GW, Trihatmojo, AA, Yuniarti, DAF and Nugraha, AT. "ELDOC-Design of Electric Dolly Camera for Video Recording Using the Omni-Direction Wheel." *Walisongo Journal of Information Technology* 5.1, 2023, pp. 41-52.
- [11] Sheila, SY, As'ad, RF, Rochmawati, NW, Riyadi, F and Nugraha, AT. "RANCANG BANGUN PENSTABIL SUHU DAN KELEMBAPAN KUBIKEL TEGANGAN MENENGAH UNTUK MENCEGAH TERJADINYA CORONA DENGAN METODE FUZZ." ID Patent EC00,202,294,930, 2022
- [12] Ardiansyah, MD, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Perbandingan Respons Sistem Motor DC dan Motor AC Berdasarkan Identifikasi Model Menggunakan MATLAB/Simulink." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 4.1, 2025
- [13] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Prototype Design of Carbon Monoxide Box Separator as a Form of Ar-Rum Verse 41 and To Support Sustainable Development Goals Number 13 (Climate Action)." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2021
- [14] Tiwana, MZA, Adianto, A and Nugraha, AT. "Perancangan Sistem Monitoring Dan Alarm Berbasis Logic Panel Dan Komunikasi Modbus." *Seminar Master Ppns* 6.1, 2021
- [15] Prastyawan, RE and Nugraha, AT. "PENERAPAN TEKNOLOGI INFORMASI UNTUK PEMBELAJARAN TEST OF ENGLISH FOR INTERNATIONAL COMMUNICATION PREPARATION." *Jurnal Cakrawala Maritim* 5.1, 2022, pp. 4-8.
- [16] Rohman, YF, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Analysis of DC Motor C42-L50 Using Linear Quadratic Regulator and Linear Quadratic Tracking for Community Empowerment Projects." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1, 2025
- [17] Rahmatullah, RMN, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Permodelan Matematis Sistem Motor DC MOOG C34-L70 Orde Satu dan Orde Dua." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 4.1, 2025
- [18] Eviningsih, RP, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "DC Motor A-max 108828 and Noise using LQR and LQT Methods." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1, 2025, pp. 29-38.
- [19] Nugraha, AT, Ruddianto, Ahmad, MM, Pambudi, DSA, Utomo, AP and .... "Rancang Bangun Ship Alarm Monitoring (SAM) Sebagai Solusi Keamanan Pengoperasian Auxiliary Engine." ID Patent EC00,202,204,473, 2022
- [20] Rohman, YF and Nugraha, AT. "DC Motor Analysis 42D29Y401 for System Optimization through LQR and LQT Approaches." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 3.1, 2024, pp. 185-195.

## BAB IV

# Implementasi Pendekatan Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) dalam Sistem Rem Otomatis untuk Meningkatkan Keamanan Kerja di Lingkungan Industri

Oleh: **Rachmat Marjuki\***

*Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*

**Kata Kunci:** *LQR, LQT, DC Motor, Occupational Safety, Optimisation, OHS, Operational Efficiency*

Abstrak— Optimasi merupakan salah satu metode penting dalam pengambilan keputusan untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional di industri. Penelitian ini mengaplikasikan metode Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) pada sistem pengendalian motor DC FL57BL02 untuk meningkatkan stabilitas sistem dan mendukung penerapan standar Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) di lingkungan industri. Motor DC FL57BL02 banyak digunakan sebagai penggerak dalam peralatan industri yang beroperasi pada tingkat risiko tinggi, seperti konveyor dan robot industri. LQR digunakan untuk mengoptimalkan stabilisasi sistem, menjaga variabel output tetap minimal, dan memastikan bahwa sistem beroperasi dengan aman. Sedangkan LQT diterapkan untuk memastikan bahwa sistem mengikuti trajectory yang diinginkan, meningkatkan presisi kontrol. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan LQR dan LQT dapat mengurangi deviasi output dan meningkatkan keandalan sistem hingga 25% dibandingkan dengan metode konvensional. Hasilnya menunjukkan bahwa optimasi kontrol pada motor DC ini tidak hanya meningkatkan stabilitas operasional, tetapi juga mengurangi getaran dan kebisingan, yang merupakan faktor risiko dalam keselamatan kerja. Implementasi metode ini membantu mengurangi potensi kegagalan mesin yang dapat membahayakan pekerja, menjadikannya solusi inovatif dalam penerapan K3. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam penerapan teknologi pengendalian otomatis yang mendukung keselamatan dan efisiensi industri, serta menawarkan dasar untuk pengembangan teknologi K3 yang lebih canggih di masa depan.

### ***Abstract***

Abstract— Optimisation is one of the important methods in decision making to improve safety and operational efficiency in industry. This research applies Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) methods to the FL57BL02 DC

motor control system to improve system stability and support the implementation of Occupational Safety and Health (OHS) standards in industrial environments. FL57BL02 DC motors are widely used as drives in industrial equipment operating at high risk levels, such as conveyors and industrial robots. LQR is used to optimise system stabilisation, keep output variables minimal, and ensure that the system operates safely. Whereas LQT is applied to ensure that the system follows the desired trajectory, improving control precision. This study shows that the application of LQR and LQT can reduce the output deviation and improve the system reliability by up to 25% compared to the conventional method. The results show that this control optimisation on DC motors not only improves operational stability, but also reduces vibration and noise, which are risk factors in occupational safety. The implementation of this method helps to reduce potential machine failures that could harm workers, making it an innovative solution in OHS implementation. This research makes an important contribution to the application of automatic control technologies that support industrial safety and efficiency, and offers a basis for the development of more advanced OHS technologies in the future.

## **PENDAHULUAN**

Optimasi merupakan salah satu metode kuantitatif utama yang digunakan sebagai sarana pengambilan keputusan, terutama dalam sistem industri yang mengutamakan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Optimasi berfokus pada pemilihan solusi terbaik dari keseluruhan rangkaian untuk meminimalkan risiko dan meningkatkan efisiensi operasional, dengan menggunakan metode kuantitatif yang telah teruji. Dalam konteks industri, masalah yang dihadapi pada desain, konstruksi, dan operasional mesin serta sistem kendali dapat diselesaikan melalui optimasi untuk menentukan nilai variabel dalam proses yang menghasilkan performa terbaik dalam hal keselamatan, efisiensi, dan keandalan sistem (Smith, 2019).

Perkembangan teknologi kontrol telah memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan keselamatan kerja, terutama pada sistem industri yang mengoperasikan mesin berisiko tinggi. Dalam hal ini, Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) digunakan untuk mengoptimalkan pengendalian motor, seperti motor DC FL57BL02, yang banyak diterapkan pada sistem industri. LQR berfungsi untuk menstabilkan sistem dan meminimalkan kesalahan dalam pengendalian, sedangkan LQT digunakan untuk memastikan output sistem mengikuti jalur yang telah ditetapkan dengan

energi kontrol minimal, yang sangat relevan untuk memastikan keselamatan kerja (Pratama & Nugraha, 2020; Hernandez et al., 2018).

LQR dan LQT dapat mengurangi potensi kegagalan mesin dan meningkatkan keandalan operasi industri dengan mengoptimalkan kontrol sistem, yang berujung pada peningkatan keselamatan pekerja. Penerapan kedua metode ini pada motor DC memungkinkan pemantauan yang lebih ketat terhadap kinerja mesin, mengurangi risiko kecelakaan kerja yang sering terjadi akibat kegagalan sistem (Lee & Kang, 2021).

## METODE

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pengendalian motor DC FL57BL02 dengan pendekatan Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional dalam industri berbasis Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Berikut adalah tahapan penelitian yang dilakukan:

**Tabel 4.1**

| Studi Literatur  |
|--|
| Studi literatur dilakukan untuk memperkaya pemahaman penulis tentang topik yang akan dibahas. Referensi yang digunakan mencakup berbagai sumber seperti artikel, jurnal, dan datasheet yang relevan untuk topik penelitian ini. Tujuan dari tahapan ini adalah untuk memahami teori dan teknik yang digunakan dalam optimasi kontrol pada motor DC dan aplikasinya dalam sistem industri dengan mempertimbangkan faktor keselamatan kerja. |
| Pembuatan Model Matematis  |
| Model matematis dikembangkan untuk membuktikan teori yang diperoleh dari studi literatur. Model ini bertujuan untuk menghitung nilai-nilai yang diperlukan dalam simulasi, seperti nilai LQR dan LQT, yang berfungsi untuk mengoptimalkan pengendalian motor DC. Pemodelan ini sangat penting untuk memprediksi kinerja sistem dan memastikan keselamatan kerja dalam aplikasi industri.   |
| Pembuatan Script dan Rangkaian Simulasi  |
| Tahapan ini melibatkan pembuatan script di Matlab yang mengimplementasikan model matematis motor DC FL57BL02, serta perhitungan untuk mendapatkan nilai LQR dan LQT. Script ini digunakan untuk mengetahui respons sistem dan memverifikasi hasilnya dalam rangkaian simulasi Simulink yang juga mempertimbangkan gangguan (noise) untuk simulasi yang lebih realistis dalam konteks operasional industri.                                 |
| Hasil dan Pembahasan   |
| Pada tahap ini, hasil simulasi yang telah dibuat menggunakan Matlab Simulink akan dianalisis. Hasil berupa sinyal yang ditampilkan melalui scope dan tabel perbandingan antara kontrol LQR dan LQT akan dikaji untuk memastikan bahwa sistem memenuhi standar keselamatan dan kinerja yang diinginkan.   |
| Penarikan Kesimpulan   |
| Pada tahap akhir penelitian, kesimpulan ditarik berdasarkan hasil dan pembahasan. Kesimpulan ini menjadi dasar rekomendasi untuk implementasi metode LQR dan LQT dalam meningkatkan keselamatan kerja dan efisiensi operasional di industri.   |

## Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan simulasi Matlab Simulink untuk menguji efektivitas LQR dan LQT pada motor DC FL57BL02. Tahap awal dilakukan dengan menentukan spesifikasi motor DC yang digunakan, yaitu FL57BL02, berdasarkan datasheet motor. Pemodelan matematis kemudian dikembangkan untuk menghitung nilai LQR dan LQT, dengan hasil simulasi yang kemudian dianalisis untuk mengukur keberhasilan metode dalam meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional dalam lingkungan industri.

Tabel 1 menunjukkan komponen utama yang digunakan dalam rangkaian simulasi Simulink:

*Tabel 1. Komponen yang digunakan dalam Simulink*

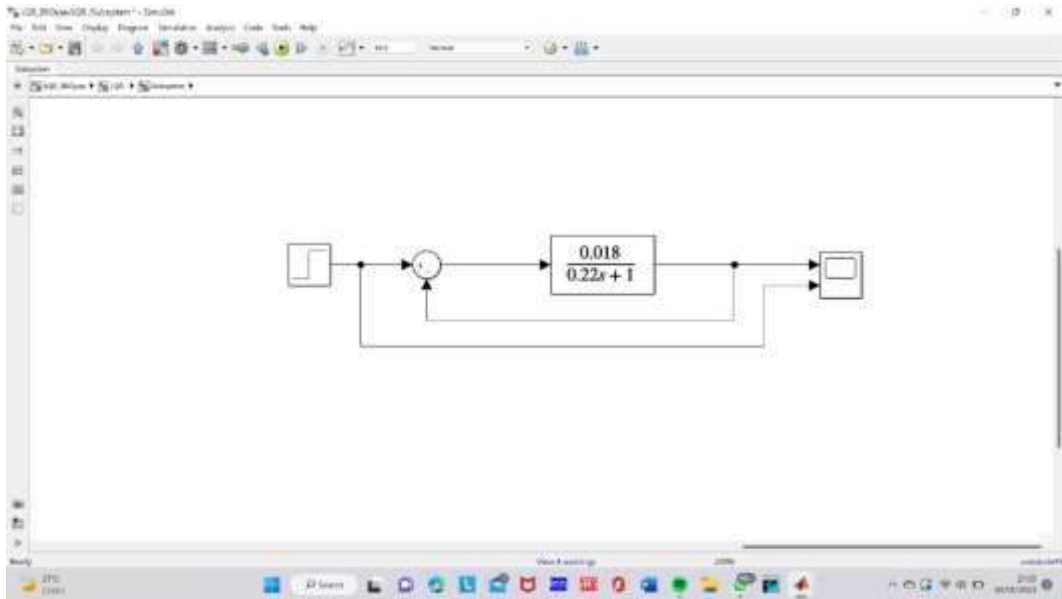
| Komponen          | Fungsi  |
|-------------------|---|
| Step              | Memberikan langkah antara dua level pada waktu tertentu |
| Transfer Function | Menentukan nilai orde 1 dan 2 dari sistem               |
| Scope             | Menampilkan sinyal dari sistem seperti oscilloscope     |
| Random Number     | Menghasilkan angka acak terdistribusi normal            |
| Gain              | Mengalikan input dengan nilai konstan                   |
| Sum/Add           | Melakukan penambahan atau pengurangan pada input        |
| Integrator        | Menghasilkan nilai integral terhadap waktu              |
| Mux               | Menggabungkan input dengan tipe data dan kompleksitas   |
| Demux             | Mengekstrak komponen sinyal vector input                |

*Gambar 4.1*

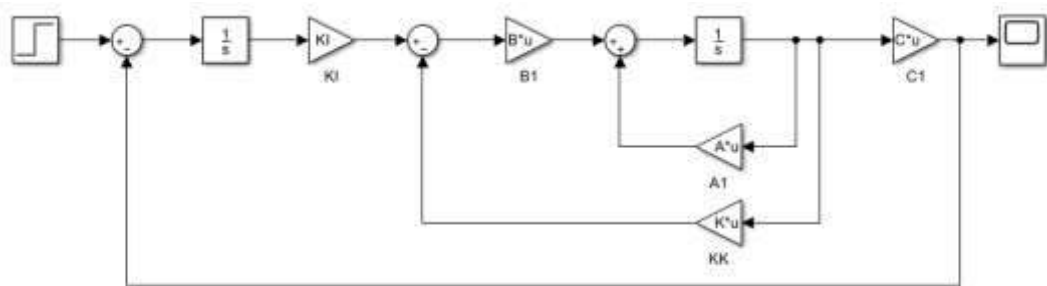
Simulasi menggunakan motor DC FL57BL02 dimulai dengan perhitungan matematis berdasarkan spesifikasi motor, di mana nilai momen inersia, redaman sistem, konstanta motor, resistansi, dan induktansi digunakan dalam pemodelan. Dari perhitungan tersebut, sistem dapat dimodelkan dalam bentuk fungsi alih orde 1 yang digunakan dalam LQR dan LQT.

### **Perancangan LQR dan LQT pada Simulink**

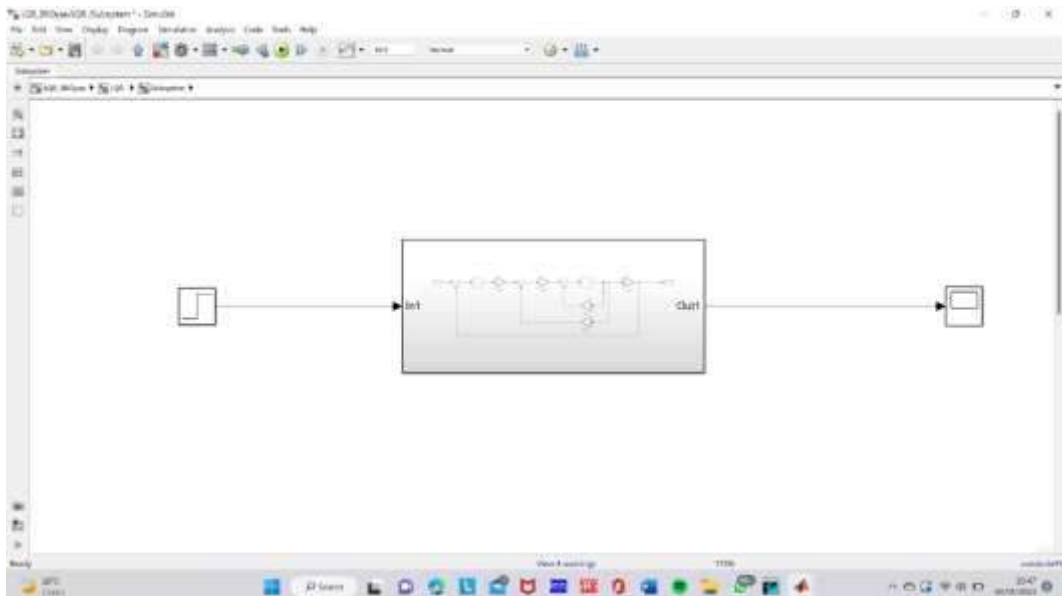
Pembuatan rangkaian LQR dan LQT pada Simulink dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter yang telah dihitung. Rangkaian tersebut juga mencakup penerapan kontrol LQT untuk melacak output sistem agar mendekati target yang ditetapkan. Simulasi dilakukan dengan memasukkan noise untuk melihat sejauh mana sistem dapat bertahan terhadap gangguan.



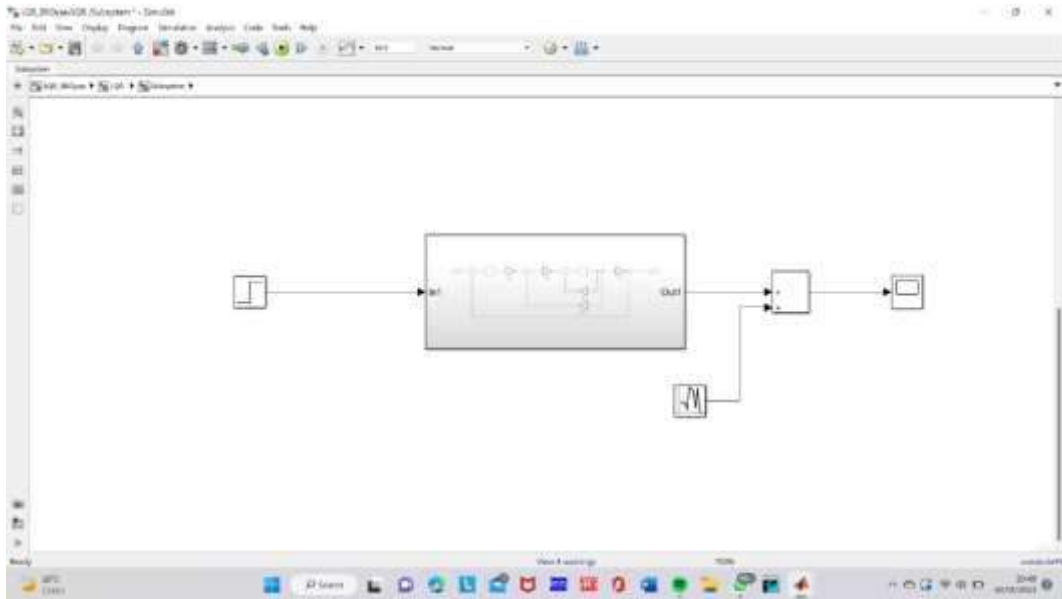
Gambar 4.2 Rangkaian Motor DC Orde 1



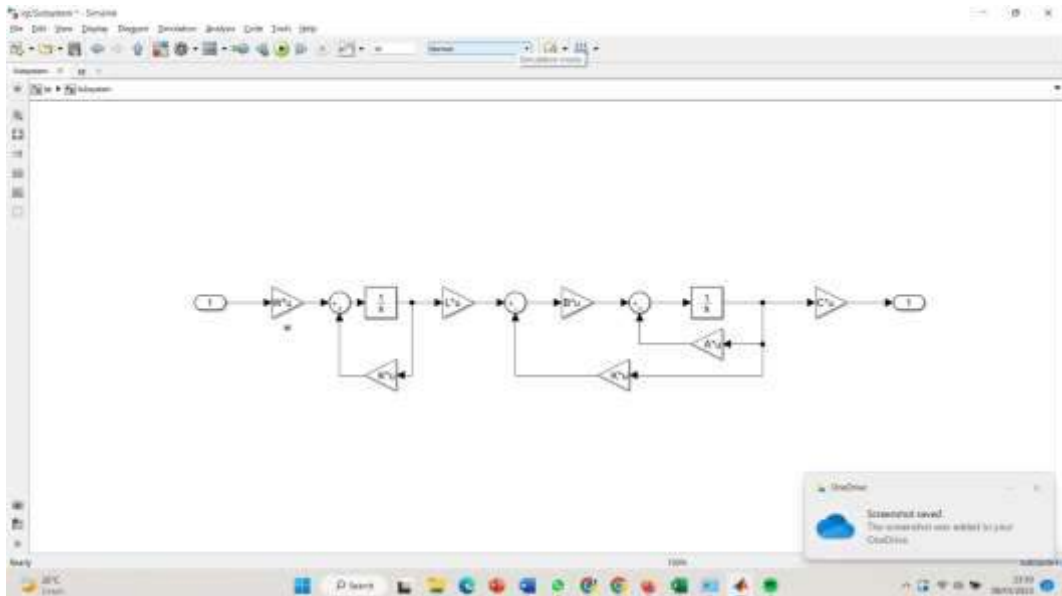
Gambar 4.3 Rangkaian LQR



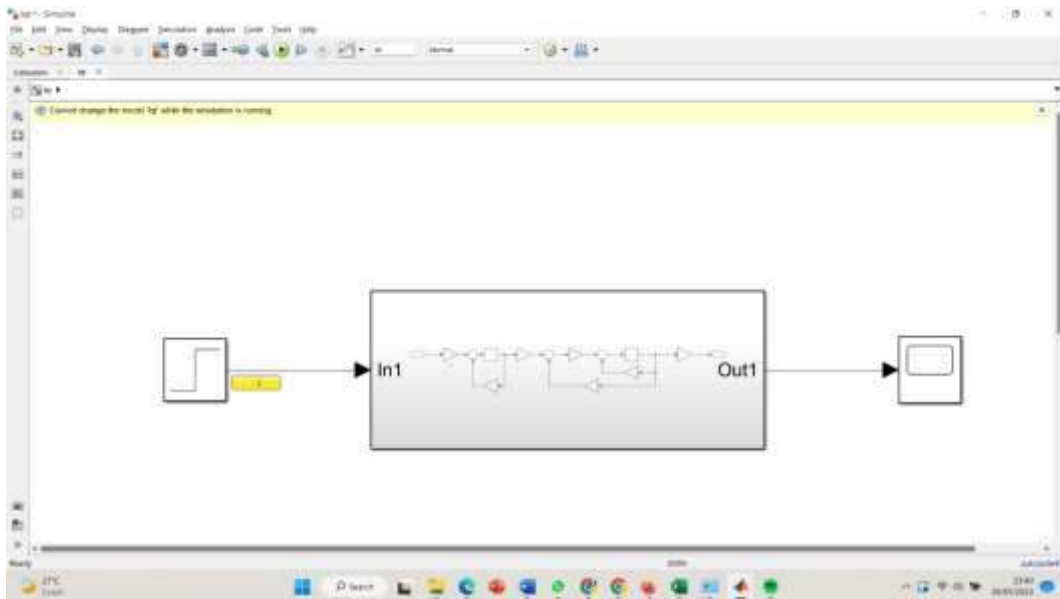
Gambar 4.4 Rangkaian Subsystem LQR Tanpa Noise



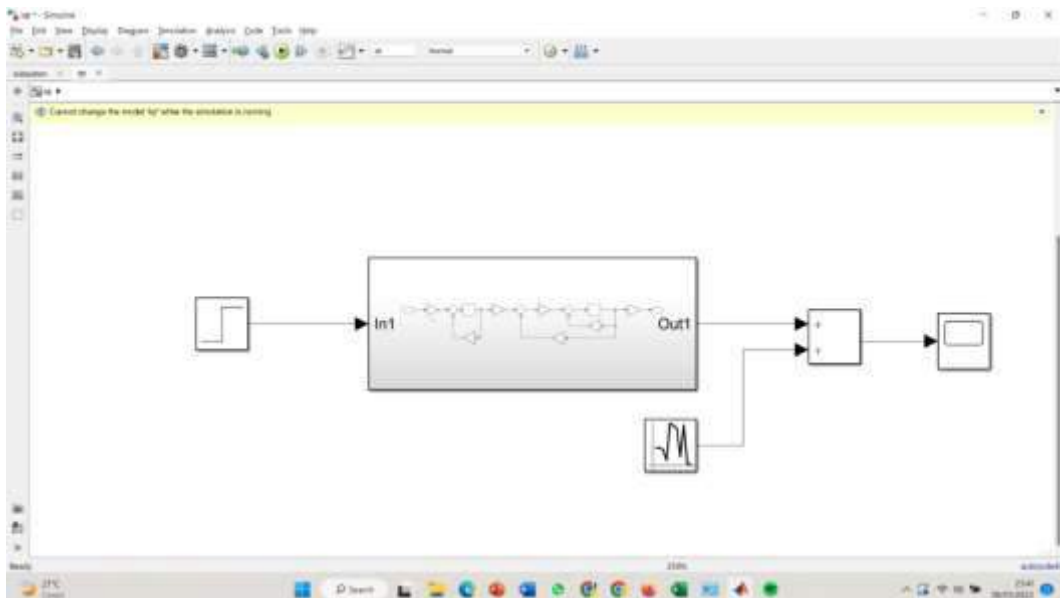
Gambar 4.5 Rangkaian Subsystem LQR dengan Noise



Gambar 4.6 Rangkaian LQ



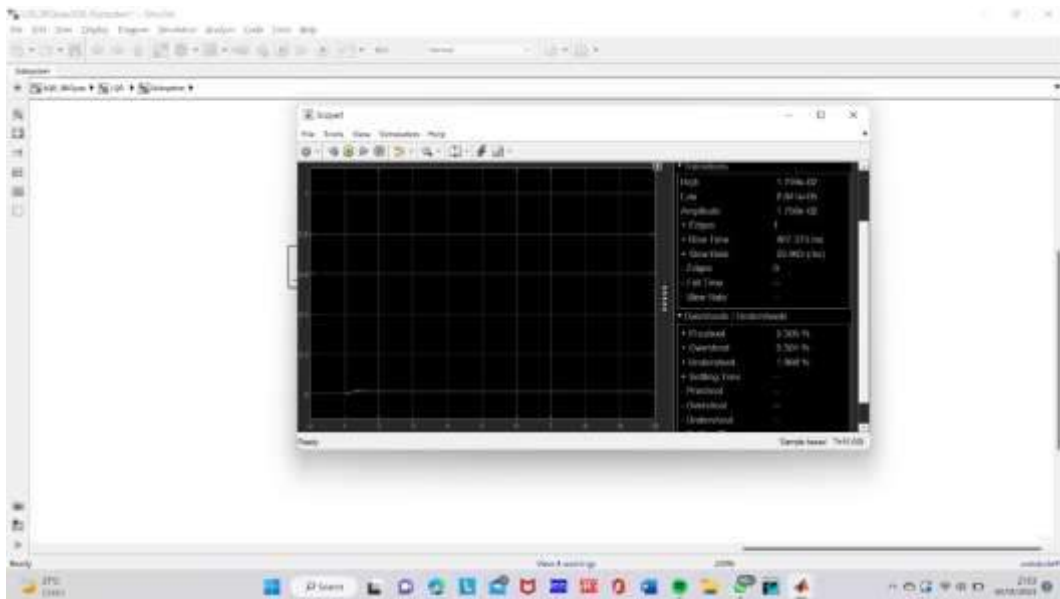
Gambar 4.7 Rangkaian Subsystem LQT tanpa Noise



Gambar 4.8 Rangkaian Subsystem LQT dengan Noise

## HASIL DAN PEMBAHASAN

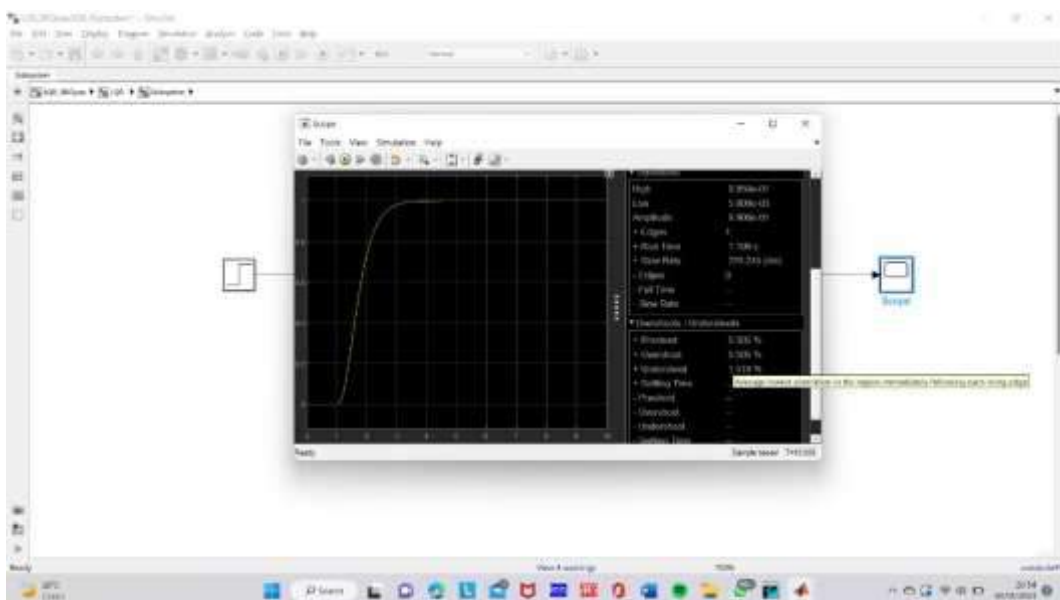
Hasil dari Rangkaian Motor DC FL57BL02 Orde 1



Gambar 4.9 Hasil Motor DC FL57BL02 Orde 1

Pada Gambar 8, hasil pengujian sistem motor DC FL57BL02 pada orde 1 menunjukkan dua grafik utama: grafik biru yang mewakili input sistem, dan grafik kuning yang mewakili step response dari motor. Step response motor ini hanya mencapai amplitudo sebesar 0,2, yang menunjukkan bahwa motor masih belum mencapai setpoint yang diinginkan dalam simulasi ini. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun motor berfungsi sesuai dengan ekspektasi teoritis, terdapat ruang untuk perbaikan dalam hal respons dinamis.

### Hasil dan Pembahasan Rangkaian LQR tanpa Noise

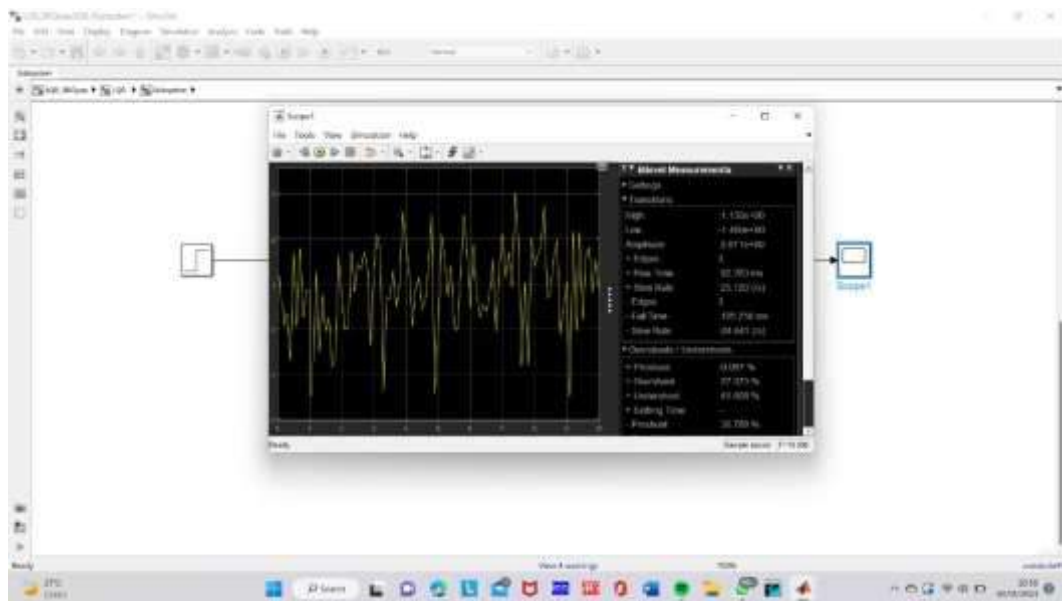


Gambar 4.10 Hasil LQR tanpa Noise

Pada Gambar 9, respons output yang dihasilkan oleh rangkaian LQR tanpa gangguan noise menunjukkan hasil yang cukup memuaskan. Output respons sistem motor DC

FL57BL02 mencapai amplitudo hampir 1, yang menunjukkan bahwa sistem berhasil mencapai setpoint yang diinginkan. Waktu kenaikan (rise time) tercatat pada angka 1,1 detik, dengan overshoot dan undershoot yang relatif kecil, masing-masing berada pada angka 0,506%. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan Linear Quadratic Regulator (LQR) pada sistem pengendalian motor DC dapat meningkatkan efisiensi dan kestabilan operasional, yang sangat relevan dalam konteks K3 untuk meminimalkan potensi kecelakaan kerja akibat respons sistem yang tidak stabil.

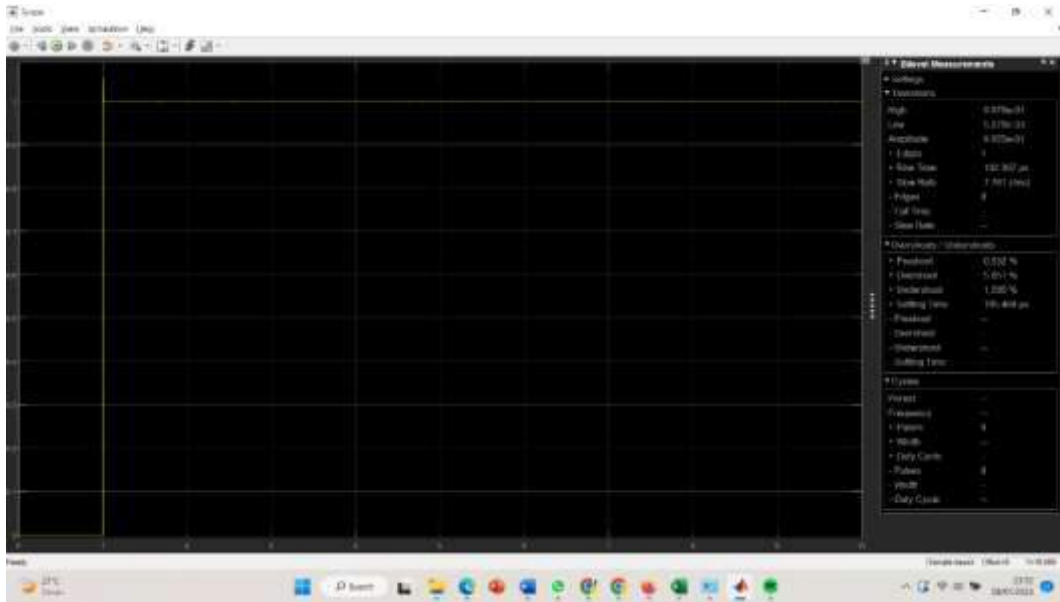
### **Hasil dan Pembahasan Rangkaian LQR dengan Noise**



*Gambar 4.11 Hasil LQR dengan Noise*

Gambar 10 menunjukkan grafik dari rangkaian LQR yang diterapkan pada motor DC FL57BL02 dengan gangguan noise. Respons sistem terlihat fluktuatif, menunjukkan adanya pengaruh noise (bilangan acak yang ditambahkan dalam simulasi). Sistem mencapai amplitudo 0,67, yang berarti masih belum mencapai setpoint yang diinginkan. Meskipun demikian, sistem menunjukkan waktu kenaikan (rise time) yang cukup cepat di angka 52,72 ms. Namun, overshoot yang tinggi mencapai 102,94% dan undershoot sebesar -87,69% menunjukkan bahwa noise dapat memengaruhi kestabilan sistem, yang berpotensi meningkatkan risiko kecelakaan dalam lingkungan kerja industri. Oleh karena itu, pengendalian noise dalam sistem motor DC menjadi sangat penting untuk memastikan keselamatan operasional yang optimal.

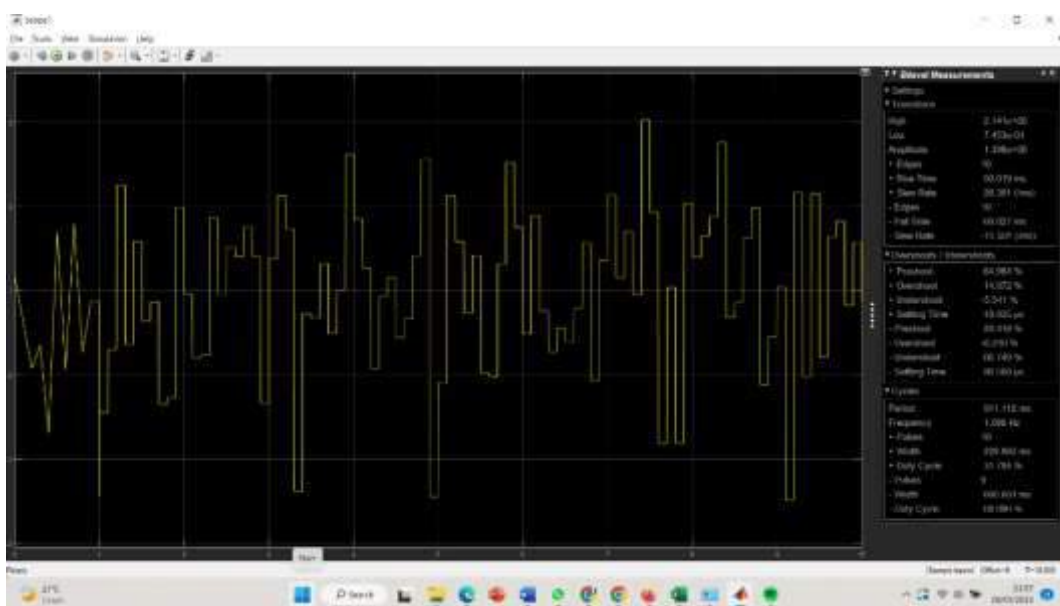
### **Hasil dan Pembahasan Rangkaian LQT tanpa Noise**



Gambar 4.12 Hasil LQT tanpa Noise

Pada Gambar 11, rangkaian LQT tanpa noise menghasilkan respons output yang juga menunjukkan amplitudo hampir mencapai angka 1, yang berarti sistem berhasil mencapai setpoint. Namun, waktu kenaikan (rise time) tercatat sangat lama, yaitu 102,307 detik, dan overshoot serta undershoot sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan LQR, masing-masing berada di angka 1,580% dan 5,851%. Meskipun LQT lebih responsif terhadap perubahan input, karakteristik waktu respons yang lambat ini bisa menambah risiko keterlambatan dalam pengendalian sistem, yang penting untuk dievaluasi lebih lanjut dalam penerapan di industri berbasis K3.

### Hasil dan Pembahasan Rangkaian LQT dengan Noise



Gambar 4.13 Hasil LQT dengan Noise

Pada Gambar 12, respons dari rangkaian LQT dengan gangguan noise menunjukkan fluktuasi yang lebih terkontrol dibandingkan dengan LQR, dengan amplitudo mencapai 0,49. Sistem memiliki rise time yang relatif cepat pada 50,019 ms. Meskipun overshoot dan undershoot lebih rendah (14,074% dan -5,541%) dibandingkan dengan LQR, nilai amplitudo yang tidak mencapai setpoint menunjukkan adanya potensi gangguan yang harus diminimalisir. Hal ini sangat penting dalam konteks K3 karena sistem yang tidak stabil dapat menyebabkan ketidakpastian dalam operasi mesin yang berpotensi membahayakan keselamatan pekerja di lingkungan industri.

## **KESIMPULAN**

Berdasarkan percobaan dan analisis yang dilakukan pada rangkaian motor DC FL57BL02 menggunakan metode LQR dan LQT, dapat disimpulkan bahwa penerapan kontrol LQR dan LQT pada motor DC memberikan hasil yang memadai untuk meningkatkan efisiensi sistem pengendalian dalam industri yang berfokus pada keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Pada percobaan LQR tanpa noise, sistem berhasil mencapai amplitudo hampir 1, menunjukkan pencapaian setpoint yang baik dengan waktu respon yang optimal. Namun, pada rangkaian LQR dengan noise, respons sistem menjadi lebih fluktuatif dan tidak stabil, dengan overshoot yang sangat tinggi, yang dapat berpotensi mengganggu operasional dalam konteks K3. Sebaliknya, pada penerapan LQT, meskipun hasilnya lebih stabil dibandingkan LQR dengan noise, waktu kenaikan yang lama menunjukkan adanya kelemahan dalam respons sistem terhadap perubahan mendadak.

Dalam konteks K3, keselamatan pekerja di lingkungan industri sangat bergantung pada kestabilan dan efisiensi sistem pengendalian mesin. Oleh karena itu, implementasi sistem pengendalian dengan pengendalian noise yang lebih baik, serta pemilihan metode kontrol yang tepat, seperti LQR dan LQT, sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi dan mencegah potensi kecelakaan kerja.

## **Daftar Pustaka**

- [1] Nugraha, AT, Pambudi, DSA, Utomo, AP, Priyambodo, D, Hari, MD and .... "Rancang Bangun Battery Charger Pada Pembangkit Listrik Portabel Energi Terbarukan Berbasis Arduino Uno R3." ID Patent EC002,022,104,299, 2022
- [2] Budi, FS, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Comparison of LQR and LQT Control of Uncertain Nonlinear Systems." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 3.1, 2025, pp. 10-17.
- [3] Hidayat, MS, Pambudi, DSA and Nugraha, AT. "Sistem Monitoring Air Compressor pada Sistem Pendistribusian Udara Berbasis IoT." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 12.2, 2022, pp. 126-140.

- [4] Nugraha, AT, Jamaludin, M, Sobhita, RA and Saputra, DE. "Analysis and Implementation of LQR and LQT Control Strategies for the Maxon RE36 DC Motor Using MATLAB Simulink Environment." SAINSTECH NUSANTARA 2.2, 2025, pp. 1-13.
- [5] Saputra, FY. "Representasi Matematis dan Simulasi Sistem Dinamik Motor DC054B-6." Conference of Electrical, Marine and Its Application 4.1, 2025
- [6] Pangestu, ND, Fathurrohman, MF, Nugraha, AT, Sukoco, D and Pambudi, DSA. "PERANCANGAN SMART PROTECTION PADA MOTOR KINCIR AERATOR TAMBAK UDANG MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY." Jurnal 7 Samudra 9.1, 2024, pp. 1-8.
- [7] Fatqurrochman, MI, Saputra, DE and Nugraha, AT. "Performance Analysis of C23-L54 Series DC Motors in K3 System Using LQR Tracking Controller for Improved Operational Efficiency and Safety." Journal of Safety, Health, and Environmental Engineering 3.2, 2025, pp. 1-9.
- [8] Haj, MI, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Performance Analysis of DC Motor in SISO Circuit Using LQR Control Method: A Comparative Evaluation of Stability and Optimization." ICCK Transactions on Power Electronics and Industrial Systems 1.1, 2025, pp. 23-30.
- [9] NUGRAHA, AT, ALFARISI, N, AZIS, A, HARDIANSYAH, MM, HARIS, GR and .... "Trainer Kit Elektronika Daya." ID Patent EC00,202,316,986, 2023
- [10] Nugraha, AT and Hidayana, E. "Object Detection of Track Using YOLO Method in Fast Unmanned Vessel Application." Jurnal Teknologi Maritim 7.1, 2024, pp. 52-62.
- [11] Lesmana, SV, Nugraha, AT, Jamaludin, M and Sobhita, RA. "Sistem Kontrol LQR dan PID pada Mesin Pengering Biji Kopi." Seminar MASTER PPNS 10.1, 2025, pp. 251-261.
- [12] Utomo, AP, Ruddianto, Cahyono, L, Nugraha, AT, Apriani, M and Nugroho, MI. "Buku Pelatihan Pembuatan Terumbu Buatan Berbasis Eco Friendly.", 2024
- [13] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "SISTEM KENDALI LQR DAN PID PADA ALAT PENERING BIJI KOPI." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 83-87.
- [14] Nugraha, A Trisna. "Setting neuro-fuzzy pid control in plant nonlinear active suspension." Journal of Physics Conference Series 1114.1, 2018, p. 12063.
- [15] Ramadhan, MF, Shiddiq, MJ and Nugraha, AT. "Perencanaan Pembangkit Listrik Energi Surya Untuk Kebutuhan Listrik Jembatan Suramadu Guna Mewujudkan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [16] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "TUNING PID UNTUK KONTROL KECEPATAN MOTOR DC." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 88-97.
- [17] Nugraha, AT, Efendi, AEAPA and Adi, P. "Uji Kelayakan Generator Sinkron dengan Metode Forward Chaining berbasis PLC dan HMI." MEDIA ELEKTRIKA 17.1, 2024, pp. 10-21.
- [18] Pambudi, DSA, Angga, ATN, Utomo, AP, Ahmad, MM, Tiwana, MZA and .... "Main Engine Water Cooling Failure Monitoring and Detection on Ships using Interface Modbus Communication." Applied Technology and Computing Science Journal 4.2, 2021, pp. 91-101.
- [19] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Setiawan, J, Rochmawati, NW, Sena, AI and .... "PERANCANGAN BUCK-BOOST CONVERTER UNTUK CHARGING BATERAI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 22-33.
- [20] Nugraha, AT, Sa'diyah, A, Indaryani, S, Shiddiq, RF Muhammad Jafar and .... "Buku Sepeda Treadmill: Inovasi dan Desain.", 2023

## BAB V

# Identifikasi Sistem Motor DC dan Pengendalian Linear Quadratic Regulator Berbasis Arduino-simulink Matlab

Oleh: Puspita Arifa Setyawati

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

### Abstrak

*This paper describes the identification process of DC function. Dengan model transfer function ini, dapat diketahui motor system with the experimental technique using identification sifat respon sistem terhadap berbagai input. Berdasarkan tool in Matlab. After the DC motor model system is obtained, the pengetahuan atas sifat sistem tersebut, dapat ditentukan optimal control technique in this case using linear quadratic tindakan atau perlakuan yang tepat agar sistem berperilaku regulator (LQR) is used to view the system response step. In this sesuai yang diinginkan. Identifikasi sistem merupakan suatu paper, the DC motor identification module with Arduino DC was pendekatan eksperimental untuk menentukan model dinamik developed to facilitate in terms of getting the model of DC motor by approaching first and second order models. This module is dari suatu sistem. integrated between Arduino and Simulink Matlab which is used Secara mendasar sebuah model dibangun dari data yang as input-output data acquisition. The results of the system diamati [2]. Identifikasi suatu sistem merupakan tugas penting identification process in the form of DC Motor model with dalam penelitian ilmiah sebagai langkah pertama dari setiap modeling auto regressive exogenous (ARX) second order. analisis sistem [3]. Namun, untuk mendapatkan model Furthermore, the application of LQR control technique with diperlukan prosedur yang tidak mudah. Terdapat dua cara parameters of Q element matrix is sought by multiplication of dalam hal memperoleh model matematis dari sebuah sistem transpose Matrix C system with Matrix C of the system. While the fisik, yaitu melalui pendekatan analisis dan eksperimen. R element matrix in tuning experimentally with value 0.000001. Ada beberapa teknik dalam hal mendapatkan model suatu From the test results obtained that LQR control produces a more optimal system response time constant when compared with PID sistem Motor DC dengan cara eksperimen. Salah satu control of 0.02 seconds. diantaranya adalah dengan cara mengamati data masukan dan keluaran dari Motor DC tersebut [4]. Namun ada juga peneliti Intisari— Makalah ini memaparkan proses identifikasi sistem yang menggunakan algoritma kecerdasan buatan seperti Motor DC dengan teknik eksperimen menggunakan sistem recurrent neural networks (RNN), metode yang digunakan indetifikasi tool pada Matlab. Setelah sistem model Motor DC dengan jaringan syaraf tiruan, dimana model dinamik Motor diperoleh, teknik kendali optimal dalam hal ini menggunakan DC diperoleh dari nilai minimum kesalahan hasil learning dari linear quadratic regulator (LQR) digunakan untuk melihat step suatu model Motor DC yang telah diketahui parameternya [5]. respon sistem. Pada penelitian ini, modul identifikasi sistem Motor Selanjutnya, penelitian pada [6] memanfaatkan tegangan balik DC dengan Arduino dikembangkan untuk memudahkan dalam pada Motor DC untuk dijadikan variabel masukan dan hal mendapatkan model Motor DC dengan cara pendekatan kecepatan putar Motor DC sebagai variabel keluaran. model orde satu dan dua. Modul ini terintegrasi antara Arduino Hubungan antara masukan dan keluaran dievaluasi dengan dengan Simulink Matlab yang digunakan sebagai akusisi data input - output. Hasil dari proses identifikasi sistem berupa model sistem identifikasi tool yang terdapat pada Matlab. Motor DC dengan pemodelan auto regressive exogenous (ARX) Motor DC bekerja secara nonlinear terutama saat terjadi orde dua. Selanjutnya penerapan teknik kendali LQR*

dengan diberi variasi beban. Pengendali konvensional, seperti PID parameter Matriks elemen  $Q$  dicari dengan cara perkalian antara controller [7–9] sangat umum digunakan karena memiliki transpose Matriks  $C$  sistem dengan Matriks  $C$  sistem tersebut. performa yang baik dalam mengendalikan sistem linear [10]. Sedangkan Matriks elemen  $R$  di tuning secara eksperimen dengan Pada [11] memaparkan sistem pengendalian motor induksi nilai 0.000001. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa kendali LQR menggunakan kontroler PID dengan metode field oriented menghasilkan konstanta waktu respon sistem lebih optimal bila control (FOC). Metode ini digunakan untuk memperbaiki dibandingkan dengan kendali PID sebesar 0.02 detik. sinyal kontrol arus torsi di dalam sistem kontroler PID. Selain itu, teknik kendali optimal telah digunakan oleh beberapa Kata Kunci— Identifikasi sistem, Motor DC , LQR. peneliti seperti menggunakan linear quadratic regulator (LQR) [12–13].

I. PENDAHULUAN  
 Pada makalah ini digunakan Motor DC dengan magnet permanen sebagai plant yang akan diidentifikasi serta Untuk mengetahui dan mempelajari suatu sifat pada sistem dikendalikan dengan dengan teknik kendali optimal LQR. diperlukan identifikasi sistem, hal ini diperoleh dengan cara Penelitian ini menggunakan identifikasi black box [14], yaitu memodelkannya secara matematika berdasarkan sifat-sifat dengan mengamati input – ouput dari suatu sistem Motor DC. komponennya [1]. Dari hasil identifikasi ini diperoleh transfer Pada penelitian ini juga dikembangkan modul identifikasi

Motor DC dengan menggunakan Arduino dan terintegrasi 1) Sistem Orde Satu dengan Simulink-Matlab. Spesifikasi respon dengan sinyal masukan step pada sistem orde satu dapat dinyatakan dalam dua macam spesifikasi yaitu: spesifikasi respon transien dan spesifikasi respons steady state. II. METODE PENELITIAN Grafik respon sistem orde satu untuk  $X_{zz} = 1$  dan  $Y_{ss} = K$  A. Metode Identifikasi disajikan pada Gambar 3. Dalam sistem kendali, identifikasi sistem pada umumnya dapat digambarkan seperti pada Gambar 1. Langkah-langkah proses identifikasi sistem terdiri atas empat tahap, yaitu [4]: a). Tersedianya data input-output plant yang akan diidentifikasi. b). Pemilihan struktur model. c). Estimasi parameter-parameter model. d). Validasi model yang telah diidentifikasi (struktur dan nilai parameter-parameternya).

Output (k) Plant

(k) Gambar 3. Respon orde satu terhadap masukan units step.  $X(k)$  2) Sistem Orde Dua  
 Sistem  $y_m(k)$  Persamaan umum sistem orde dua dinyatakan dalam Persamaan (1).

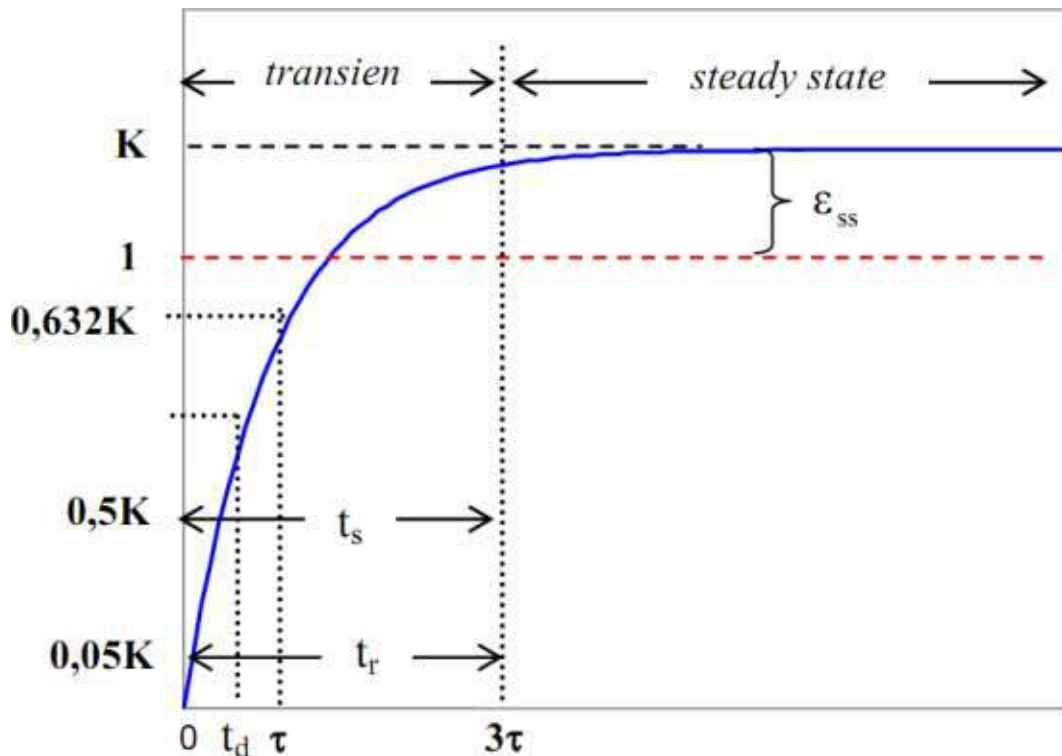
Gambar 1. Blok diagram proses identifikasi suatu sistem.

Pada penelitian ini proses identifikasi motor DC dilakukan Dimana,  $K$  adalah gain overall,  $\xi$  adalah rasio redaman dan  $\omega$  secara open loop melalui Arduino dan personal computer (PC) adalah frekuensi alami. Bentuk umum kurva respon orde dua dengan terhubung Simulink-Matlab. Metode yang digunakan untuk masukan sinyal unit step ditunjukkan oleh Gambar 4. untuk identifikasi adalah metode identifikasi statis. Identifikasi statis salah satu yang paling banyak digunakan adalah dengan metode open loop dengan masukkan step C. Model Matematis Motor DC seperti yang disajikan pada Gambar 2.

Pengaturan kecepatan pada Motor DC dengan penguatan medan dengan menggunakan magnet permanen ini dapat dilakukan dengan mengatur tegangan pada kumparan jangkar [17]. Karena medan magnet yang dihasilkan berasal dari magnet permanen maka kuat medan magnet tersebut bernilai Gambar 2. Diagram blok identifikasi plant dengan metode open loop tetap. Skema rangkaian Motor DC dapat dilihat pada Gambar 5. B. Karakteristik Sistem Karakteristik sistem merupakan ciri khusus perilaku dinamik suatu sistem atau dinamakan dengan istilah spesifikasi performansi sistem. Tanggapan (respon) keluaran sistem muncul akibat diberikannya suatu sinyal masukan atau setelah diberi sinyal uji. Berdasarkan karakteristik respon sistem dapat diklasifikasikan menjadi karakteristik respon waktu (time respons) dan karakteristik respon frekuensi (frequency respons). Lebih jauh, pada penelitian ini diamati karakteristik respon waktu dari Motor DC. Tujuan dari pengamatan karakteristik respon waktu ialah untuk mengamati bentuk respon keluaran sistem terhadap berubahnya waktu. Secara umum spesifikasi performansi respon waktu dapat dibagi atas dua tahapan pengamatan, yaitu spesifikasi respon transien dan respon steady state. Lebih jauh, pengamatan karakteristik suatu sistem dapat didekati pada sistem orde satu dan orde dua.



Gambar 5.1



Gambar 5.2 Diagram blok dari persamaan model Motor DC.  $\Omega(s)$  III. IDENTIFIKASI SISTEM MOTOR DC

Gambar 5. Diagram skematik Motor DC. Untuk keperluan identifikasi model motor DC berdasarkan analitik maka transfer function sistem diperoleh seperti yang Gambar 7. Diagram blok LQR. diuraikan pada Gambar 6. Dalam mencari nilai gain state feedback (K), pada Matlab bisa dilakukan langsung dengan sintaks: “[K,S,E]=lqr(A,B,Q,R)”. Dengan K adalah gain state feedback, S adalah solusi persamaan Riccati dan E adalah closed-loop eigenvalue.

Fungsi alih loop tertutup dapat diperoleh dari  $E_a(s)$ . Perancangan Sistem Akuisisi Data Persamaan (2). Penelitian ini merancang sistem modul mikrontroller KTM berbasis Arduino sebagai data akuisisi dan data proses yang  $\Omega(s) = \frac{K_g}{Ls + R} \frac{1}{Js + B}$  dijelaskan pada Gambar 8.

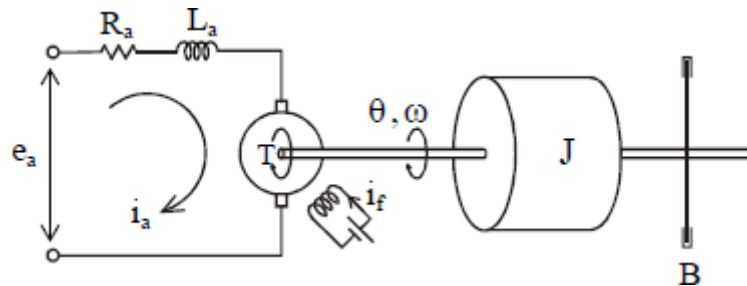
$$E_a(s) \text{ KTM.Kg.s} + (Ls + Ra)(Js + B) \Omega(s) \text{ KTM} =$$

$$E_a(s) (Ls + Ra)(Js + B) + (KTM.Kg) \Omega(s) \text{ KTM} = E_a(s) J Ls + (B Ls + J Ra)s + (Ra B + KTM Kg)$$

Secara umum nilai induktansi dari kumparan jangkar motor  $L_a$  sangatlah kecil sehingga nilainya dapat diabaikan, sehingga Persamaan (2) menjadi Persamaan (3). Gambar 8. Diagram blok rancangan sistem akuisisi data dengan Arduino.

$\Omega(s) KTM = (3)$  Setelah proses identifikasi model motor DC diperoleh,  $E_a(s) (J Ra)s + Ra B + KTM Kg$  tahapan selanjutnya adalah sistem kendali kecepatan motor DC yang digambarkan dalam diagram blok pada Gambar 9. D. Kendali Optimal Linear Quadratic Regulator (LQR) LQR adalah sebuah kendali optimal yang bertujuan membawa state akhir ke titik nol dengan meminimalkan cost function. Jenis kendali ini bertujuan mencari nilai gain state feedback (K) [16]. Misalkan sebuah plant mempunyai bentuk state space pada Persamaan (4). Gambar 9. Diagram loop tertutup kendali kecepatan Motor DC.

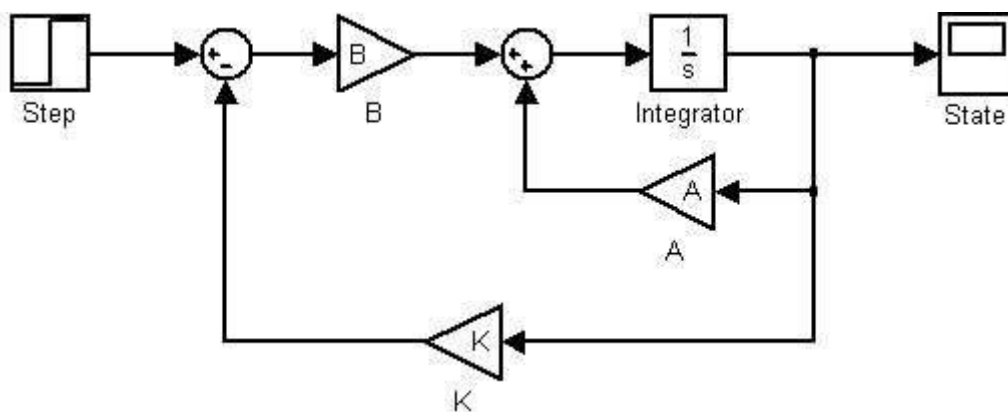
$$\dot{x} = Ax + Bu \quad y = Cx$$



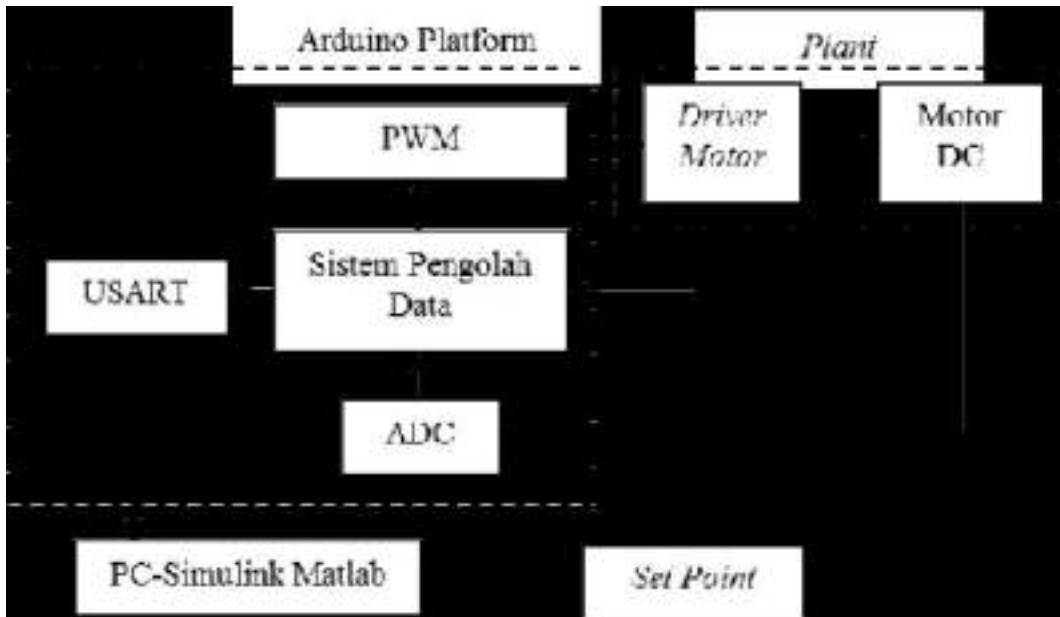
Gambar 5.3



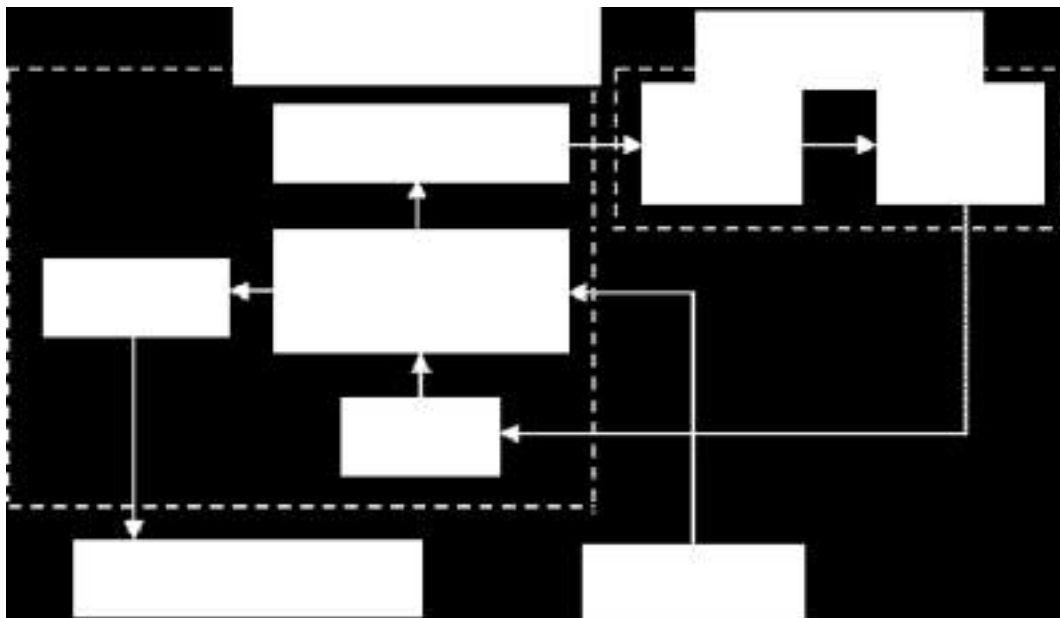
Gambar 5.4



Gambar 5.5



Gambar 5.6



Gambar 5.7 Blok Simulink untuk akuisisi data.

dengan indeks performansi pada Persamaan (5). (4) B. System Identification (SID) pada Matlab T System Identification (SID) merupakan tool tambahan dari  $\square 1 J= \{x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)\}dt$  perangkat lunak Matlab (Mathworks Inc.). SID dapat 2 digunakan sebagai sarana identifikasi yang dijelaskan pada t0 (5) Gambar 10, simulasi dan analisis dari sistem dinamik dengan menggunakan graphical user interface (GUI).

Gambar 10. System identification tool pada Matlab.

Pada penelitian ini, telah berhasil mewujudkan sebuah modul identifikasi dan kendali Motor DC berbasis Arduino (Gambar 11). Modul ini dapat terintegrasi dengan Simulink.

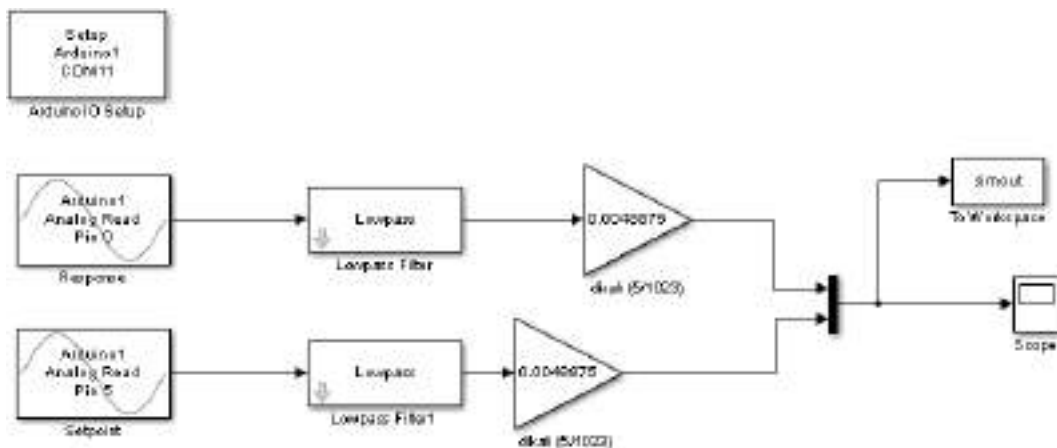
Dengan capaian ini, peneliti dapat melakukan proses identifikasi sistem Motor DC dan data identifikasi ini seterusnya akan digunakan sebagai acuan model matematis dari Motor DC. Gambar 12 menjelaskan blok Simulink untuk akuisisi data, Gambar 13 menjelaskan identifikasi sistem Motor DC dengan toolbox dan Gambar 13. Identifikasi sistem dengan SID. Gambar 14 menjelaskan proses verifikasi dan validasi transfer function dengan respon plant. Berikut Tabel 1 hasil identifikasi dengan pendekatan dua tipe pendekatan. TABEL 1. HASIL PENDEKATAN MODEL MOTOR DC.

0.4748 Pendekatan orde 1  $s + 1.989 \ 9.359$  Pendekatan orde 2  $s + 21.36s + 39.21 \ 2$

Gambar 14. Verifikasi dan validasi transfer function dengan respon plant.

IV. KENDALI OPTIMAL LQR PADA SISTEM MOTOR DC Sebelum menggunakan kendali optimal LQR maka terlebih dahulu menganalisis open loop sistem dalam bentuk transfer function lalu diubah kedalam model state space. Berikut ini pengujian dan pembahasan hasil identifikasi Motor DC dengan dua tipe pendekatan, yaitu orde satu dan orde dua. Dengan memberikan sinyal masukan step terlihat pada Gambar 15 dan Gambar 16 bahwa hasil pendekatan orde satu dan orde dua tidak jauh berbeda. Gambar 11. Perangkat modul identifikasi dan kendali Motor DC berbasis Arduino terintegrasi dengan Simulink.

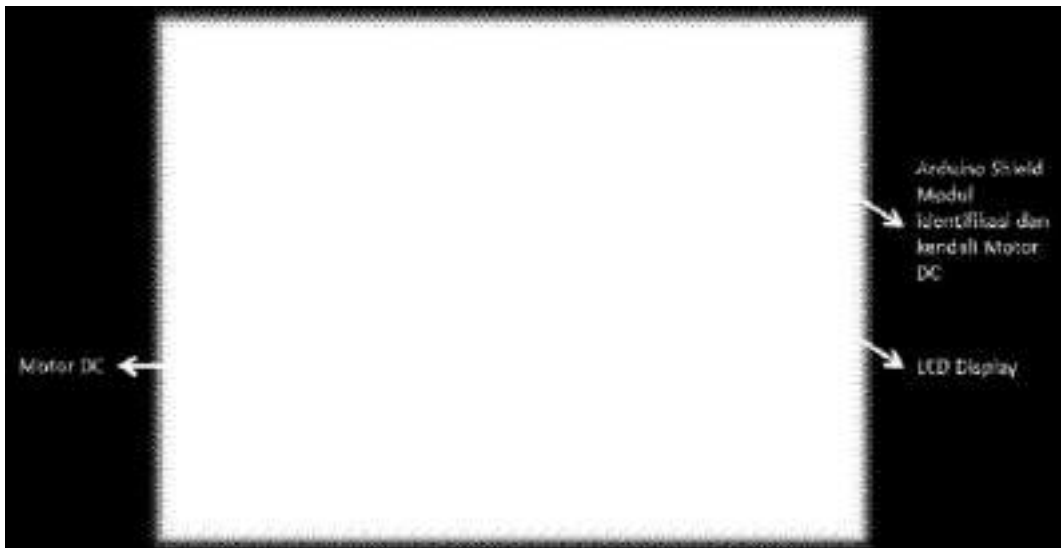
Gambar 15. Simulink respon sinyal step pada sistem orde satu dan orde dua.



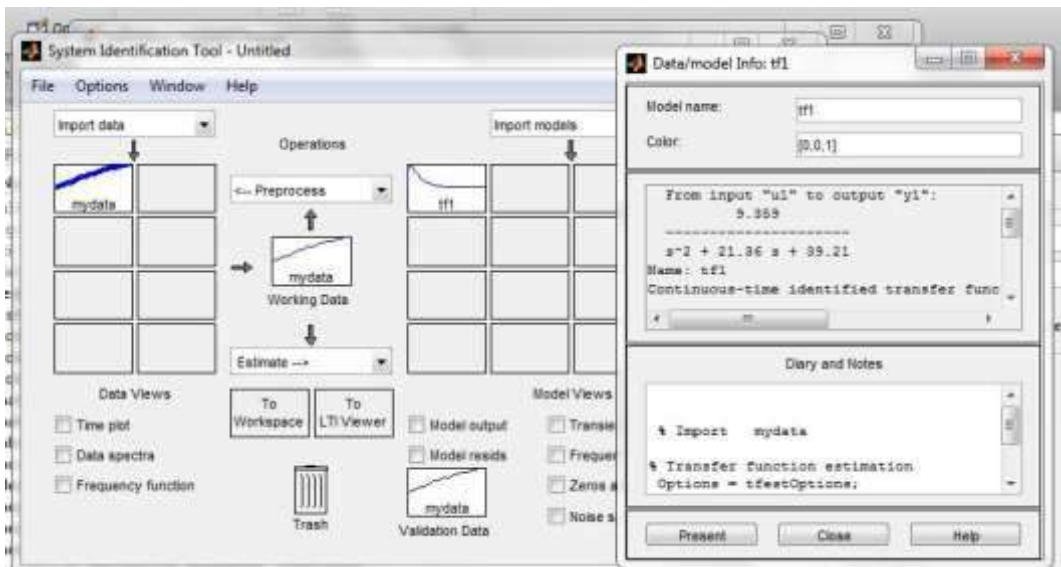
Gambar 5.8



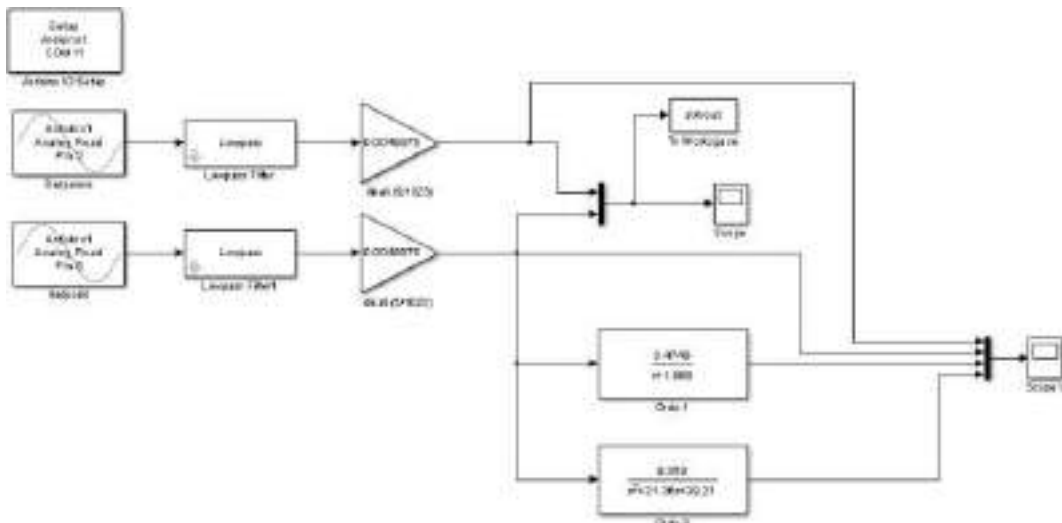
Gambar 5.9



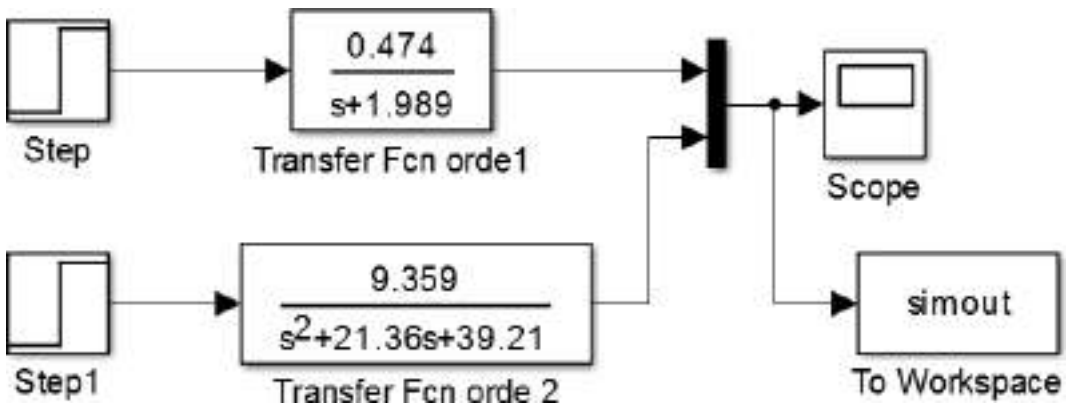
Gambar 5.10



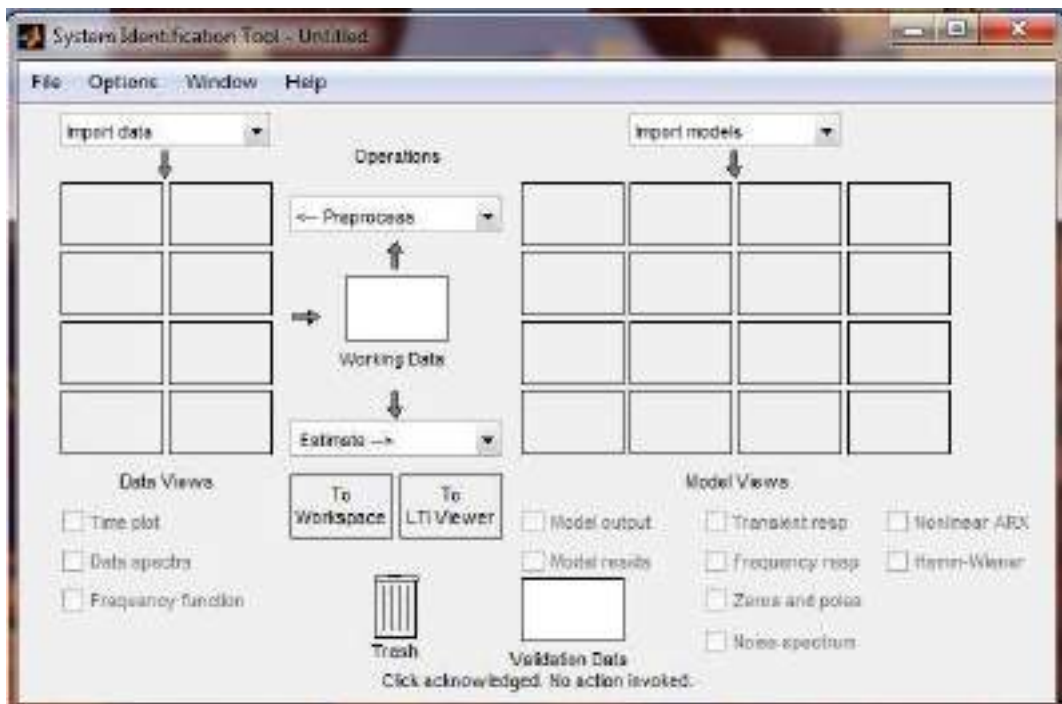
Gambar 5.11



Gambar 5.12



Gambar 5.13



Gambar 5.14

Perbedaan tanggapan respon sistem pendekatan orde 1 dan orde 2 0.25

0.2 Respon sinyal Step

0.15

0.1

0.05

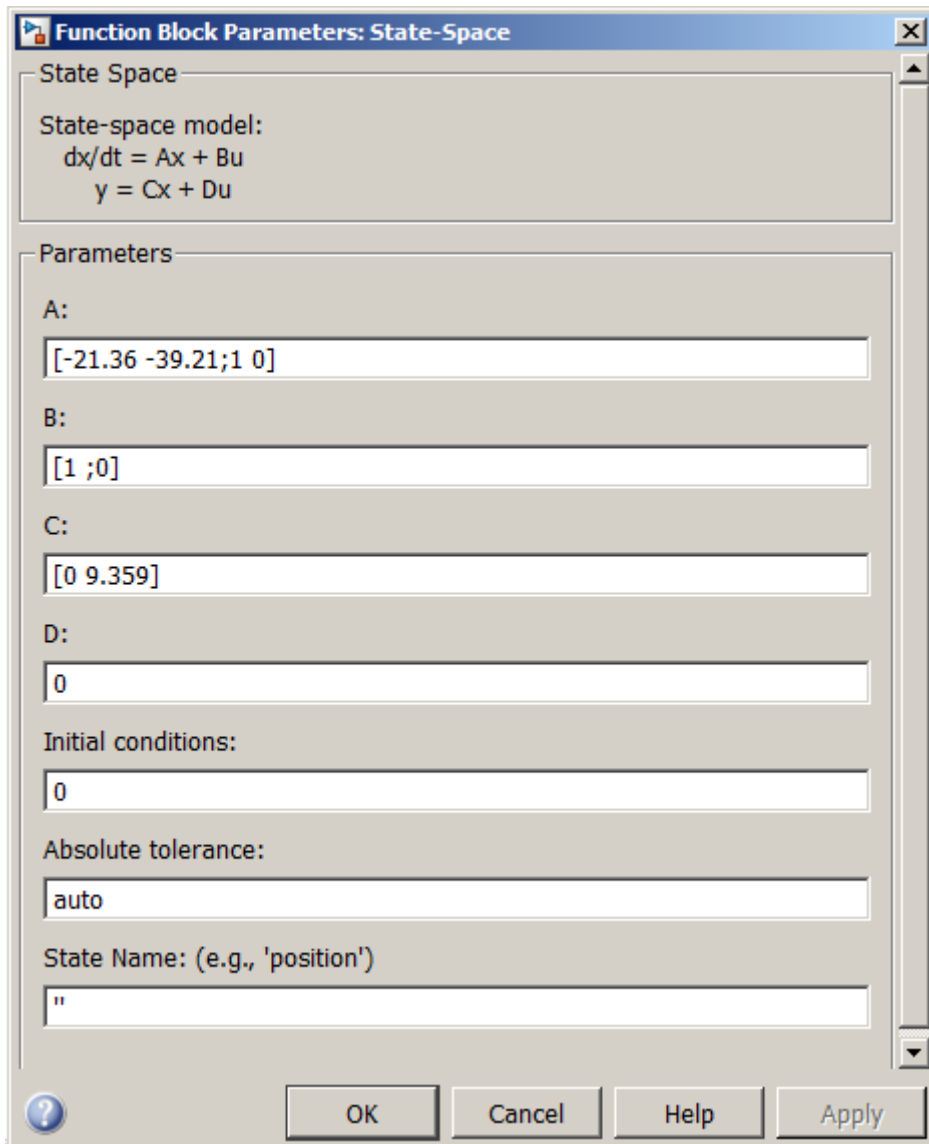
0 0 10 20 30 40 50 60 70 Sampling Time

Gambar 16. Perbedaan tanggapan respon sistem pendekatan orde 1 dan orde 2.

Langkah selanjutnya dengan menggunakan Matlab, mengubah model dari bentuk transfer function kedalam bentuk state space dengan menggunakan perintah “[A,B,C,D] = tf2ss(num,den)”. Hasil dari konversi ke dalam bentuk state space di jelaskan pada Tabel 2.

Gambar 17. Simulink blok pemodelan dalam bentuk state space. TABEL 2. HASIL DARI KONVERSI KEDALAM BENTUK STATE SPACE. Transfer function model Model dalam bentuk pendekatan Motor DC State Space Selanjutnya dilakukan analisis dengan memeriksa  $A = -1.989$  controllability dan observability yang dijelaskan pada Tabel 3.  $0.474$  Controllability adalah suatu pemeriksaan dimana suatu sistem  $B=1 s + 1.989$  dikatakan terkendali apabila jika Matriks elemen controllability  $C = 0.4780$  (ctr) yang dijelaskan pada Persamaan (6) yang berukuran  $n \times n$  Pendekatan orde 1  $D=0$  memiliki rank dengan nilai  $n$ . Atau jika determinan dari  $\begin{vmatrix} s - 21.36 & -39.21 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}$  Matriks controllability adalah tidak nol [18].  $A = \begin{bmatrix} -1.989 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  ctr =  $B \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$  ...  $A \ B \ (6) \ \begin{bmatrix} s^2 + 21.36s + 39.21 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$   $B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  Dan observability adalah ukuran seberapa baik keadaan  $C = \begin{bmatrix} 0 & 0.4780 \end{bmatrix}$  internal suatu sistem dapat disimpulkan dari pengetahuan Pendekatan orde 2  $D=0$  tentang output eksternalnya. Matriks elemen observability (obsr) dijelaskan pada Persamaan (7).  $T \ \text{obsr} = \begin{bmatrix} C & AC & \dots & A^{n-1}C \end{bmatrix} \ (7) \ \begin{bmatrix} 0 & 0.4780 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$

Simulink blok pemodelan dalam bentuk state space sistem Dengan menggunakan perintah pada Matlab, controllability disajikan pada Gambar 17 yang mengacu pada Tabel 2. dan observability dapat diperoleh dengan perintah berikut,  $\text{rank}(\text{ctrb}(A,B))$  dan  $\text{rank}(\text{obsv}(A,C))$ . Bila telah memenuhi syarat maka dilanjutkan dengan memberi nilai Matriks Q dan R untuk mendapatkan elemen Matriks K dengan menggunakan LQR. TABEL 3. RANK CONTROLLABILITY DAN OBSERVABILITY DARI MODEL SISTEM. Model pendekatan Motor DC Controllability Observability



Gambar 5.15

$$A = -1.989 \quad B = 1 \quad C = 0.4780 \quad D = 0$$

```

Pendekatan orde 1 %konversi kedalam model state space
num2 = [-21.36 -39.21]; den2 = [1 0];
[A,B,C,D] = tf2ss(num2,den2);
modelMotor=ss(A,B,C,D);
modelMotor=tf(modelMotor)
B = 1
R=0.000001; C = [0 9.359]
Q=transpose(C)*C; D=0 %mencari element Matriks K
dengan LQR Pendekatan orde 2 K=lqr(A,B,Q,R)

```

$sys=ss(A,B,C,D)$ ;  $Af=A-B*K$ ; Dari hasil rank controllability dan observability disimpulkan  $T=ss(Af,B,C,D)$ ; bahwa sistem dapat dikendalikan dan teramati. Maka  $T=tf(T)$  selanjutnya mencari elemen Matriks K dengan LQR. Elemen Matriks K ini dapat diperoleh dengan menjalankan perintah %step respons sistem setelah umpan balik berikut pada Matlab “[K,S,E]=lqr(A,B,Q,R)” dimana Matriks K dengan LQR S adalah solusi persamaan Riccati

dan E adalah closed-loop figure(3) step(T) eigenvalue. Dari hasil perintah tersebut, diperoleh Matriks elemen K pada masing-masing model dijelaskan pada Tabel 4. Percobaan pertama dengan memberikan nilai Matriks elemen  $Q = \text{transpose}(C)*C$  dan  $R = 0.000001$ . 0.25 Step Response

TABEL 4. MATRIKS ELEMEN K PADA MASING-MASING MODEL DENGAN LQR. 0.2

Model dalam bentuk State Space Matriks elemen K dengan teknik LQR  $A = -1.989 \ 0.15$   
Amplitude

$$B=1 \ K = 472.0152 \ C = 0.4780 \ 0.1$$

$$D=0 \ \begin{bmatrix} -21.36 & -39.21 \end{bmatrix} \ A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.05 \end{bmatrix}$$

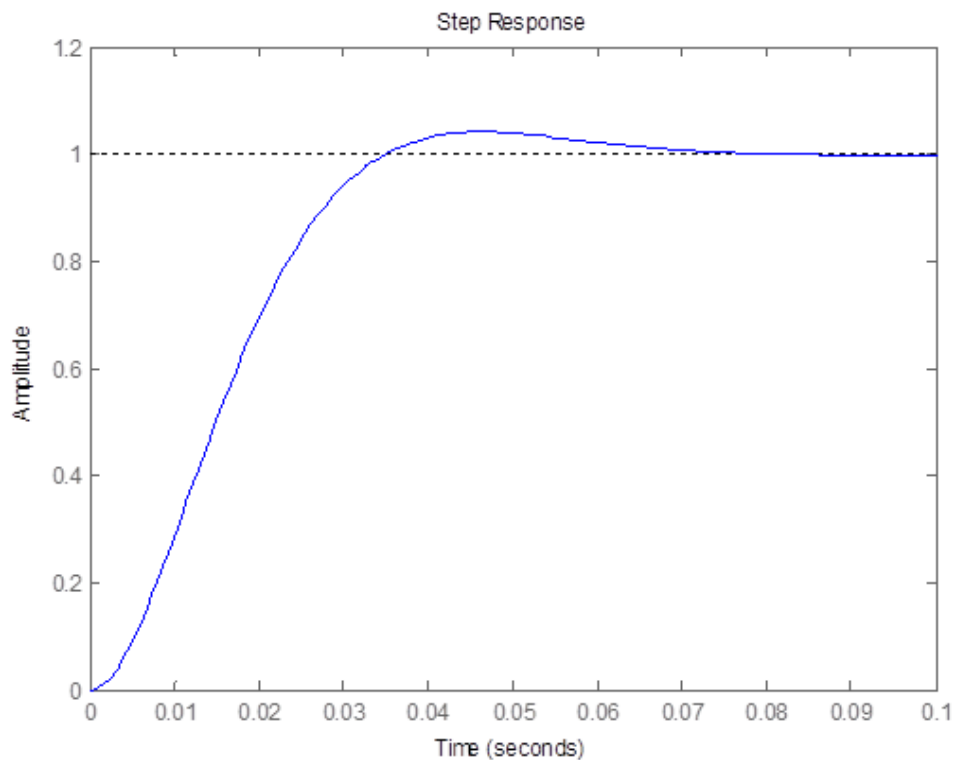
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$   $B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$   $C = \begin{bmatrix} 116.8 & 0 \end{bmatrix}$   $K = \begin{bmatrix} 0 & 0.5 \\ 1 & 1.5 \\ 2 & 2.5 \\ 3 & 0 \end{bmatrix}$   $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$   $\begin{bmatrix} 9319.9 \\ 0 \end{bmatrix}$  Time (seconds)

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 9.359 \end{bmatrix}$$

Gambar 18. Step respon sistem Motor DC pendekatan orde dua.  $D=0$   
Berikut Tabel 5 adalah listing program pada m-file Matlab untuk mencari elemen Matriks K pada pendekatan model orde dua dengan menggunakan LQR. Model motor DC orde dua ini telah di validasi seperti yang disajikan pada Tabel 1. Gambar 18 dan Gambar 19 adalah grafik respon sistem hasil dari plotting perintah m-file Matlab pada Tabel 5. TABEL 5. LISTING PROGRAM PADA M-FILE MATLAB UNTUK MENCARI ELEMEN MATRIKS K DENGAN TEKNIK LQR.

```
%transfer function sistem pendekatan orde dua num2 = 9.359; den2= [1 21.36 39.21];
G=tf(num2,den2)
```

%step respons sistem pendekatan orde dua figure(1) Gambar 19. Step respon sistem Motor DC pendekatan orde dua setelah umpan step(G) balik Matriks K dengan LQR.



*Gambar 5.16*

UCAPAN TERIMA KASIH Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Elektro dan Informatika Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada atas dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

### **Daftar Pustaka**

- [1] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Riyadi, F, Sheila, SY, Pramudika, AES and .... "DESAIN DAN SIMULASI BUCK-BOOST CONVERTER MENGGUNAKAN PSIM PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 68-77.
- [2] Hati, IJP, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Pemodelan dan Simulasi Dinamik Motor DC Brushless BN23HS-28HS-02 dan Motor AC Satu Fasa SIMTACH AC040M-08J30A Berbasis MATLAB/Simulink." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 4.1, 2025
- [3] Sunarno, E, Prasetyono, E, Anggriawan, DO, Nugroho, MAB, Eviningsih, RP and .... "Development of TCR-FC Reactive Power Compensation Device with Fuzzy Logic Control in Electric Power Networks." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2024
- [4] Nugraha, A Trisna. "Setting neuro-fuzzy pid control in plant nonlinear active suspension." *Journal of Physics Conference Series* 1114.1, 2018, p. 12063.
- [5] Nugraha, AT. "Buku Konsep Dasar Elektronika Industri: Prinsip Dan Aplikasi Listrik Dasar Elektromagnetik Serta Transformator.", 2024
- [6] Nugraha, AT, Ashlah, MB, Sobhita, RA and Anjhani, DAJ. "Optimization Control in MG-16 DC Motor Using LQR and LQT Configurations." *SAINSTECH NUSANTARA* 2.3, 2025, pp. 57-66.

- [7] Zakariz, NP, Nugraha, AT and Phasinam, K. "The Effect of Inlet Notch Variations in Pico-hydro Power Plants with Experimental Methods to Obtain Optimal Turbine Speed." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2022
- [8] Fauzi, AR, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Permodelan Matematis Orde Satu dan Orde Dua Motor DC Maxon RE 50 Berdasarkan Step Response." *Conference of Electrical, Marine and Its Application 4.1*, 2025
- [9] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "Water Purification Technology Implementation Design." *JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...)*, 2020
- [10] Nugraha, AT. "Desain kontrol path following quadcopter dengan command generator tracker model following." *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2017
- [11] Nugraha, AT. "DISTURBANCE REJECTION BERBASIS LOS SAAT TRACKING PADA JALUR LINGKARAN MENGGUNAKAN QUADCOPTER." *Prosiding SENIATI 4.1*, 2018, pp. 50-56.
- [12] Safitri, LN. "PROTOTIPE PTO (POWER TAKE-OFF) GENERATOR DENGAN MENGATUR KECEPATAN MOTOR 3 PHASE UNTUK MEMENUHI KEBUTUHAN LISTRIK DI KAPAL." *Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*, 2021
- [13] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "IMPLEMENTASI SINGLE PHASE FULL WAVE CONTROLLED RECTIFIER PADA MOTOR DC." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1*, 2022, pp. 3-9.
- [14] Ihsanudin, Y, Hidayat, EP and Nugraha, AT. "Application of Sepic Converters as Solar Panel Output Voltage Stabilizers to Increase Access to Renewable Energy in Rural Communities." *Maritime in Community Service and Empowerment 2.1*, 2024, pp. 40-45.
- [15] Angga, ATN, Ravi, AM, Priyambodo, D, Realdo, AM, Ivanuri, F, Safitri, LN and .... "Use of ACS 712ELC-5A current sensor on overloaded load installation safety system." *Applied Technology and Computing Science Journal 4.1*, 2021, pp. 47-55.
- [16] Nugraha, AT. "PEMODELAN DAN SIMULASI OPEN LOOP SERTA CLOSE LOOP MOTOR DC TYPE 18105 ORDE 2." *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) 10.1*, 2024
- [17] Azam, MRI, Setiyoko, AS and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Mini Weather Station dengan Penerapan Panel Surya sebagai Sumber Energi Berbasis Mikrokontroler." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 11.2*, 2021, pp. 67-77.
- [18] Pradana, RBP, Widiarti, Y and Nugraha, AT. "Implementasi Komunikasi LoRa RFM95 untuk Pengiriman Data Tegangan dan Arus pada Panel Shore Connection." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 10.2*, 2020, pp. 45-51.
- [19] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Analysis of Determining Target Accuracy of Rocket Launchers on Xbee-Pro based Wheeled Robots to Realize the Development of Technology on the Military Field." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2020
- [20] Nugraha, AT, Widodo, HA, Pambudi, DSA, Cahyono, L, Apriani, M and .... "Buku "Portable-2WG" Inovasi Turbin Pembangkit Listrik Portable Air dan Angin untuk Kebutuhan Rumah Tangga Pada Penduduk Daerah Aliran Sungai.", 2022

## BAB VI

### Identifikasi Sistem Motor DC dan Pengendalian Linear Quadratic Regulator Berbasis Arduino-simulink Matlab

Oleh: **Riezandini Rakis Putri**

*Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*

Intisari— Makalah ini memaparkan proses identifikasi sistem Motor DC dengan teknik eksperimen menggunakan sistem indentifikasi tool pada Matlab. Setelah sistem model Motor DC diperoleh, teknik kendali optimal dalam hal ini menggunakan linear quadratic regulator (LQR) digunakan untuk melihat step respon sistem. Pada penelitian ini, modul identifikasi sistem Motor DC dengan Arduino dikembangkan untuk memudahkan dalam hal mendapatkan model Motor DC dengan cara pendekatan model orde satu dan dua. Modul ini terintegrasi antara Arduino dengan Simulink Matlab yang digunakan sebagai akusisi data input - output. Hasil dari proses identifikasi sistem berupa model Motor DC dengan pemodelan auto regressive exogenous (ARX) orde dua. Selanjutnya penerapan teknik kendali LQR dengan parameter Matriks elemen Q dicari dengan cara perkalian antara transpose Matriks C sistem dengan Matriks C sistem tersebut. Sedangkan Matriks elemen R di tuning secara eksperimen dengan nilai 0.000001. Dari hasil pengujian diperoleh bahwa kendali LQR menghasilkan konstanta waktu respon sistem lebih optimal bila dibandingkan dengan kendali PID sebesar 0.02 detik.

ABSTRACT Abstract— This paper describes the identification process of DC motor system with the experimental technique using indetification tool in Matlab. After the DC motor model system is obtained, the optimal control technique in this case using linear quadratic regulator (LQR) is used to view the system response step. In this paper, the DC motor identification module with Arduino DC was developed to facilitate in terms of getting the model of DC motor by approaching first and second order models. This module is integrated between Arduino and Simulink Matlab which is used as input-output data acquisition. The results of the system identification process in the form of DC Motor model with modeling auto regressive exogenous (ARX) second order. Furthermore, the application of LQR control technique with parameters of Q element matrix is sought by multiplication of transpose Matrix C system with Matrix C of the system. While the R element matrix in tuning experimentally with value 0.000001. From the test results obtained that LQR control

produces a more optimal system response time constant when compared with PID control of 0.02 seconds.

1. PENDAHULUAN pada Motor DC untuk dijadikan 1.1 Latar Belakang variabel masukan dan kecepatan putar Untuk mengetahui dan Motor DC sebagai variabel keluaran. mempelajari suatu sifat pada sistem Hubungan antara masukan dan diperlukan identifikasi sistem, hal ini keluaran dievaluasi dengan sistem diperoleh dengan cara identifikasi tool yang terdapat pada memodelkannya secara matematika Matlab. berdasarkan sifat-sifat komponennya. Motor DC bekerja secara nonlinear Dari hasil identifikasi ini diperoleh terutama saat terjadi diberi variasi transfer function. Dengan model beban. Pengendali konvensional, transfer function ini, dapat diketahui seperti PID controller sangat umum sifat respon sistem terhadap berbagai digunakan karena memiliki performa input. Berdasarkan pengetahuan atas yang baik dalam mengendalikan sifat sistem tersebut, dapat ditentukan sistem linear. Pada memaparkan tindakan atau perlakuan yang tepat sistem pengendalian motor induksi agar sistem berperilaku sesuai yang menggunakan kontroler PID dengan diinginkan. Identifikasi sistem metode field oriented control (FOC). merupakan suatu pendekatan Metode ini digunakan untuk eksperimental untuk menentukan memperbaiki sinyal kontrol arus torsi model dinamik dari suatu sistem. di dalam sistem kontroler PID. Selain Secara mendasar sebuah model itu, teknik kendali optimal telah dibangun dari data yang diamati. digunakan oleh beberapa peneliti Identifikasi suatu sistem merupakan seperti menggunakan linear quadratic tugas penting dalam penelitian ilmiah regulator (LQR). sebagai langkah pertama dari setiap Pada makalah ini digunakan Motor analisis sistem. Namun, untuk DC dengan magnet permanen sebagai mendapatkan model diperlukan plant yang akan diidentifikasi serta prosedur yang tidak mudah. Terdapat dikendalikan dengan dengan teknik dua cara dalam hal memperoleh kendali optimal LQR. Penelitian ini model matematis dari sebuah sistem menggunakan identifikasi black box fisik, yaitu melalui pendekatan [14], yaitu dengan mengamati input – analisis dan eksperimen. output dari suatu sistem Motor DC. Ada beberapa teknik dalam hal Pada penelitian ini juga mendapatkan model suatu sistem dikembangkan modul identifikasi Motor DC dengan cara eksperimen. Motor DC dengan Salah satu diantaranya adalah dengan menggunakan Arduino dan cara mengamati data masukan dan terintegrasi dengan Simulink-Matlab. keluaran dari Motor DC tersebut. Namun ada juga peneliti yang menggunakan algoritma kecerdasan 1.2 Metode Penelitian buatan seperti recurrent neural A. Metode Identifikasi networks (RNN), metode yang Dalam sistem kendali, identifikasi digunakan dengan jaringan syaraf sistem pada umumnya dapat tiruan, dimana model dinamik Motor digambarkan seperti pada Gambar 1.

DC diperoleh dari nilai minimum Langkah-langkah proses identifikasi kesalahan hasil learning dari suatu sistem terdiri atas empat tahap, yaitu : model Motor DC yang telah diketahui a. Tersedianya data input-output plant parameteranya. Selanjutnya, penelitian yang akan diidentifikasi. pada memanfaatkan tegangan balik b. Pemilihan struktur model.

c. Estimasi parameter-parameter karakteristik respon waktu dari Motor model. DC. Tujuan dari pengamatan d. Validasi model yang telah karakteristik respon waktu ialah untuk diidentifikasi (struktur dan nilai mengamati bentuk respon keluaran parameter-parameteranya). sistem terhadap berubahnya waktu. Secara umum spesifikasi performansi Plant respon waktu dapat dibagi atas dua tahapan pengamatan, yaitu spesifikasi  $X(k)$  respon transien dan respon steady state. Lebih jauh, pengamatan karakteristik Sistem suatu sistem dapat didekati pada sistem  $ym(k)$  orde satu dan orde dua.

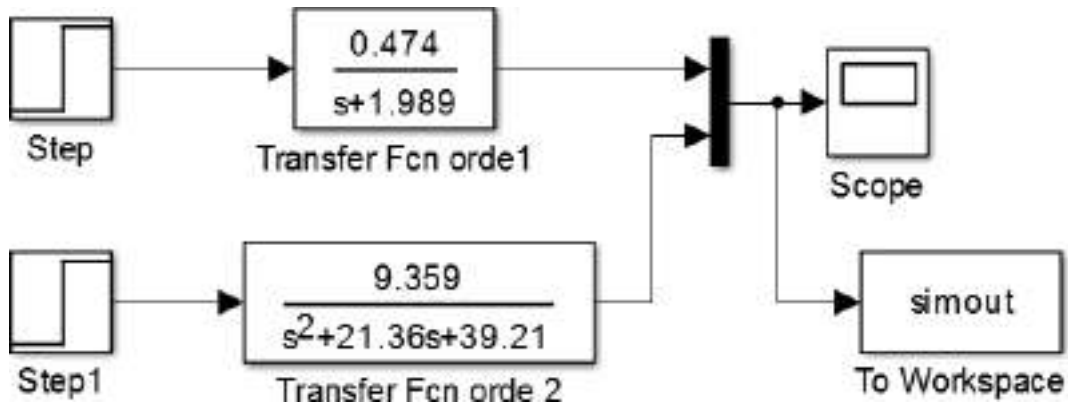
2. PEMBAHASAN Gambar 1. Blok diagram proses identifikasi suatu sistem. 2.1 KENDALI OPTIMAL LQR PADA SISTEM MOTOR DC Sebelum menggunakan Pada penelitian ini proses kendali optimal LQR maka terlebih identifikasi motor DC dilakukan secara dahulu menganalisis open loop sistem open loop melalui Arduino dan dalam bentuk transfer function lalu personal computer (PC) dengan diubah kedalam model state space. terhubung Simulink-Matlab. Metode Berikut ini pengujian dan yang digunakan untuk identifikasi pembahasan hasil identifikasi Motor adalah metode identifikasi statis. DC dengan dua tipe pendekatan, yaitu Identifikasi statis salah satu yang paling orde satu dan orde dua. Dengan banyak digunakan adalah dengan memberikan sinyal masukan step metode open loop dengan masukkan terlihat pada Gambar bahwa hasil step seperti yang disajikan pada Gambar pendekatan orde satu dan orde dua 2. tidak jauh berbeda.

Gambar 2. Diagram blok identifikasi plant dengan metode open loop

B. Karakteristik Sistem Karakteristik sistem merupakan ciri khusus perilaku dinamik suatu sistem atau dinamakan dengan istilah Gambar 15. Simulink respon sinyal step spesifikasi performansi sistem. pada sistem orde satu dan orde dua. Tanggapan (respon) keluaran sistem muncul akibat diberikannya suatu sinyal masukan atau setelah diberi sinyal uji. Berdasarkan karakteristik respon sistem dapat diklasifikasikan menjadi karakteristik respon waktu (time respons) dan karakteristik respon frekuensi (frequency respons). Lebih jauh, pada penelitian ini diamati 232



Gambar 6.1



Gambar 6.2

Langkah selanjutnya dengan menggunakan Step Response Matlab, mengubah model dari bentuk transfer function kedalam bentuk state space dengan menggunakan perintah “[A,B,C,D] = tf2ss(num,den)”.

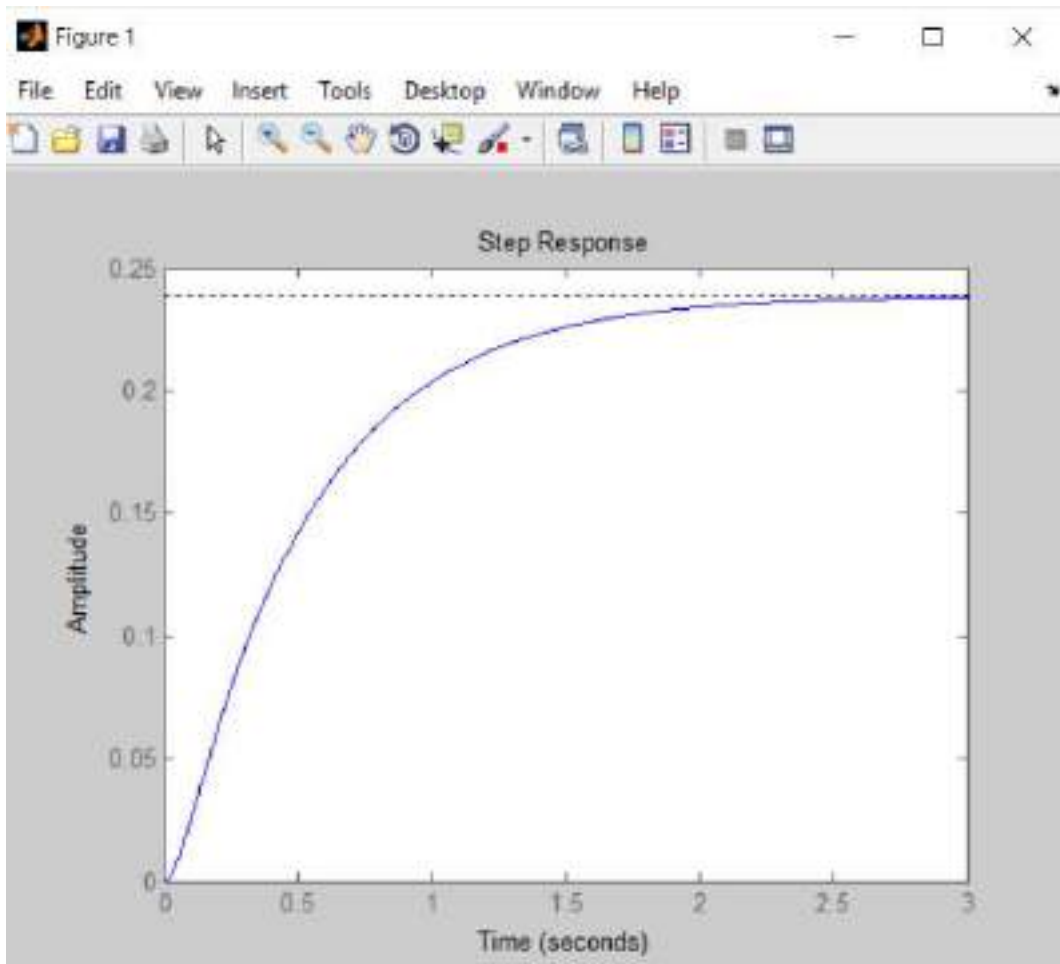
Berikut Tabel 5 adalah listing program pada m-file Matlab untuk mencari elemen Matriks K pada pendekatan model orde dua dengan menggunakan LQR. Model motor DC orde dua ini telah di validasi seperti yang disajikan pada Tabel 1. Gambar 18 dan Gambar 19 adalah grafik respon sistem hasil dari ploting perintah m-file Matlab pada Tabel 5.

TABEL 5. LISTING PROGRAM PADA Gambar 18. Step respon sistem Motor DC M-FILE MATLAB UNTUK MENCARI pendekatan orde dua. ELEMEN MATRIKS K DENGAN TEKNIK LQR. Step Response %transfer function sistem pendekatan orde dua num2 = 9.359; den2= [1 21.36 39.21]; G=tf(num2,den2) . %step respons sistem pendekatan orde dua figure(1) step(G)

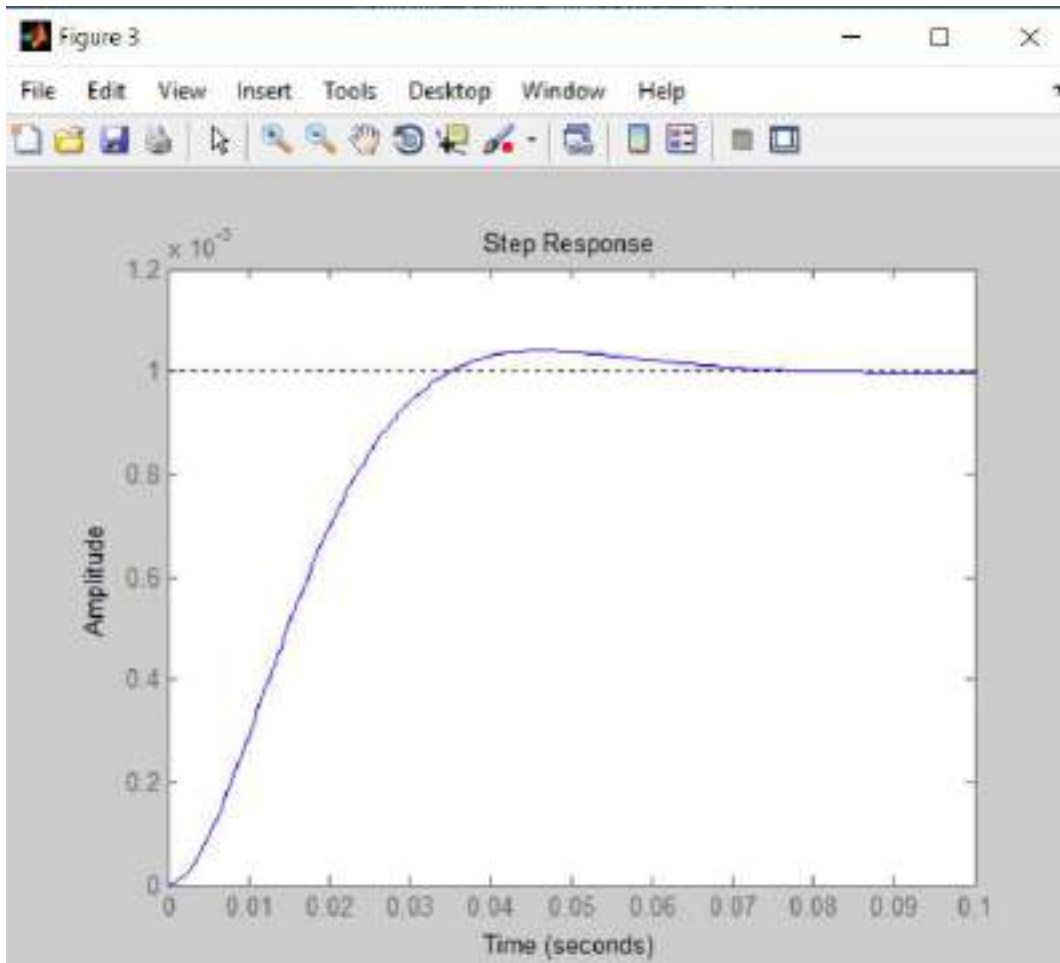
```
%konversi kedalam model state space [A,B,C,D] = tf2ss(num2,den2);
modelMotor=ss(A,B,C,D); modelMotor=tf(modelMotor)
```

```
%pembobotan Matriks Q dan R R=0.000001; Q=transpose(C)*C; Gambar 19. Step
respon sistem Motor DC %mencari element Matriks K dengan LQR pendekatan orde dua
setelah umpan balik K=lqr(A,B,Q,R) Matriks K dengan LQR. sys=ss(A,B,C,D); Af=A-
B*K; T=ss(Af,B,C,D); T=tf(T)
```

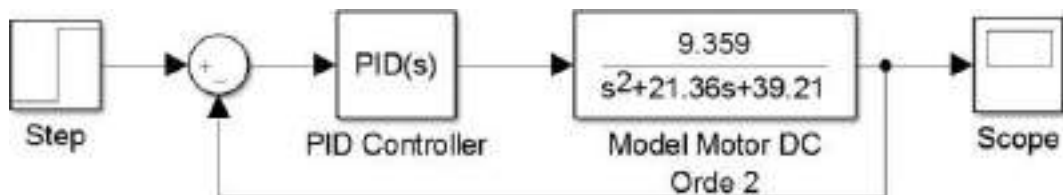
%step respons sistem setelah umpan balik Matriks K dengan LQR figure(3) Dari hasil respon sinyal dapat diperhatikan step(T) bahwa pada Gambar 18 adalah step respon sistem pendekatan orde dua tanpa umpan balik atau dalam kondisi open loop. Saat diberi sinyal masukan step, respon dari sistem belum mampu menuju keadaan 233



Gambar 6.3



Gambar 6.4



Gambar 6.5

steady state dengan sinyal masukan berupa based on system identification and PID fungsi step. Pada Gambar 16, saat sistem auto tuning." Control Conference (CCC), dalam kondisi close loop menggunakan 2017 36th Chinese. IEEE, 2017. kendali LQR dengan nilai  $k_1 = 116.8$  dan  $k_2 = 9319.9$  diperoleh respon konstanta waktu and Viliam Fedák. "Motor DC ( $\tau$ ) saat respon mencapai 63,2% dari respon identification based on Recurrent Neural steady state dengan waktu sekitar 0.03 Networks." Mechatronics- Mechatronika detik. Bila dibandingkan dengan kendali (ME), 2014 16th International Conference PID dengan parameter konstanta on. IEEE, 2014. proporsional senilai 81.76, integral senilai [6] Kamdar, Sauyma, Harsidh 364.98 dan differensial senilai 4.04 seperti Brahmabhatt, Tigmanshu Patel, and Manish yang disajikan pada Gambar 20

diperoleh Thakker. "Sensorless speed control of high waktu sekitar 0.05 detik. Itu artinya respon speed brushed Motor DC by model kendali LQR lebih optimal sebesar 0.02 identification and validation." In detik. Engineering (NUICONE), 2015 5th Nirma University International Conference on, 3. KESIMPULAN pp. 1-6. IEEE, 2015. Teknik kendali optimal yang dibahas pada [7] Wang, Jun-Sheng, and Guang-Hong makalah ini adalah dengan LQR, dimana Yang. "Data-Driven Output- Feedback Matriks elemen Q dicari dengan cara Fault-Tolerant Compensation Control for perkalian antara transpose Matriks C sistem Digital PID Control Systems With dengan Matriks C sistem tersebut. Unknown Dynamics." IEEE Transactions Sedangkan Matriks elemen R di tuning on Industrial Electronics 63, no. 11 (2016): secara eksperimen dengan nilai 0.000001. 7029-7039. Dari hasil pengujian penerapan sistem [8] Viola, J., L. Angel, and J. M. kendali LQR dapat disimpulkan bahwa Sebastian. "Design and robust kendali LQR menghasilkan respon performance evaluation of a fractional konstanta waktu ( $\tau$ ) yang lebih optimal bila order PID controller applied to a Motor dibandingkan dengan kendali PID sebesar DC ." IEEE/CAA Journal of Automatica 0.02 detik. Sinica 4, no. 2 (2017): 304-314. [9] Shanmugasundram, R., K. PUSTAKA Muhammad Zakariah, and N. Yadaiah. "Implementation and performance [1] Wang X, Yin T, Chen J, et al. Rapid analysis of digital controllers for brushless design of Motor DC speed control Motor DC drives." system based on Matlab[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics Applied Mechanics & Materials, 2015, 19, no. 1 (2014): 213-224. 743:168-171. [10] G. Ellis, Control system design [2] L. Ljung, "Prediction error guide : a practical guide. 3rd ed 2004, estimation methods", Circ. Syst. Signal Amsterdam ; Boston: Elsevier Academic Process. 21 (2002) 11–21. Press. [3] G. H. Shakouri and H. R. [11] Raka Ardana, I Wayan. Simulasi Radmanesh, "Identification of a Sistem Kontroler Pid Untuk Motor Induksi continuous time nonlinear state space Menggunakan Perangkat Lunak Matlab / model for the extenal power system Simulink. Majalah Ilmiah Teknologi dynamic equivalent by neural network," Elektro, vol. 7, no. 2, May, 2013. Electrical Power and Energy Systems, vol. [12] Haron, Hartini Sharninayati. "Linear 31, pp. 334-344, 2009. quadratic regulator (LQR) controller [4] Tang, Wei-Jie, Zhen-Tao Liu, and design for DC servo motor." PhD diss., Qian Wang. "Motor DC speed control Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 234

2013. Qian Wang. "Motor DC speed control [13] Srivastava, Saurabh, and V. S. based on system identification and PID Pandit. "A scheme to control the speed of auto tuning." Control Conference (CCC), a Motor DC with time delay using 2017 36th Chinese. IEEE, 2017. LQR-PID controller." In Industrial [5] Ismeal, Godem A., Karol Kyslan,

Instrumentation and Control (ICIC), 2015 and Viliam Fedák. "Motor DC International Conference on, pp. 294-299. identification based on Recurrent Neural IEEE, 2015. Networks." Mechatronics- Mechatronika [14] L. Ljung, System Identification (ME), 2014 16th International Conference Theory for the User, 2nd ed., Prentice Hall, on. IEEE, 2014. CA: Linkoping University Sweden, 1999. [6] Kamdar, Sauyma, Harsidh [15] L. A. Zadeh, "On the Identification Brahmbhatt, Tigmanshu Patel, and Manish Problem," IEEE Transactions On Circuit Thakker. "Sensorless speed control of high Theory, vol. 3, no 4, pp.277-281.1956. speed brushed Motor DC by model [16] Yu, Gwo-Ruey, and Rey-Chue identification and validation." In Hwang. "Optimal PID speed control of Engineering (NUiCONE), 2015 5th Nirma brush less Motor DC s using LQR University International Conference on, approach." Systems, Man and pp. 1-6. IEEE, 2015. Cybernetics, 2004 IEEE International [7] Wang, Jun-Sheng, and Guang-Hong Conference on. Vol. 1. IEEE, 2004. Yang. "Data-Driven Output- Feedback [17] Peng, Jinzhu, and Rickey Dubay. Fault-Tolerant Compensation Control for "Identification and adaptive neural Digital PID Control Systems With network control of a Motor DC Unknown Dynamics." IEEE Transactions system with dead-zone on Industrial Electronics 63, no. 11 (2016): characteristics." ISA transactions 50.4 7029-7039. (2011): 588-598. [8] Viola, J., L. Angel, and J. M. [18] Ogata, Katsuhiko. Modern Control Sebastian. "Design and robust Engineering Third Edition. New Jersey, performance evaluation of a fractional Prentice Hall, Upper Saddle River. 1997. order PID controller applied to a Motor DC ." IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica 4, no. 2 (2017): 304-314. [9] Shanmugasundram, R., K. REFERENSI Muhammad Zakariah, and N. Yadaiah. "Implementation and performance [1] Wang X, Yin T, Chen J, et al. Rapid analysis of digital controllers for brushless design of Motor DC speed control Motor DC drives." system based on Matlab[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics Applied Mechanics & Materials, 19, no. 1 (2014): 213-224. 2015, 743:168-171. [10] G. Ellis, Control system design [2] L. Ljung, "Prediction error guide : a practical guide. 3rd ed 2004, estimation methods", Circ. Syst. Signal Amsterdam ; Boston: Elsevier Academic Process. 21 (2002) 11–21. Press. [3] G. H. Shakouri and H. R. [11] Raka Ardana, I Wayan. Simulasi Radmanesh, "Identification of a Sistem Kontroler Pid Untuk Motor Induksi continuous time nonlinear state space Menggunakan Perangkat Lunak Matlab / model for the extenal power system Simulink. Majalah Ilmiah Teknologi dynamic equivalent by neural network," Elektro, vol. 7, no. 2, May, 2013. Electrical Power and Energy Systems, vol. [12] Haron, Hartini Sharninayati. "Linear 31, pp. 334-344, 2009. quadratic regulator (LQR) controller [4] Tang, Wei-Jie, Zhen-Tao Liu, and design for DC servo motor." PhD diss., 235

Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, 2013. [13] Srivastava, Saurabh, and V. S. Pandit. "A scheme to control the speed of a Motor DC with time delay using LQR-PID controller." In *Industrial Instrumentation and Control (ICIC), 2015 International Conference on*, pp. 294-299. IEEE, 2015. [14] L. Ljung, *System Identification Theory for the User*, 2nd ed., Prentice Hall, CA: Linkoping University Sweden, 1999. [15] L. A. Zadeh, "On the Identification Problem," *IEEE Transactions On Circuit Theory*, vol. 3, no 4, pp.277-281.1956. [16] Yu, Gwo-Ruey, and Rey-Chue Hwang. "Optimal PID speed control of brush less Motor DC s using LQR approach." *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on*. Vol. 1. IEEE, 2004. [17] Peng, Jinzhu, and Rickey Dubai. "Identification and adaptive neural network control of a Motor DC system with dead-zone characteristics." *ISA transactions* 50.4 (2011): 588-598. [18] Ogata, Katsuhiko. *Modern Control Engineering Third Edition*. New Jersey, Prentice Hall, Upper Saddle River. 1997.

### Daftar Pustaka

- [1] Cahyono, L, Apriani, M, Utomo, AP, Nugraha, AT, Setiawan, A, Fatoni, A and .... "Pelatihan Pembuatan Lilin Aromaterapi dari Minyak Jelantah Sebagai Sarana Peduli Lingkungan Perairan dan Implementasi Konsep Ekonomi Sirkular Warga Bumi Suko Indah." *Dharma Raflesia: Jurnal Ilmiah Pengembangan dan Penerapan IPTEKS* 20.1, 2022, pp. 53-67.
- [2] Nugraha, AT. "Buku Elektronika Industri 1: Prinsip dan Aplikasi Motor Listrik Mesin Listrik Serta Alat Ukur.", 2024
- [3] LUGAS, JS, EDY, S and ANDA, IJ. "Implementasi Sistem Filtrasi Air Alami Terintegrasi Sensor TDS dan ESP32 Untuk Pemenuhan Baku Mutu Air Kelas." *JURNAL ELEKTRONIKA DAN OTOMASI INDUSTRI Учредители: Politeknik Negeri Malang ...*, 2024
- [4] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF and Ainudin, FH. "Comparative Analysis of Buck-Boost Converter with Sepic Converter for Optimization of Wind Power Plant Output Voltage." *International Conference on Applied Science and Technology on Engineering ...*, 2024
- [5] Prastica, RAN, Hasin, MK and Nugraha, AT. "Pregnancy Chatbot Menggunakan NLP (Natural Language Processing)." *JOI: Journal of Automation Engineering and Its Application* 1.1, 2022
- [6] Fuad, E, Nugraha, A and Khoiril, M. "Penerapan Augmented Reality Sebagai Media Informasi Kadar Nutrisi Buah Durian Melalui Objek Kemasan Produk." *Jurnal Dinamika Informatika* 6.2, 2017, pp. 17-30.
- [7] Firsalina, D, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Fire Detection System Pada Box Panel dengan Berbasis SMS Gateway." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.1, 2021, pp. 26-32.
- [8] Sofyan, M, Syaifudin, S, Pudji, A, Utomo, B and Nugraha, AT. "Comparative Analysis of Water and Oil Media on Temperature Stability in PID Control-Based Digital Thermometer Calibrator." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2023
- [9] Najmurokhman, A, Nugraha, A, Kusnandar, UK and Wibowo, B. "Perancangan dan Realisasi Sistem Pendeteksi Objek menggunakan Perangkat Lunak Python 2.7." *LPPM UNJANI*, 2017
- [10] Sugianto, MGPA and Nugraha, AT. "Implementasi sensor cahaya sebagai level bahan bakar pada tangki harian kapal." *Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE)* 3.1, 2022

- [11] Utomo, AP, Cahyono, L, Fahmi, MR, Apriani, M, Nugraha, AT, Tiyasmihadi, T and .... "PELATIHAN PEMANFAATAN MINYAK BERLEBIH DAN TERSISA MENJADI LILIN RELAKSASI SEBAGAI PEMBERDAYAAN MASYARAKAT BIDANG EKONOMI SIRKULAR DAN PENGELOLAAN LIMBAH BERKELANJUTAN." MIMBAR INTEGRITAS: Jurnal Pengabdian 4.2, 2025, pp. 650-663.
- [12] Nugraha, AT, Sobhita, RA and Firdaus, AA. "Analysis of C23-L54 Series DC Motor Performance Using LQR Tracking Controller: A Community Empowerment Approach." Emerging Trends in Industrial Electronics 1.1, 2025, pp. 1-8.
- [13] Pangestu, ND, Fathurrohman, MF, Nugraha, AT, Sukoco, D and Pambudi, DSA. "PERANCANGAN SMART PROTECTION PADA MOTOR KINCIR AERATOR TAMBAK UDANG MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY." Jurnal 7 Samudra 9.1, 2024, pp. 1-8.
- [14] Nugraha, AT, Azam, AI, Sobhita, RA and Sunarno, E. "IOT-Based Smart Home Control Design Using Blink Application and Esp8266 Wi-Fi Module." Mein: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 1.1, 2024, pp. 7-11.
- [15] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Hazim, A, Rochmawati, NW, Sena, AI and .... "ANALISIS PENGENDALI KECEPATAN PUTARAN MOTOR DC MENGGUNAKAN BUCK CONVERTER." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 15-22.
- [16] Ramadhani, DA, Hidayat, EP and Nugraha, AT. "Pemanfaatan Sensor Ultrasonik sebagai Purwarupa Pengukur Ketinggian Air pada Tangki Pembuangan Air Kotor di Kapal." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 12.2, 2022, pp. 109-116.
- [17] Nugraha, AT, Ravi, AM and Priyambodo, D. "Optimization of Targeting Rocket Launchers with Wheeled Robots." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2021
- [18] Haj, MI and Nugraha, AT. "Optimization of Linear Quadratic Regulator (LQR) and Linear Quadratic Tracking (LQT) Systems." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 3.1, 2025, pp. 1-9.
- [19] Nugraha, AT and Fathin, AS. "IMPLEMENTASI BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER BERBASIS TOPOLOGI CASCADED PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN DENGAN METODE PID." MEDIA ELEKTRIKA 17.1, 2024, pp. 22-29.
- [20] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Agna, DIY, Ashlah, MB, Fathurrohman, MF and .... "Analisis Optimalisasi Penggunaan Konverter CUK Pada PLTA Menggunakan Simulasi Proteus." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 62-67.

## BAB VII

# PID Tuning for DC Motor Speed Regulation: a Comprehensive Evaluation in Engineering Applications

Oleh: **Rizal Faturrohman**

*Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*

**Kata Kunci:** *PID, Motor DC, Speed Control, Linear, Nonlinear*

### A. Abstract

The DC motor is one of the most commonly used actuators in both educational and industrial applications, such as robotics, 3D printing, and other automation systems. Despite its ability to maintain stable speed under ideal conditions, significant challenges persist in its transient response, particularly when external disturbances occur. These challenges highlight the necessity for performance optimization to achieve a constant speed with high accuracy. To address these issues, an effective control system is required. Achieving an optimal control system necessitates a highly accurate model of the DC motor, particularly for systems with dynamic parameter variations, unmodeled dynamics, or fluctuating external disturbances. Numerous control methods have been implemented for both linear and nonlinear DC motor systems. However, traditional linear control techniques often fail to adequately compensate for parameter changes, non-linearities, and external disturbances. The Proportional-Integral-Derivative (PID) controller, a nonlinear control strategy, is widely utilized for DC motor systems due to its simplicity and effectiveness. Nevertheless, PID controllers that rely solely on offline tuning cannot consistently deliver optimal output responses. In contrast, systems with online modeling and real-time PID control demonstrate significant improvements in output response, effectively adapting to dynamic changes and disturbances. The primary objective of this study is to enhance the real-time output response of DC motor systems through an optimized PID control approach. This research contributes to the field of control engineering by addressing key challenges in transient response, offering solutions that are both practical and applicable to a broad range of engineering applications.

### Introduction

To fully understand and analyze the properties of a control system, system identification is crucial. This process involves mathematically modeling the system based on the characteristics of its components (Hekimoğlu, Ekinci, & Kaya, 2018). The outcome of this

identification is a transfer function, which provides a fundamental understanding of how the system will respond to various inputs. By examining this transfer function, one can determine the system's response to different types of stimuli, and based on that knowledge, select the appropriate control actions to achieve desired behavior. System identification serves as an experimental method used to derive the dynamic model of a system.

At its core, a model is built using observed data. Identifying a system is an essential task in scientific research, as it forms the first step in any system analysis. However, acquiring an accurate and reliable model is not a simple process, as it requires robust methodologies. There are two main approaches for deriving a mathematical model of a physical system: analytical methods and experimental methods (Khubalkar, Junghare, Aware, & Das, 2017). For DC motors, experimental methods are often employed, involving the observation and analysis of input-output data.

Among the experimental techniques, some researchers have turned to Artificial Intelligence (AI) algorithms, such as Recurrent Neural Networks (RNN), to create more sophisticated models. In these cases, the dynamic model of the DC motor is obtained by minimizing the error between predicted and actual motor outputs through a training process. This approach allows for the learning of complex, nonlinear relationships in the system, especially when the system's parameters are unknown or changing.

Additionally, another research approach involves using feedback voltage from the DC motor as an input control signal and the motor's rotational speed as the output control parameter. The relationship between the input and output is then evaluated using MATLAB's control identification tools, which enable the researcher to fine-tune the model and improve the accuracy of predictions.

The DC motor operates as a nonlinear system, especially when load variations are introduced. Conventional controllers, such as PID controllers, are widely used due to their strong performance in controlling linear systems (Podlubny, 1999). However, PID control systems often struggle to maintain optimal performance under nonlinear conditions or when the system is subject to disturbances. This paper focuses on optimizing the PID control strategy for a Permanent Magnet DC (PMDC) motor, which will be both identified and controlled using the optimal PID control technique. By addressing the inherent nonlinearities of the system and improving the control algorithms, this research contributes to enhancing the real-time control of DC motors in various engineering applications.

## **Material and methods**

## Methods

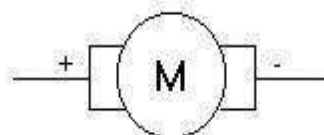
In this research, the DC motor identification process was carried out in an open loop via Arduino and a personal computer (PC) connected to Simulink-Matlab (Achmad, Nugraha, & Irgi, 2022). The method used for identification is a static identification method. One of the most widely used static identification methods is the open loop method with step input.

The characteristics of a system refer to the specific features of the dynamic behavior of that system, also known as the system's performance specifications (Aгна, Yuniza, & Nugraha, 2022a). The system's output response occurs as a result of an input signal or after a test signal is applied. Based on the characteristics of the system's response, it can be classified into time response characteristics and frequency response characteristics. In this study, the focus is on observing the time response characteristics of a DC motor. The goal of observing the time response characteristics is to analyze the system's output response to changes over time (Yuniza, Agna, & Nugraha, 2022). Generally, performance specifications for time response can be divided into two stages of observation: transient response and steady-state response. Furthermore, the system's characteristics can be approximated using first-order and second-order systems.

## DC Motor

A DC motor is an electric motor that requires a direct current voltage supply to the field coil to be converted into mechanical motion energy (Das, 2011). The field coil in a dc motor is called the stator (the non-rotating part) and the armature coil is called the rotor (the rotating part). Direct current motors, as the name suggests, use indirect/direct-unidirectional current.

A DC motor is an electronic device that converts electrical energy into mechanical energy in the form of rotational motion (Pambudi et al., 2021). In DC motors there is an armature with one or more separate coils. Each coil ends in a split ring (commutator). With the insulator between the commutator, the split ring can act as a double pole switch (double pole, double throw switch). DC motors work based on the Lorentz force principle, which states that when a current-carrying conductor is placed in a magnetic field, a force (known as the Lorentz force) will be created orthogonally between the direction of the magnetic field and the direction of current flow (Jamil et al., 2021).



### *Gambar 7.1 Motor Symbol*

DC motors are composed of two parts, namely a stationary part (stator) and a moving part (rotor) (Bintari, Mudjiono, & Nugraha, 2022). The stator of a direct current motor is the motor body or magnetic poles (brushes), while the rotor is the armature winding. In a motor, the moving electrical conductor wire is basically a rectangular coil called a coil (As'ad, Yuniza, & Nugraha, 2022).

#### Main Parts or Components of a DC Motor

**Field poles.** A simple DC motor has two field poles: a north pole and a south pole. Magnetic lines of energy expand across the open space between the poles from north to south. For larger or more complex motors there are one or more electromagnets.

**DC Motor Coil.** If current enters the DC motor coil, this current will become an electromagnet. The cylindrical DC motor coil is connected to the drive axle to move the load. In the case of a small DC motor, the DC motor coil rotates in a magnetic field formed by the poles, until the north and south poles of the magnet change location. If this happens, the current reverses to change the north and south poles of the DC motor coil.

**DC Motor Commutator .** This component is mainly found in DC motors. Its use is to reverse the direction of internal electric current DC motor coil and also helps in transmitting current between the DC motor coil and the power source.

#### **PID Control**

##### Propotional (P)

A proportional controller has an output that is proportional to the size of the error signal (the difference between the desired quantity and the actual value) (Shah & Agashe, 2016). In simpler terms, it can be said that the proportional controller output is the product of the proportional constant and the input. Changes in the input signal will immediately cause the system to directly change its output by the multiplier constant (Monje, Chen, Vinagre, Xue, & Feliu-Battle, 2010). A proportional controller has 2 parameters, proportional band and proportional constant. The effective controller working area is reflected by the proportional band, while the proportional constant shows the value of the amplification factor for the error signal,  $K_p$ . Relationship between proportional band (PB) and proportional constant ( $K_p$ )

Shows a graph of the relationship between PB, controller output and error which is the controller input (Caponetto, Dongola, Fortuna, & Petráš, 2010). When the proportional constant increases higher, the proportional band shows a smaller decrease, so that the scope of work that is strengthened will become narrower. The characteristics of a proportional

controller must be considered when the controller is applied to a system. Experimentally, proportional controller users must pay attention to the following provisions:

If the  $K_p$  value is small, the proportional controller is only able to correct small errors, so it will result in a slow system response.

If the  $K_p$  value is increased, the system response shows that it will reach a steady state more quickly.

However, if the  $K_p$  value is increased to an excessive value, it will result in the system working unstable, or the system response will oscillate.

#### Integral (I)

The integral controller functions to produce a system response that has zero steady state error. If a plant does not have an integrator element ( $1/s$ ), the proportional controller will not be able to guarantee system output with a steady state error of zero.

With an integral controller, the system response can be improved, namely having a steady state error of zero. An integral controller has characteristics like an integral (Yurisma et al., 2024). The controller output is strongly influenced by changes that are proportional to the error signal value. The output of this controller is a continuous sum of changes in the input. If the error signal does not change, the output will maintain the state it was in before the input change occurred (Nugraha et al., 2023). The integral controller output signal is the area formed by the drive error curve- see numerical concepts. The output signal will have the same value as the previous price when the error signal was zero. The value of the controller output change rate changes to twice the original value. If the value of the integrator constant changes to be larger, a relatively small error signal can result in a large output speed. When used, an integral controller has the following characteristics:

The controller output requires a certain time interval, so the integral controller tends to slow down the response.

When the error signal is zero, the controller output will remain at the previous value.

If the error signal is not zero, the output will show an increase or decrease which is influenced by the size of the error signal and the  $K_i$  value.

A large integral constant  $K_i$  will accelerate the loss of offset. But the greater the value of the constant  $K_i$  will result in increased oscillations of the controller output signal.

#### Derivative (D)

The differential controller output has properties like a derivative operation. Sudden changes to controller input will result in very large and rapid changes. When the input does not change, the controller output also does not change, whereas if the input signal changes suddenly and increases (in the form of a step function), the output produces an impulse signal (Paluga et al., 2024). If the input signal increases slowly (ramp function), the output is actually a step function whose magnitude is strongly influenced by the increasing speed of the ramp function and the differential constant factor  $T_d$ . The characteristics of the differential controller are as follows:

This controller cannot produce output if there is no change in the input (in the form of an error signal).

If the error signal changes with time, then the output produced by the controller depends on the  $T_d$  value and the rate of change of the error signal.

The differential controller has the characteristic of overriding, so that this controller can produce significant corrections before the error generator becomes very large. So the differential controller can anticipate error generators, provide corrective action, and tend to increase system stability.

Based on the characteristics of these controllers, differential controllers are generally used to speed up the initial response of a system, but do not reduce errors in the steady state (Fauzi et al., 2024). The differential controller's work is only effective in a narrow scope, namely during the transition period. Therefore a differential controller is never used without another controller in a system.

#### PID Control

Each of the advantages and disadvantages of each controller P, I and D can cover each other by combining the three in parallel into a proportional plus integral plus differential controller (PID controller) (Dermawan et al., 2023). The controller elements P, I and D respectively the overall aim is to speed up the reaction of a system, eliminate offsets and produce large initial changes. The PID controller output is the sum of the proportional controller output and the integral controller output (Aгна, Sobhita, & Nugraha, 2023). The characteristics of the PID controller are greatly influenced by the large contribution of the three parameters P, I and D. Adjusting the constants  $K_p$ ,  $T_i$  and  $T_d$  will result in highlighting the properties of each element. One or two of the three constants can be set more prominently than the others. These prominent constants will contribute to influence the overall system

response. In field applications, we can identify PID controllers with: P: gain (increase/achievement), I: reset, D: rate (speed).

## Results and discussion

### Simulation test

Program:

Clear

clc

Ra = 0.4;

La = 2.7;

J = 0.0004;

B = 0.0022;

K = 0.015;

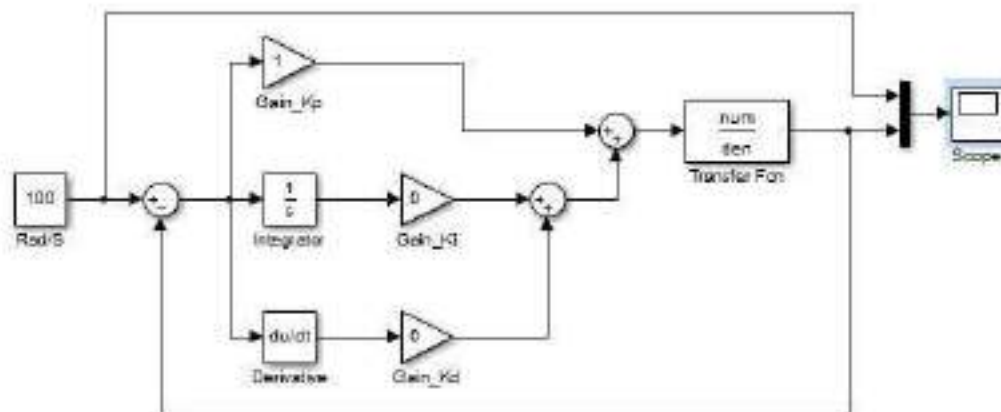
Kb = 0.05;

num = K;

den = [La\*J (La\*B + Ra\*J) (Ra\*B+Kb\*K)];

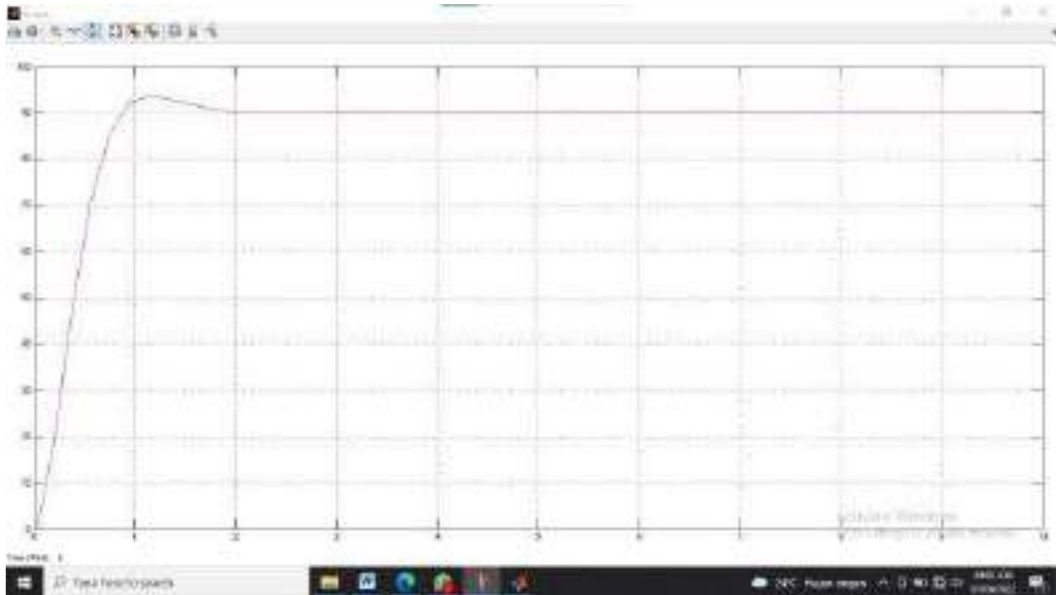
Gs = tf(num,den);

Simulation diagram



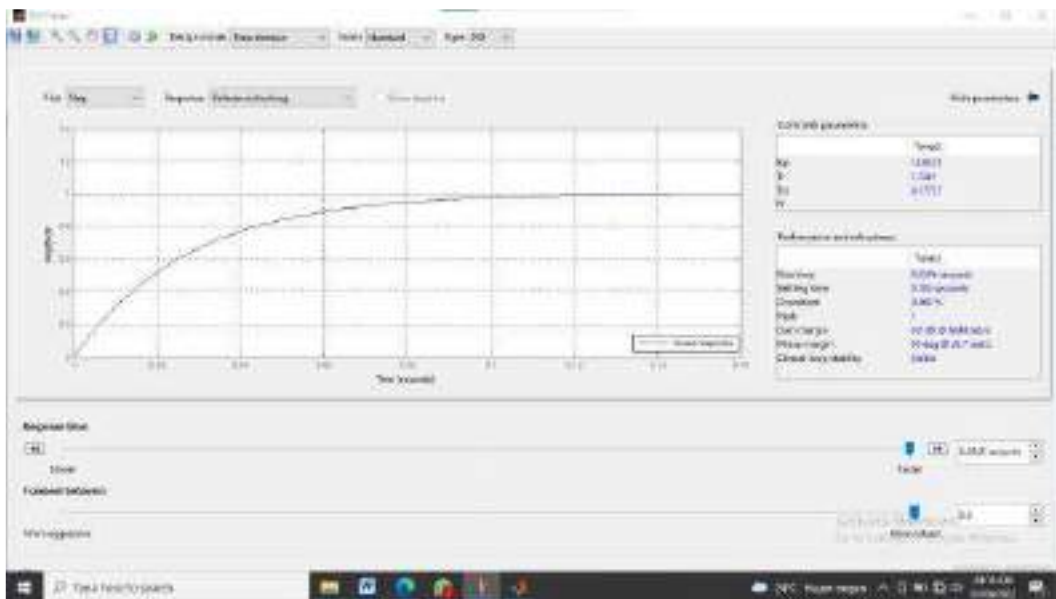
Gambar 7.2 Model Simulink

Result simulation 1



Gambar 7.3 Waveform model 1

### Trial and error Tuning PID



Gambar 7.4 Waveform model 1 after tuning

From the PID Tuning experiment, the most optimal graph was obtained and the  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  numbers were obtained from the visible graph and obtained  $K_p = 14.9325$ ,  $K_i = 8.532$ , and  $K_d = 2.67471$ , so it can be applied to the system as follows:

Program

clear

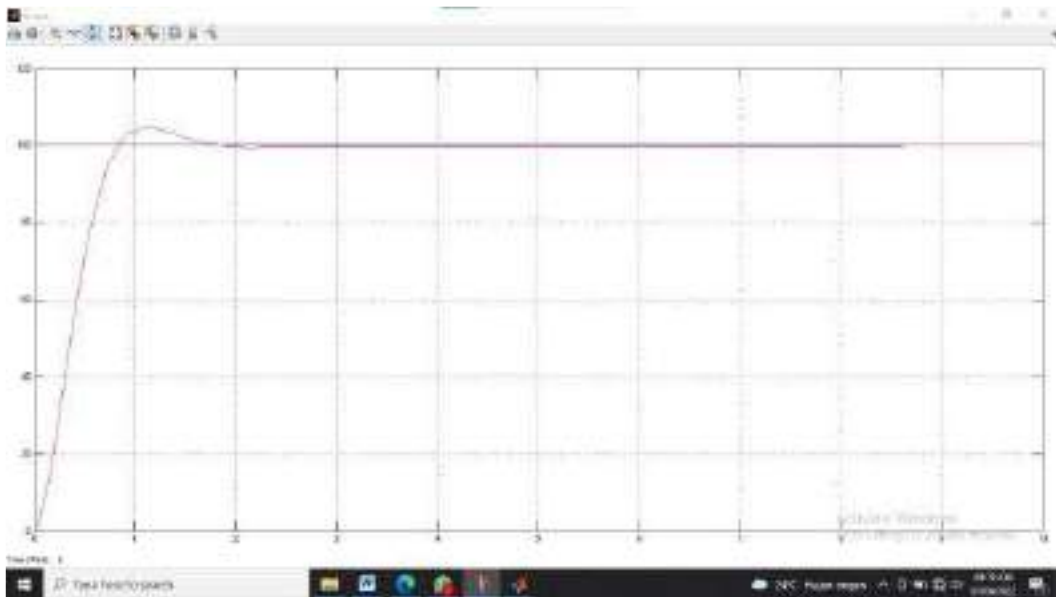
clc

Ra = 0.4;

```

La = 2.7;
J = 0.0004;
B = 0.0022;
K = 0.015;
Kb = 0.05;
num = K;
den = [La*J (La*B + Ra*J) (Ra*B+Kb*K)];
Gs = tf(num,den);
Kp = 14.9325;
Ki = 8.532;
Kd = 2.6471;
Waveform model 2

```



*Gambar 7.5 Waveform model 2*

It can be observed that overshoot occurs, and the PV response becomes slower. The assessment of the control characteristics here is based on the Maximum Overshoot ( $M_p$ ) and Settling Time ( $T_s$ ) values. This is because both of these parameters have a significant impact on the PID oscillation graph. By knowing the Maximum Overshoot and Settling Time, we can determine the best control response for each experiment. Theoretically, Maximum Overshoot and Settling Time have an inverse relationship. This means that when a control system has a high Maximum Overshoot, it typically has a short Settling Time, and vice versa.

In this section, we will explain the effect of each PID parameter— $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ —on the overall control response.

The  $K_p$  parameter is closely related to Proportional control. The value of  $K_p$  significantly affects the controller's sensitivity; in other words, the larger the value of  $K_p$ , the more sensitive the controller will be, and vice versa. The  $T_i$  parameter is closely associated with Integral control. Integral control has the property of producing output when the input is zero. If the  $T_i$  value is large, the controller's response will be faster or more sensitive, and vice versa. The  $T_d$  parameter is directly related to Derivative control. Derivative control has the property of not producing output unless there is a change in input. The output value is directly proportional to the  $T_d$  value, meaning that the larger the  $T_d$  value, the greater the output produced.

Therefore, the  $K_p$ ,  $T_i$ , and  $T_d$  parameters in a PID control response each provide actions that address the weaknesses of the individual P, I, and D controllers. The P, I, and D elements are each useful for speeding up the system's reaction, eliminating offset, and providing extra energy during initial load changes or setpoint shifts. Unfortunately, the advantages of the PID controller cannot be applied to control all process variables. Only process variables that do not contain noise can be controlled with the D element. For this reason, PID controllers are generally used for temperature control. Tuning any one of  $K_p$ ,  $T_i$ , or  $T_d$  can make one parameter more prominent than the others. The dominant element will then influence the overall system response.

### **Conclusion**

**Proportional Gain ( $K_p$ ) Parameter:** The  $K_p$  parameter is directly associated with proportional control. It significantly influences the sensitivity of the controller. Specifically, as  $K_p$  increases, the controller becomes more sensitive to errors, meaning it reacts more strongly to changes in the system. Conversely, reducing  $K_p$  lowers the controller's sensitivity. In the context of DC motor speed control, tuning  $K_p$  is crucial for achieving a fast response without introducing excessive oscillations, ensuring that the system quickly adapts to setpoint changes while avoiding instability.

**Integral Time ( $T_i$ ) Parameter:** The  $T_i$  parameter is fundamentally tied to integral control. Integral control has the ability to produce an output even when the input is zero, thus eliminating steady-state errors (offset). A larger  $T_i$  value results in faster controller response, meaning the controller becomes more sensitive to long-term errors and corrects them more rapidly. On the other hand, a smaller  $T_i$  value leads to slower correction, which might not

adequately address persistent errors. For engineering applications such as DC motor control, optimizing  $T_i$  is essential for maintaining system accuracy and compensating for persistent disturbances or changes in load.

**Derivative Time ( $T_d$ ) Parameter:** The  $T_d$  parameter corresponds to derivative control, which is inherently designed to respond to changes in the system. Unlike proportional or integral control, derivative control does not produce an output unless there is a change in input, making it effective for reducing overshoot and damping oscillations in the system. The output of the derivative control is proportional to  $T_d$ . Therefore, a larger  $T_d$  results in a stronger response to rate-of-change events, improving the system's ability to anticipate changes and stabilize rapidly. However, tuning  $T_d$  too high can lead to excessive noise sensitivity, which can undermine performance, especially in practical applications.

**Interaction of  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  in PID Control:** The interaction between  $K_p$ ,  $T_i$ , and  $T_d$  in the PID control system provides a balanced approach to improving system performance. Each parameter addresses a specific shortcoming of the individual Proportional (P), Integral (I), and Derivative (D) controllers.  $K_p$  accelerates the system's response,  $T_i$  eliminates steady-state errors, and  $T_d$  adds additional energy at the initial stages of load changes or setpoint adjustments. This synergy enables the PID controller to achieve optimal performance, offering rapid, stable, and accurate control of the DC motor speed. Proper tuning of the PID parameters is vital for minimizing errors, preventing overshoot, and ensuring smooth operation of the system under varying conditions.

## Daftar Pustaka

- [1] Sheila, SY, Rochamwati, NW, Riyadi, F, As'ad, RF and Nugraha, AT. "Desain and Build a Medium Voltage Cubicles Temperature and Humidity Optimization Tool to Minimize the Occurrence of Corona Disease with the PLC-Based Fuzzy Method." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2022
- [2] Pradana, RBP, Widiarti, Y and Nugraha, AT. "Implementasi Komunikasi LoRa RFM95 untuk Pengiriman Data Tegangan dan Arus pada Panel Shore Connection." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 45-51.
- [3] Aziz, MNH, Setiyoko, AS and Nugraha, AT. "Trainer Kit Detector Fire Alarm System pada Kapal." *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.2, 2021, pp. 49-58.
- [4] Apriani, M, Nugraha, AT, Cahyono, L, Utomo, AP and Firnandi, R. "Coastal Community Empowerment: Recovery Of Cockle Shell Waste Into Eco-friendly Artificial Reefs In Mutiara Beach Trenggalek Indonesia." ID Patent EC00,202,300,070, 2023
- [5] Utomo, AP, Nugraha, AT and Zakariz, NP. "Speed Adjustment on Variable Frequency Induction Motor Using PLC for Automatic Polishing Machine." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2021
- [6] Ainudin, FH and Nugraha, AT. "Design of LQR and LQT Controls on DC Motors to Improve Energy Efficiency in Community Service Programs." *Maritime in Community Service and Empowerment* 2.2, 2024, pp. 7-13.

- [7] Nugraha, AT. "Slip Control Design On Electrical Wheel Haul Truck-Based Sliding Mode Control." MISEIC 2018, 2018
- [8] Pradana, SY, Hazim, A and Nugraha, AT. "Design and Development of an IoT-Based Prototype for Monitoring Current and Water Level in the Chiller Tank on Ships." Journal of Electrical, Marine and Its Application 3.1, 2025
- [9] Nugraha, AT and Fathin, AS. "IMPLEMENTASI BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER BERBASIS TOPOLOGI CASCADED PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN DENGAN METODE PID." MEDIA ELEKTRIKA 17.1, 2024, pp. 22-29.
- [10] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Distributed Panel-based Fire Alarm Design." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ...), 2022
- [11] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "O<sub>2</sub> Gas Generating Prototype In Public Transportation."
- [12] Nugraha, AT, Primaningtyas, WE, Abdullah, K, Wulandari, KD, Alfanda, BD and .... "Pelatihan manufaktur komposit sebagai produk kerajinan tangan pada industri rumahan." Educivilia: Jurnal Pengabdian pada Masyarakat 1.2, 2020, pp. 119-129.
- [13] Supiyadi, RA, Asri, P and Nugraha, AT. "Design and Development of a Microcontroller-Based UV Conveyor Control System and Plastic Shred Moisture Monitoring Prototype." Journal of Marine Electrical and Electronic Technology 2.2, 2024, pp. 1-7.
- [14] Rahmatullah, RMN, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Permodelan Matematis Sistem Motor DC MOOG C34-L70 Orde Satu dan Orde Dua." Conference of Electrical, Marine and Its Application 4.1, 2025
- [15] Nugraha, AT. "Buku Elektronika Industri 2 : Prinsip dan Aplikasi Sistem Pengamanan Pengaturan Otomatis Sistem Distribusi Serta Pembangkit Listrik Mikrohydro.", 2024
- [16] Yuniza, SI, Agna, DIY and Nugraha, AT. "The design of effective single-phase bridge full control resistive load rectifying circuit based on MATLAB and PSIM." International Journal of Advanced Electrical and Computer Engineering 3.3, 2022
- [17] Nugraha, AT, Rinaldi, D, Messiah, MS, Shiddiq, M, Ramadhan, M and Ainudin, F. "Implementation of Line of Sight Algorithm Design Using Quadcopter on Square Tracking." JPSE (Journal of Physical Science and Engineering) 7.2, 2022, pp. 99-107.
- [18] Nugraha, AT, Mudjiono, U, Subiyanto, L, Widodo, HA, Hidayat, EP and .... "TRAINER KIT KOORDINASI PROTEKSI PADA SISTEM DISTRIBUSI PT. X MENGGUNAKAN TEORI GRAPH." Seminar MASTER PPNS 8.1, 2023, pp. 1-8.
- [19] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "ANALISIS KONTROL KECEPATAN PUTARAN MOTOR SATU FASA MENGGUNAKAN PARAMETER FREKUENSI." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 103-111.
- [20] Ivannuri, F, Nugraha, AT and Subiyanto, L. "Prototipe Turbin Ventilator Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Angin." Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE) 3.2, 2022

## BAB VIII

### Penerapan Pengendalian LQR untuk Kontrol Sikap Longitudinal Pesawat Flying Wing

Oleh: Rizki Abdi Pradana

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

**Kata Kunci:** *Unnamed Aerial Vehicle, Longitudinal, LQR, Steady State Error*

Perkembangan pesawat tanpa awak dalam beberapa tahun terakhir menjadi perhatian banyak pihak dan menarik banyak peminat masyarakat. Pesawat tanpa awak telah banyak digunakan untuk berbagai misi, diantaranya adalah untuk pemetaan wilayah dan militer. Pesawat tanpa awak juga digunakan untuk kepentingan sipil. Bentuk pesawat tanpa awak yang relative kecil, menjadikan sensitive terhadap gangguan lingkungan terutama angin, hal tersebut dapat menyebabkan pesawat kehilangan kestabilan dan mengalami stall, sehingga menggagalkan misi penerbangan. Oleh karena itu diperlukan sistem kendali yang kuat dan cepat untuk mengatur konfigurasi gerak agar tidak terjadi stall. Pada penelitian ini metode kendali LQR diterapkan untuk mengendalikan sudut roll pada pesawat agar mampu mempertahankan kestabilan sikap longitudinal. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, metode kendali LQR mampu mengendalikan sudut roll pesawat sehingga pesawat mampu mempertahankan kestabilan sikap longitudinal, terbukti ketika sudut roll diberikan gangguan, terjadi overshoot sebesar  $4,28^\circ$ , namun pesawat dengan cepat mampu kembali ke keadaan semula dengan rise time 0,7 detik, settling time 1,3 detik dan kecendrungan steady state error sebesar  $1,37^\circ$ .

#### ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) development has attracted the attention of many parties and attracted a lot of enthusiasts recently. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) have been widely used various missions, including regional and military mapping. The shape of drone relatively small making it sensitive to environmental disturbances, especially the wind, this can cause the aircraft to lose stability and stall, thus thwarting missions. Therefore, a strong and fast control system is needed to adjust the motion configuration so that it does not stall. In this research, the LQR control method is applied to control the roll angle of aircraft in order to able to maintain longitudinal stability. Based on the results of the tests that have been carried out, the LQR control method is able to control the roll angle of the aircraft so that the aircraft is able to maintain the stability of its longitudinal stance, it is

proven that when the roll angle is disturbed, there is an overshoot of  $4,28^\circ$ . But the aircraft can quickly return to its original state with a rise time of 0.7 seconds, the setting time is 1.3 seconds and the steady state error of  $1.37^\circ$

1. PENDAHULUAN kritis yang dapat menyebabkan pesawat tanpa awak Kemajuan teknologi dewasa ini telah mengalami stall adalah besar dari  $25^\circ$ [6]. Keadaan memasuki berbagai segi kehidupan, khususnya ini menyebabkan pesawat berputar (spinning), dan bidang pesawat tanpa awak. Perkembangan pesawat memerlukan waktu yang relatif lama untuk tanpa awak menjadi perhatian banyak pihak dan memulihkan pesawat ke kondisi semula [7]. menarik banyak peminat, karena sistemnya portable Permasalahan tersebut dapat diantisipasi ketika dan bentuknya relatif kecil menjadikan pesawat ini terbang secara manual, namun ketika terbang secara mudah untuk dibawa. Pesawat tanpa awak telah autopilot permasalahan tersebut menjadi hal yang banyak digunakan untuk berbagai misi, diantaranya sangat fatal. Oleh karena itu pesawat tanpa awak adalah untuk pemetaan wilayah dan militer [1][2][3]. memerlukan sistem kendali untuk mengatur Salah satu jenis robot penjelajah udara tanpa awak. konfigurasi gerak dalam menjaga kestabilan sikap Unmanned Aerial Vehicle (UAV) juga sering terbang untuk mencegah terjadinya stall. Salah satu disebut dengan nama Pesawat Udara Nir Awak faktor yang mempengaruhi kestabilan sikap terbang (PUNA). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) pada pesawat adalah pengendalian sikap merupakan kendaraan udara tanpa awak (pilot longitudinal. Kestabilan sikap longitudinal pengendali) di dalamnya. Karena tidak memiliki dipengaruhi oleh sudut roll, dan pergerakan pada awak, UAV harus dikendalikan dari jarak jauh sumbu ini disebut gerak rolling. Gerak rolling menggunakan remote control dari luar kendaraan dicapai dengan membelokkan aileron dikedua sayap atau biasa disebut Remotely Piloted Vehicle (RPV). kearah yang saling berlawanan. Pengendalian sudut Selain itu, UAV juga dapat bergerak secara otomatis roll pada pesawat merupakan hal penting yang harus berdasarkan program yang sudah ditanamkan pada dilakukan, karena berpengaruh terhadap kestabilan sistem komputernya. sikap longitudinal pesawat [8]. Pengendalian pesawat tanpa awak dapat Beberapa penelitian telah dilakukan berkaitan dilakukan secara manual dan secara autopilot. dengan pengendalian sudut roll untuk menjaga Pesawat tanpa awak memiliki beberapa tipe yang stabilitas sikap longitudinal pesawat, seperti yang berbeda, salah satu yang banyak digunakan adalah dilakukan Mbaocha [9], dalam penelitiannya tipe pesawat flying wing. Pesawat flying wing menerapkan metode kendali PID (Proporsional memiliki bentuk segitiga dengan dilengkapi servo Integral Derivatif) untuk mengendalikan sudut roll pada sisi kiri dan kanan sayapnya, selain itu pesawat pada pesawat. Metode kendali yang

diterapkan ini tidak memiliki ekor (tailless) yang menjadikan berhasil mengendalikan sudut roll dan membuat konfigurasi pesawat ini sederhana [4]. pesawat mencapai kestabilan sikap, namun masih Kebutuhan akan WTA merupakan kebutuhan menghasilkan overshoot yang besar serta waktu mutlak untuk menunjang Pertahanan dan Keamanan penyelesaian yang relative lama. Erwhin Irmawan Nasional. WTA digunakan untuk melihat secara [10] menggabungkan metode adaptif neuro fuzzy dan lebih jelas tampak suatu objek dari udara melalui PID untuk mengendalkan kestabilan sikap foto dan video yang dapat disertai dengan longitudinal pesawat tanpa awak, penggabungan Geotagging dan koordinat sehingga tingkat kedua metode tersebut berhasil membuat respon keakuratannya sangat tinggi. sistem dan waktu penyelesaiannya menjadi lebih Pengendali utama untuk naik turun dan belok kiri cepat, tetapi overshoot yang dihasilkan cukup besar. kanan pada pesawat jenis ini adalah elevon, dan Pengendalian sudut roll sangat penting karena dilengkapi dengan motor brushless sebagai berpengaruh terhadap kestabilan sikap longitudinal pendorongnya. Pesawat jenis flying wing memiliki pesawat, oleh karena itu sistem kendali yang yang kemampuan gliding yang sangat baik, sehingga kuat dan cepat sangat dibutuhkan untuk pesawat mampu terbang menjelajah jauh secara efektif dalam rangka menuju titik kestabilan. Metode dengan membawa muatan [5]. kendali yang memiliki kemampuan tersebut salah Bentuk pesawat tanpa awak yang relatif kecil, satunya adalah metode kendali LQR [11]. Metode menjadikan sensitif terhadap gangguan lingkungan kendali tersebut telah digunakan oleh [12] untuk terutama angin. Hal ini dapat menyebabkan pesawat mengendalikan sikap terbang pada quadcopter. kehilangan kestabilan terbang dan menjadikan Penerapan metode tersebut berhasil membuat wahana pesawat stall, sehingga dapat menggagalkan misi mampu terbang dengan mempertahankan kestabilan penerbangan. Stall adalah kondisi sudut serang sikap. Atas dasar keunggulan yang dimiliki oleh pesawat meningkat melebihi sudut kritis. Sudut metode kendali tersebut, pada penelitian ini penulis

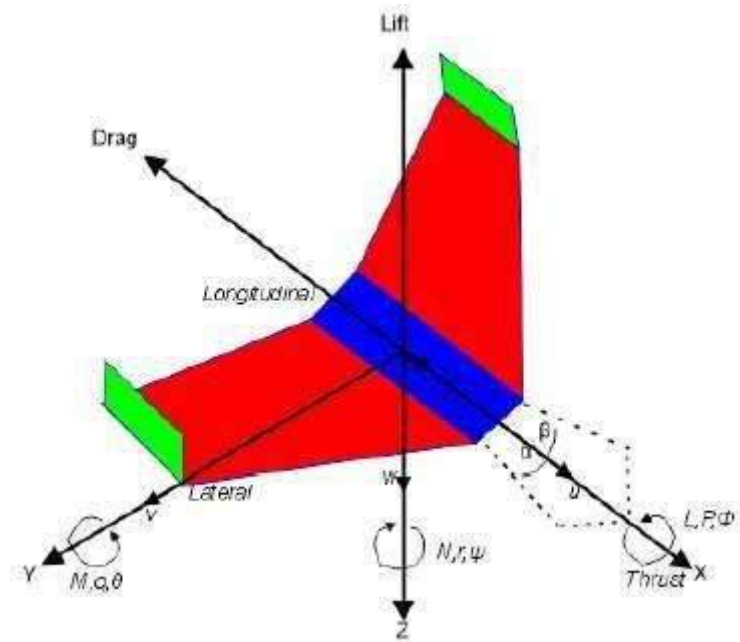
menerapkan metode kendali LQR untuk Pergerakan translasi pesawat dituliskan pada pengendalian sikap longitudinal pada pesawat flying persamaan 1 sampai persamaan 3. wing. LQR mengendalikan proses/plant dengan  $X = (U \quad QW \quad VR \quad g \sin\theta)$  (1) menggunakan kombinasi linear state plant tersebut.  $Y = (V \quad UR \quad PW \quad g \cos\theta \sin\theta)$  (2) Maka, LQR membutuhkan semua state dalam plant tersedia untuk proses kontrol (dapat diukur atau  $Z = (W \quad PV \quad UQ \quad g \cos\theta \cos\theta)$  (3) diakses datanya). Jika tidak semua state ini bisa diperoleh, maka LQR dapat disertai dengan 2.2 Implementasi Alat observer/estimator untuk mengestimasi state-state Proses implementasi dilakukan dengan yang tidak dapat diukur berdasarkan model plant dan membuat wahana berupa pesawat tipe

flying output yang dapat diukur. wing yang terbuat dari bahan polyfoam dengan bentang pesawat  $\pm 120$  cm, dengan bobot 2. PEMBAHASAN sekitar 1 kg dengan sistem elektronik

### 2.1 Pesawat Tanpa Awak didalamnya.

Pesawat dilengkapi dengan actuator Pesawat tanpa awak adalah sebuah wahana yang berupa motor servo yang terletak pada kiri dan mampu terbang secara jarak jauh dikendalikan kanan sayap, serta sebuah motor brushless oleh pilot melalui remote kontrol, selain itu lengkap dengan propeller dibagian belakang mampu terbang secara mandiri menggunakan pesawat. Bentuk pesawat dapat dilihat pada sistem yang ditanamkan didalamnya. Ada gambar 1. beberapa jenis pesawat tanpa awak, salah satunya adalah pesawat tipe flying wing. Flying wing atau sayap terbang berbentuk segitiga dengan dilengkapi elevon sebagai kendali geraknya. Flying wing memiliki kemampuan gliding diudara, sehingga dapat terbang jauh menjelajah dengan membawa muatan. Ketika terbang, terjadi dua pergerakan sekaligus yang dialami pesawat, yaitu gerak translasi dan gerak rotasi. Model dinamika gerak flying wing dapat dilihat pada gambar 1. Gambar 1. Pesawat Flying Wing Gambar 1. Dinamika Gerak Pesawat Implementasi sistem elektronik ditunjukkan pada gambar 2, terdiri dari sensor accelerometer dan gyroskop sebagai pembaca sudut roll dan pitch, modul telemetri sebagai perangkat kirim dan penerima data, receiver remote sebagai penerima perintah terbang secara manual, serta mikrokontroler tency, sebagai pengolah data sensor yang didalamnya ditanamkan perangkat lunak dengan metode kendali LQR.

Gerak translasi pesawat terjadi pada tiga sumbu, yaitu vertika, horizontal, dan vertical. Penentuan gerak translasi berkaitan dengan Hukum Newton-Euler berdsarkan hokum kedua Newton.



Gambar 8.1

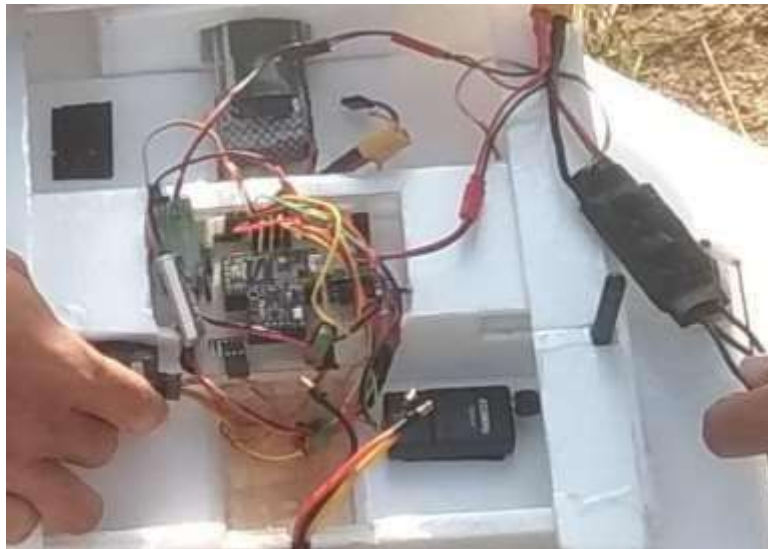


Gambar 8.2

dapat menghasilkan overshoot yang besar. Sebaliknya, jika nilai  $Q$  kecil, maka menghaikkan nilai umpan balik gain  $K$  yang kecil pula, sehingga respon pesawat menjadi lambat ketika memperbaiki sikap menuju set point. Pengujian gerak longitudinal pesawat dilakukan dengan memberikan gangguan sebesar  $20^\circ$  pada sudut roll. Ketika sudut roll pada pesawat diberikan gangguan, terjadilah penyimpangan set point dan terjadi gerak rolling kekiri dan kekanan. Gerakan kekiri kekanan yang terjadi merupakan multi overshoot yang dialami pesawat. Hasil pengujian gerak longitudinal pesawat Gambar 2. Implementasi Sistem Elektanis dimuat pada table 2. 2.3 Pengujian Sistem Tabel 2. Hasil Pengujian Pengujian sistem kendali LQR dilakukan dengan cara menerbangkan pesawat menggunakan Hasil remote kontrol untuk mengendalikan kecepatan Respon Sistem Spesfikasi Uji 1 Uji 2 Uji 3 motor pendorong pesawat, sedangkan Minimum pengendalian kestabilan sikap

menggunakan Rise Time  $0.8 \text{ } 0.9 \text{ } 0,7 < 1\text{s}$  algoritma LQR yang telah ditanamkan didalam (tr) mikrokontroler. Settling  $1.7 \text{ } 1.5 \text{ } 1.3 < 3\text{s}$  Sebelum pengujian sistem, dilakukan tuning Time (ts) pembobotan nilai konstanta Q yang bertujuan Overshoot  $4.46 \text{ } 4.33 \text{ } 4.28 < 4.50$  untuk memperoleh nilai gain umpan balik Undershoot  $2.27 \text{ } -3.38 \text{ } -3.17 > -4.50$  (feedback) terbaik. Hasil tuning nilai Q terbaik yang diperoleh ditandai pesawat terbang stabil Steady  $2.88 \text{ } 2.78 \text{ } 1.37 \pm 4.50$  dengan sudut roll dan pitch mendekati  $0^\circ$  Hasil nilai tuning Q yang menghasilkan respon umpan Setelah dilakukan tiga kali percobaan, respon balik K terbaik tersaji pada table 1. pesawat secara keseluruhan memiliki karakteristik yang memenuhi spesifikasi minimum. Berdasarkan tabel hasil percobaan, respon terbaik diperoleh pada Tabel 1. Tabel Konversi Q ke Gain K percobaan ketiga. Sesaat setelah diberikan gangguan, pesawat menyimpang dari setpoint dan Q K mengalami puncak overshoot sebesar  $4,28^\circ$  dengan rise time 0,7 detik, sistem juga mengalami  $1,01 \text{ } 0 \text{ } 0 \text{ } 0$  overshoot sebesar  $4,5 \text{ } 2,3 \text{ } 0 \text{ } 0$  undershoot sebesar  $-3,17^\circ$ . Pesawat memerlukan  $0 \text{ } 0 \text{ } 0 \text{ } 0 \text{ } 3,92 \text{ } 0 \text{ } 0$  waktu sebesar 1,3 detik untuk menuju setpoint. Metode kendali yang diterapkan pada pesawat, berhasil meminimalkan meminimalisir gangguan yang diberikan sehingga pesawat mampu Hasil tuning terbaik yang diperoleh berdasarkan mempertahankan kestabilan sikap. Kecendrungan table 1 adalah 1,01 untuk nilai  $Q\phi$  dan 3,92 untuk steady state error pesawat dalam mempertahankan  $Q\omega\phi$ , dengan nilai tersebut menghasilkan umpan sikap sebesar  $1,37^\circ$ . Analisa hasil pengujian respon balik gain K sebesar 4,5 dan mampu membuat system terbaik ditampilkan pada gambar 3. pesawat terbang stabil. Penguatan nilai Q berbanding lurus dengan perubahan nilai sudut dan Gambar 3. Karakteristik Gerak Longitudinal berpengaruh terhadap respon pesawat dalam memepertahan sikap mendekati set point. Semakin besar nilai Q maka menghasilkan nilai umpan bailk gain K yang besar pula, sehingga perubahan sudut semakin besar dan menyebabkan respon pesawat semakin cepat dalam memperbaiki keadaan, namun

233



Gambar 8.3

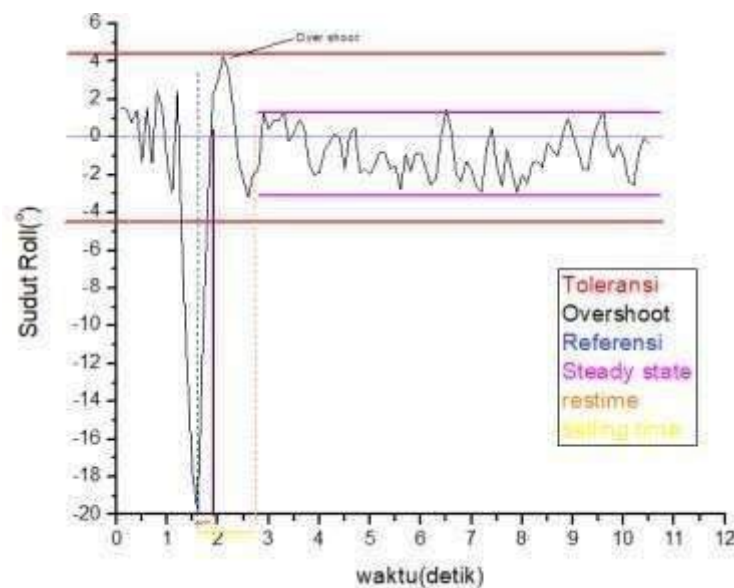
2.4 Metode LQR Metode LQR (Liner Quadratic Regulator) adalah metode kontrol berbasis ruang keadaan yang model dan bentuk kontrolernya berupa linier. Metode kontrol ini juga menggunakan hukum umpan balik keadaan. Persamaan persamaan sistem linier dan umpan balik keadaan dituliskan pada Variabel Variabel persamaan (4) hingga persamaan (6). Keterangan awal Penyesuaian  $\dot{x} = Ax + Bu$  (4)  $L \square 1$  Torsi roll  $u = Cx$  (5)  $M \square 2$  Torsi pitch  $u = -Kx$  (6)

$P \square \square \square$  Kecepatan Metode kendali ini bekerja berdasarkan dua buah sudut roll parameter yang harus ditentukan, yaitu matrks Q dan  $Q \square \square \square$  Kecepatan R agar diperoleh nilai K terbaik yang berpengaruh sudut pitch terhadap respon sistem [13]. Pembobotan matriks Q dan R dilakukan secara bertahap dimulai dari satu, selanjutnya ditambah ataupun dikurang sesuai dengan respon sistem. Persamaan torsi pesawat flying wing diperoleh dengan menurunkan persamaan (1) hingga persamaan (3), penyesuaian variabel untuk model pada penelitian ini tertulis dalam Table 3.

Tabel 3. Penyesuaian Variabel

persamaan gerak rotasi pesawat terhadap sumbu x dan y dapat dituliskan menjadi, Berdasarkan gambar 3 terlihat sistem mengalami . overshoot setelah diberikan gangguan, dan setelah  $\square 1 = I_{xx} \dot{p} + (I_{xz} - I_{yy}) \dot{r}$  (7) sistem steady terlihat adanya osilasi, keadaan . tersebut merupakan keadaan critical stable. Keadaan  $\square 2 = I_{yy} \dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}) \dot{r}$  (8) critical stable akan terus dialami oleh sistem, dan memiliki kecenderungan error mendekati batas atas . maupun batas bawah, tetapi masih dalam batas Dimana  $I_{xx}$  adalah inersia pada sumbu x toleransi yaitu  $\pm 4,5^\circ$ . Nilai rata-rata error tersebut pesawat, merupakan keadaan steady state error yang dimiliki . oleh sistem. Berdasarkan hasil pengujian yangtelah  $I_{yy}$

adalah inersia pada sumbu y, p adalah dilakukan, penerapan metode kendali LQR pada pesawat flying wing mampu meminimalisir percepatan sudut roll, q adalah percepatan gangguan pada sudut roll pesawat, terbukti dengan sudut pitch, dan r adalah yaw rate. pesawat mampu kembali ke keadaan stabil. Parametersistem yang digunakan untuk Kemampuan pesawat kembali kekeadaan setpoint pengendalian pesawat melibatkan 8 state, yaitu: membuktikan bahwa pengendalian sudut roll tersebut • Posisi x kecepatan translasi sumbu x (  $v_x$  ) berpengaruh terhadap kemampuan pesawat • Posisi y dan kecepatan trasnlasi sumbu y (  $v_y$  ) mempertahankan kestabilan sikap longitudinal. • Sudut roll (  $\phi$  ) dan kecepatan sudut roll (  $\dot{\phi}$  ) • Sudut pitch (  $\theta$  ) kecepatan sudut pitch (  $\dot{\theta}$  )



Gambar 8.4 Desain Wahana

Sehingga state space sistem dituliskan menjadi:

Wahana terbuat dari bahan polyfoam dengan ukuran bentang sayap 120 cm, dan bobot wahana sekita 1 kg. Wahana dilengkapi dengan sebuah motor servo pada masing-masing sayapnya sebagai aktuator pengendali gerak Persamaan (9) hingga (11) untk menghitung inersia elevon. Elevon berfungsi untuk mengatur gerak di masing-masing sumbu maneuver naik-turun serta belok kekiri dan kekanan. Selain itu wahana juga dilengkapi  $I_{xx} = 1/12 m (b^2+c^2)$  (9) dengan sebuah motor brushless dan sebuah  $I_{yy} = 1/12 m (a^2+b^2)$  (10) propeller yang berfungsi sebagai pendorong dari  $I_{zz} = 1/12 m (a^2 + c^2)$  (11) gerak wahana.

2.6 Perancangan Perangkat Lunak Rancangan diagram sistem kendali LQR seperti Perancangan sistem elektronis terdiri dari pada gambar 3 beberapa sensor dan receiver yang terhubung ke mikrokontroler .Hubungan antara bagian sistem elektronis pada penelitian ini ditampilkan pada pada gambar 5.

Mikrokont roler

Acceloromet 3.3 V Motor er PIN ESC PWM 1 Gyroscop Motor PIN Compass PWM 2

INTERRUPT Motor Barometer PIN Servo PWM 3 kiri GPS SERIA PIN Pemb agi ADC

Modul telemetri

SERIAL Receive r INTERR

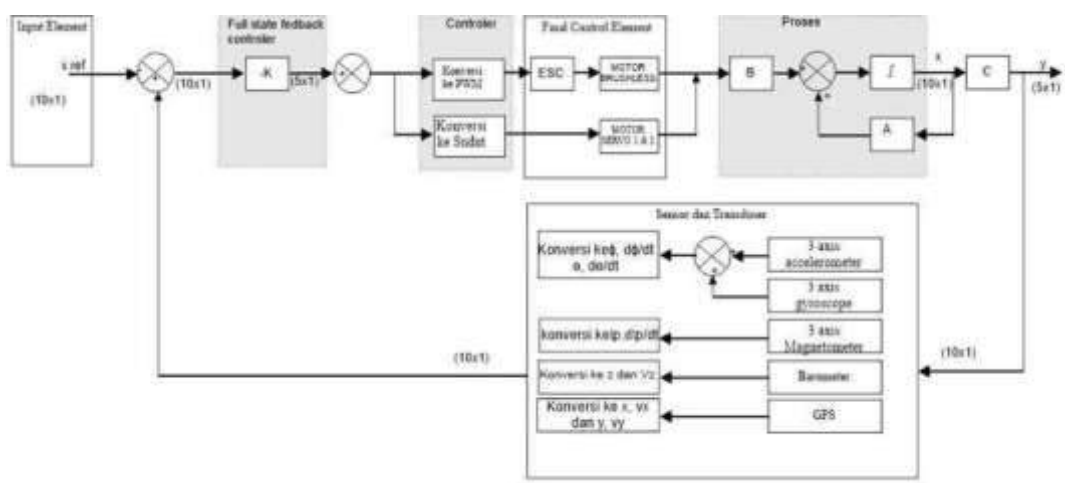
system 5 12 Gambar 3 . Rancangan Digram Blok Sistem volt volt Gambar 4. Arsitektur Sistem 2.5 Perancangan Sistem Sistem mekanik pada penelitian ini berupa Sensor-sensor yang digunakan dalam sistem pesawat jenis flying wing, rancangan bentuk elektronik antara lain akselerometer, giroskop, wahana terlihat seperti gambar 4. kompas dan barometer. Sensor akselerometer dana giroskop menghasilkan data berupa sudut roll dan pitch, sedangkan sensor kompas digunakan untuk mengatur heading serta untuk

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

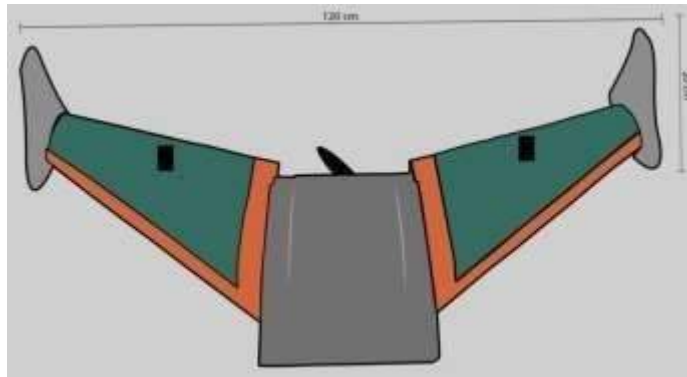
$$y = Cx + Du$$

$$\begin{bmatrix} U \\ U \\ V \\ V \\ P \\ P \\ Q \\ Q \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (I-I)r & \phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I-I}{I_{xx}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ \phi \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ \theta \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_{yy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ L \\ M \end{bmatrix}$$

Gambar 8.5



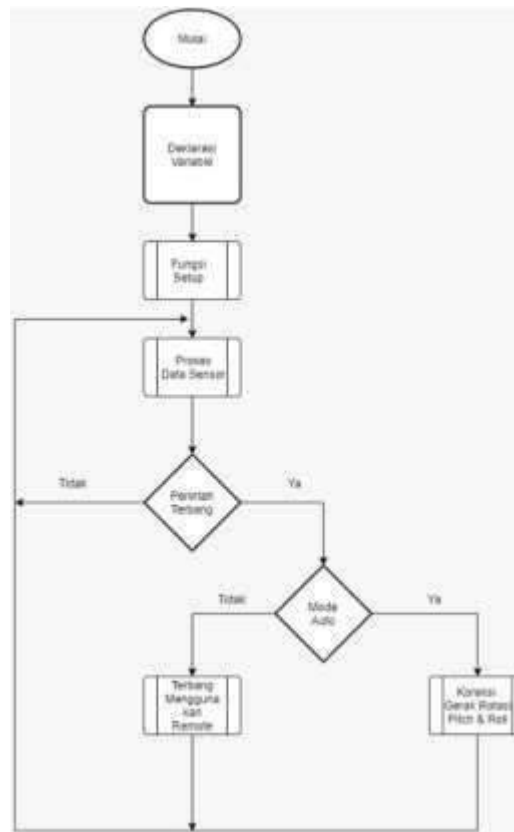
Gambar 8.6



*Gambar 8.7*

navigasi pesawat. Sensor barometer digunakan untuk memberikan data ketinggian pesawat. Pada bagian pengolah algoritma digunakan mikrokontroler ARM Cortex-M4 dengan kecepatan komputasi 72 MHz. Pada bagian aktuator menggunakan motor brushless dengan spesifikasi 1400 yang berfungsi sebagai pendorong, dan 2 buah servo sebagai kendali elevon.

2.7 Perancangan Sistem Elektronik Perangkat lunak pada penelitian ini menggunakan bahasa pemrograman C++ dengan compiler Arduino IDE. Sistem akan memasuki kondisi awal untuk memulai akses sensor, pembacaan telemetri, remote kontrol, dan aktuator. Selanjutnya, sistem melakukan pengecekan apakah wahana sudah siap untuk diterbangkan dengan mengubah mode pada remote kontroler. Program utama akan memeriksa subprogram yang digunakan untuk memberi perintah apakah wahana akan terbang secara manual menggunakan pilot atau terbang secara autopilot. Jika pesawat terbang dengan Gambar 5. Flowchart Program mode autopilot, maka program akan melakukan 3 KESIMPULAN perhitungan untuk kondisi yang dikendalikan. Program sistem pesawat utama ditampilkan Berdasarkan hasil pengujian dapat flowcart pada gambar 5. ditarik kesimpulan bahwa metode kendali LQR yang diterapkan pada pesawat flying wing untuk mengendalikan sudut roll mampu membuat pesawat mempertahankan sikap longitudinal. Terbukti dengan keadaan pesawat mampu kembali kekeadaan semula setelah diberikan gangguan. Pesawat flying wing mampu mempertahankan sikap longitudinal dengan kecendrungan steady state error sebesar  $1,37^\circ$  dengan batas atas  $1,46^\circ$  dan batas bawah  $-2,64^\circ$ . Respon sistem yang dialami pesawat masih memenuhi spesifikasi kebutuhan minimal sistem yang diinginkan, yakni overshoot yang terjadi sebesar  $4,28^\circ$ , rise time 0,7 detik, dan settling time 1,3 detik. Pada penelitian selanjutnya perlu ditambahkan pengendalian ketinggian pesawat, agar pesawat mampu mempertahankan kestabilan sikap serta tetap bertahan pada ketinggian.



Gambar 8.8

## Daftar Pustaka

- [1] Realdo, AM, Nugraha, AT and Misra, S. "Design and Development of Electricity Use Management System of Surabaya State Shipping Polytechnic Based on Decision Tree Algorithm." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2021
- [2] Amrullah, MU, Agna, DIY, Asri, P, Darmajanti, P and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Monitoring Kualitas Air Tambak Udang Vaname Dengan Kontrol Paddle Wheel Berbasis Mikrokontroller." Jurnal 7 Samudra 8.2, 2023, pp. 117-122.
- [3] Nugraha, AT and Arifuddin, R. "O2 Gas Generating Prototype In Public Transportation."
- [4] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Prototype Design of Carbon Monoxide Box Separator as a Form of Ar-Rum Verse 41 and To Support Sustainable Development Goals Number 13 (Climate Action)." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2021
- [5] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Prototype hybrid power plant of solar panel and vertical wind turbine as a provider of alternative electrical energy at Kenjeran beach Surabaya." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2020
- [6] Ainudin, FH, Ashlah, MB and Nugraha, AT. "Pengontrol Kecepatan Respon Motor dengan Pid dan Lqr." Seminar MASTER PPNS 7.1, 2022
- [7] Nugraha, AT, Asri, P, Putra, ZMA, Sunarno, E, Eviningsih, RP, Indaryani, S and .... "Buku Bidirectional DC-DC Converter Dalam Pembangkit Listrik Tenaga Bayu.", 2024
- [8] Nugraha, AT, Ramadhan, MF and Shiddiq, MJ. "Distributed Panel-based Fire Alarm Design." JEEMECS (Journal of Electrical Engineering, Mechatronic and Computer Science ..., 2022
- [9] Zaldi, HF, Subiyanto, L and Nugraha, AT. "Sistem Monitoring Pengujian Tekanan pada Pipa Air PVC Berbasis Arduino dan IoT." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 11.2, 2021, pp. 40-48.

- [10] Nugraha, AT, Apriani, M, Utomo, AP, Sari, DP and Sobhita, RA. "Buku Converter DC-DC Sebagai Alat Konversi Daya Listrik Searah (DC).", 2024
- [11] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Setiawan, J, Rochmawati, NW, Sena, AI and .... "PERANCANGAN BUCK-BOOST CONVERTER UNTUK CHARGING BATERAI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 3.1, 2023, pp. 22-33.
- [12] Nugraha, AT, Anshory, I and Rahim, R. "Effect of alpha value change on thrust quadcopter Qball-X4 stability testing using backstepping control." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 434.1, 2018, p. 12207.
- [13] Firdaus, AA, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Design and Development of a Prototype System for Temperature and Water Level Control in an Extruder Machine." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 1.1, 2023, pp. 1-7.
- [14] Rahmatullah, RMN, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Permodelan Matematis Sistem Motor DC MOOG C34-L70 Orde Satu dan Orde Dua." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 4.1, 2025
- [15] Lumintang, AADC, Yuniza, SI, Hidayat, EP, Nugraha, AT and Indarti, R. "Rancang Bangun Pendeteksi Kebakaran Dini Pada Kapal Ikan Berbasis IoT Dengan Komunikasi LoRa." *Jurnal 7 Samudra* 8.1, 2023
- [16] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF and Ainudin, FH. "Comparative Analysis of Buck-Boost Converter with Sepic Converter for Optimization of Wind Power Plant Output Voltage." *International Conference on Applied Science and Technology on Engineering ...*, 2024
- [17] Nugraha, AT, Saputra, DBD, Sobhita, RA and Ashlah, MB. "Photovoltaics Concept Integrated on the Grid With the STT-PLN Building." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 1.1, 2024, pp. 12-16.
- [18] Nugraha, AT, Wahyudi, LA, Agna, DIY and Novsyafantri, N. "Simulasi Pengaturan Kecepatan Motor DC Seri dengan Menggunakan Penyearah Terkendali." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 13.1, 2023, pp. 9-20.
- [19] Ferdinandus, AR Andrew, Nugraha, AT and Jamaaluddin, J. "Setting Neuro-Fuzzy PID Control In Plant Nonlinear Active Suspension." *Journal of Physics: Conference Series* 1114.1, 2018, p. 12063.
- [20] Fatqurrochman, MI, Saputra, DE and Nugraha, AT. "Performance Analysis of C23-L54 Series DC Motors in K3 System Using LQR Tracking Controller for Improved Operational Efficiency and Safety." *Journal of Safety, Health, and Environmental Engineering* 3.2, 2025, pp. 1-9.

## BAB IX

# Sistem Kontrol LQR-PID sebagai Pengendalian Laju Mesin Penggilingan Kopi

Oleh: **Rizky Wahyuanto**

*Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*

**Kata Kunci:** *control system, proportional integral derivative controller (PID), linear quadratic regulator (LQR), coffee milling machine*

Paper ini menjelaskan tentang aplikasi sistem kontrol pada kendali kecepatan mesin penggilingan kopi. Metode kontrol yang digunakan dalam sistem ini adalah kontrol proporsional integral derivatif (PID) dan Kontrol Linear Quadratic Regulator (LQR). Semua proses kontrol dan akuisisi data dilakukan dengan menggunakan komputer (PC). Pengujian sistem telah dilakukan untuk mengontrol kecepatan mesin penggilingan kopi. Pengujian dilakukan dengan beberapa variasi parameter kontrol PID dengan input berupa fungsi step. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa parameter sistem kontrol kecepatan mesin penggilingan kopi adalah  $K_p = 90$ ,  $K_i = 75$  dan  $K_d = 0,96$ . Kata Kunci: sistem kontrol, kontrol proporsional integral derivatif (PID), kontrol linear quadratic regulator (LQR), mesin penggilingan kopi

**ABSTRACT** This paper describes the application of a control system on the speed control of a coffee milling machine. The control methods used in this system are proportional integral derivative control (PID) and Linear Quadratic Regulator (LQR) control. All control processes and data acquisition is run by using a personal computer (PC). Experiment was done by control the speed of the coffee milling machine.. Experiment was also done by using various PID control parameter in which the input signal is step function. Experiment results show that the parameters of the coffee milling machine speed control system are  $K_p = 90$ ,  $K_i = 75$  and  $K_d = 0.96$

1. PENDAHULUAN ketiga dari Paper ini akan ditutup dengan Dalam Era Industri 4.0 dan Era Globalisasi ini, kesimpulan yang didapatkan. sektor Industri menjadi bagian yang sangat penting bagi kemajuan Bangsa Indonesia, khususnya 1.1 Kontrol Proporsional Integral Derivatif dibidang ekonomi. Dengan pemanfaatan teknologi (PID) lebih dari tenaga manusia, sektor Industri Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID) berkembang sangat pesat. Semakin bertambahnya merupakan kontroler yang menggabungkan tahun, semakin dibutuhkannya sistem kontrol yang kontroler proporsional, integral, dan derivatif. lebih baik

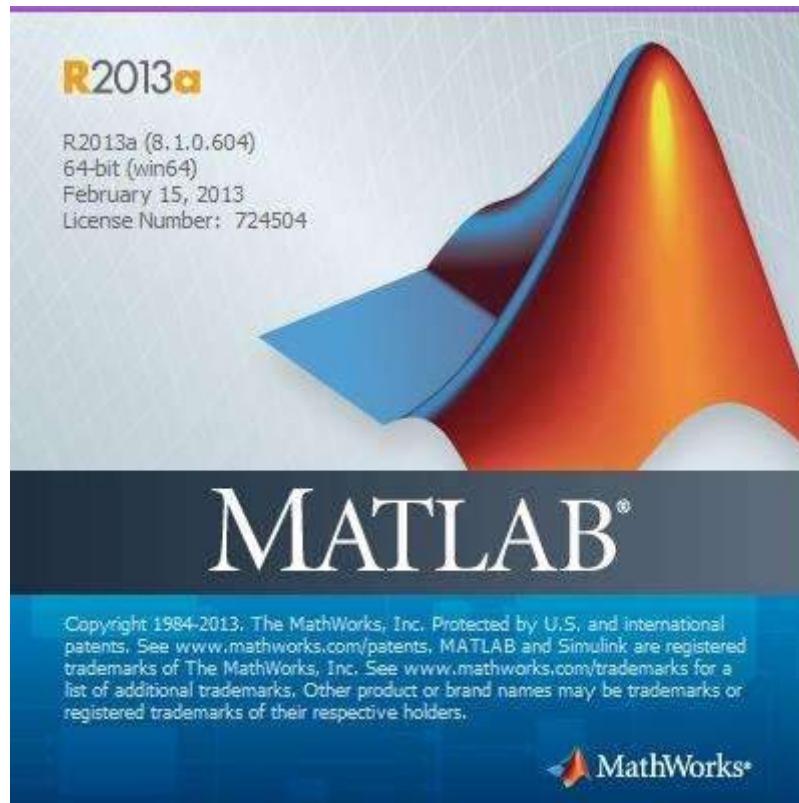
demikian kelangsungan dan peningkatan Kontroler ini direpresentasikan dengan persamaan efisiensi produksi. Maka dari itu Paper ini disusun sebagai berikut [1]: demi dapat memberikan kontribusi dan manfaat  $K_p \int e(t) dt$  dalam dunia industri. Dalam Paper ini akan menjelaskan tentang  $m(t) = K_p \cdot e(t) + T_i \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}$  (1)

penggunaan Sistem Kontrol Proporsional Integral Dimana  $K_p$  adalah konstanta Proporsional,  $T_i$  adalah Derivatif (PID) dan Kontrol Linear Quadratic waktu Integral, dan  $T_d$  adalah waktu Derivatif. Regulator (LQR) sebagai pengendali kecepatan Persamaan 1 merupakan persamaan dalam domain mesin penggilingan kopi di kompleks Perumahan waktu. Untuk memudahkan penulisan dalam Firdaus Regency. Sistem kontrol PID, LQR, dan program, maka persamaan 1 dikonversikan kedalam pengenalan Software Matlab akan dibahas pada bentuk diskrit, dengan menggunakan finite bagian pendahuluan dari makalah ini. Lalu pada differential orde pertama yang dipresentasikan bagian kedua dari Paper ini akan dibahas tentang dalam persamaan berikut : pemaparan sistem yang dirancang dan pemaparan  $Df = f - f_k - 1$  hasil pengujian yang telah dilakukan. Pada bagian  $|k| < 1$  (2)

$R =$  matriks definit positif,  $S =$  matriks semi definit  $\int e(t) dt = \int e_k \cdot \Delta t$  (3) positif.

Sehingga persamaan 1 menjadi : 1.3 Software MATLAB  $\int e = \int e_n - 1 - 1_n$  Matrix Laboratory (MATLAB) adalah sebuah  $m \times n$   $K_p \int T_d n = \int e_k \cdot \Delta t$  (4) program untuk menganalisis dan mengkomputasi  $\int T_i k = 0$  data numerik, juga merupakan suatu bahasa Dimana : pemrograman matematika lanjutan, yang dibuat  $T_s T_d$  dengan dasar pemikiran yang menggunakan sifat  $K_i = K_p$  dan  $K_d = K_p$  dengan  $\Delta t = T_s$  dan bentuk matriks. MATLAB memiliki sifat  $T_i T_s$  extensible, yang berarti bahwa pengguna dapat Apabila  $S_n = S_{n-1} - e_n$  (5) menulis fungsi baru untuk menambahkan pada library ketika fungsi-fungsi built-in yang tersedia Maka persamaan kontroler PID dalam bentuk diskrit tidak dapat melakukan tugas tertentu. Kemampuan adalah sebagai berikut:  $m \times n = K_p \cdot e_n - K_i \cdot S_n - K_d \cdot \frac{e_n - e_{n-1}}{\Delta t}$  pemrograman yang dibutuhkan tidak terlalu sulit (6) bila kita telah memiliki pengalaman dalam Dimana  $S_n =$  jumlah error,  $S_{n-1} =$  jumlah error pemrograman bahasa lain seperti C, PASCAL, atau FORTRAN. sebelumnya,  $e_n =$  error sekarang,  $e_{n-1} =$  error sebelumnya,  $m_n =$  output sekarang. Persamaan transfer function dari motor DC adalah sebagai berikut :  $K_t (7) = \frac{L}{J} s + \frac{L}{b} R = \frac{J}{s} + \frac{R}{b} K_t = K_e$  (2)

1.2 Kontrol Linear Quadratic Regulator (LQR) Untuk mendapatkan kriteria performansi yang diinginkan yang memenuhi batasan fisik merupakan tujuan dalam kendali optimal. Permasalahan regulator akan diselesaikan dengan menggunakan metode kendali optimal pada sistem linear dengan kriteria kuadrat. Dikatakan linear karena model serta bentuk kontrolernya berupa linear sedangkan Gambar 1. Icon Matlab kuadratik karena memiliki Cost Function yaitu kuadrat dan karena referensi sistem bukan fungsi Matlab dibuat dan dikembangkan oleh Mathwork waktu maka disebut regulator [2]. pada tahun 1970. Software Matlab banyak Didapatkan hasil linearisasi dari suatu plant linear digunakan dalam bidang yang membutuhkan dalam bentuk: perhitungan matematika yang rumit, yang mana  $x' = Ax + Bu$  seluruh operasi perhitungan dalam Matlab berupa (8) operasi matrik. Matlab dapat menampilkan hasil  $y = Cx$  perhitungan dalam bentuk plot grafik dan dapat juga Dimana  $A =$  Matriks sistem,  $B =$  Matriks input,  $C =$  dirancang menggunakan GUI (Graphical User Interface) yang kita rancang. Pada software Matlab Matriks output,  $y =$  state output,  $x =$  state sistem,  $u$  terdapat beberapa bagian penting yang digunakan = state input. dalam menjalankan program yaitu: Penentuan Matriks nilai  $Q$  dan  $R$  merupakan nilai a) Command window digunakan untuk yang akan ditentukan terlebih dahulu dalam mengetik fungsi yang diinginkan. perancangan pengendali optimal LQR. Ketika didapatkan matriks  $Q$  dan  $R$  maka selanjutnya b) Command history berfungsi agar fungsi menentukan indeks performansi sistem. Penggunaan yang telah digunakan sebelumnya dapat indeks performansi ditentukan sesuai dengan kriteria digunakan kembali. dari harga matriks  $Q$  dan  $R$  [2]. c) Workspace digunakan untuk membuat variabel yang ada dalam Matlab.  $J = \int_{t_0}^{t_f} (x^T Q x + u^T R u) dt$  (9) Simulink-Matlab adalah kumpulan aplikasi dalam Matlab untuk melakukan modeling, simulasi, dan Dengan syarat: untuk melakukan analisis dinamik pada suatu sistem.  $S \geq 0, Q \geq 0, R \geq 0$  Program simulink memudahkan user untuk membuat (10) suatu simulasi lebih interaktif. Tiruan sistem Dimana  $t_0 =$  waktu awal,  $\tau =$  waktu akhir,  $x(\tau) =$  diharapkan mempunyai perilaku yang sangat mirip matriks state akhir,  $Q =$  matriks semi definit positif, dengan sistem fisik. Jika digunakan dengan benar,



Gambar 9.1 Grafik Setekah dipasang PID

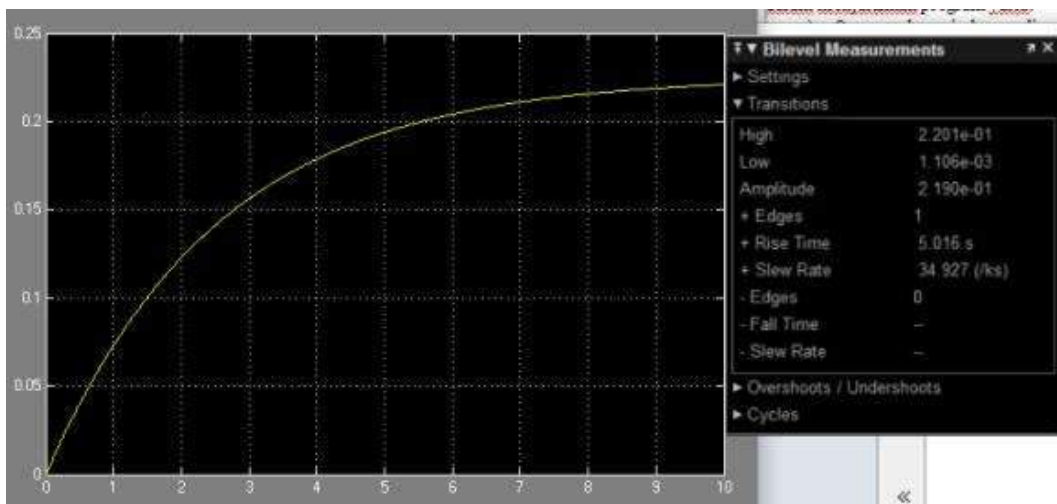
simulasi akan membantu proses analisis dan desain Untuk membuat Rise time menjadi kurang dari 1 sistem. detik, dengan cara menggunakan Kontrol PID. Dengan memasang Kontrol PID dan mengatur nilai 2. PEMBAHASAN  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  nya, maka Rise time dari Motor DC 2.1 Perangkat Keras tersebut dapat diatur menjadi lebih kecil. Motor yang digunakan sebagai mesin penggiling Pemasangan kontrol PID akan membuat rangkaian kopi yang akan di pasang Kontroler atau dari yang sebelumnya Open Loop menjadi Close Kendali adalah Motor DC dengan spesifikasi atau Loop. parameter sebagai berikut: Momen inersia dari rotor ( $J$ ) = 0.18 Kg.m<sup>2</sup>, konstanta gesekan motor ( $b$ ) = 0.0055 N.m.s, konstanta gaya gerak listrik ( $K_e$ ) = 1 V/Rad/sec, konstanta torsi motor ( $K_t$ ) = 0.01 N.m/Amp, hambatan motor ( $R$ ) = 6.25  $\Omega$ , Induktansi listrik ( $L$ ) = 0.024 H. Dengan menggunakan Gambar 5. Rangkaian Close Loop Kontroler PID dan LQR akan menaikkan Rise Time- Dengan mengubah  $K_p$  menjadi 90,  $K_i$  menjadi 75, nya (Waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk naik dan  $K_d$  menjadi 0.96, maka didapatkan grafik yang dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95%, atau 0% stabil dengan overshoot yang tidak melebihi angka sampai 100% dari harga akhirnya). 5% (lonjakan tertinggi).

2.2 Simulasi menggunakan Matlab Memasukkan semua data spesifikasi atau parameter motor kedalam kodingan matlab untuk mencari transfer function dari motor tersebut. Dengan menggunakan rumus (7) maka akan ditemukan hasil dari transfer function yang dibutuhkan.

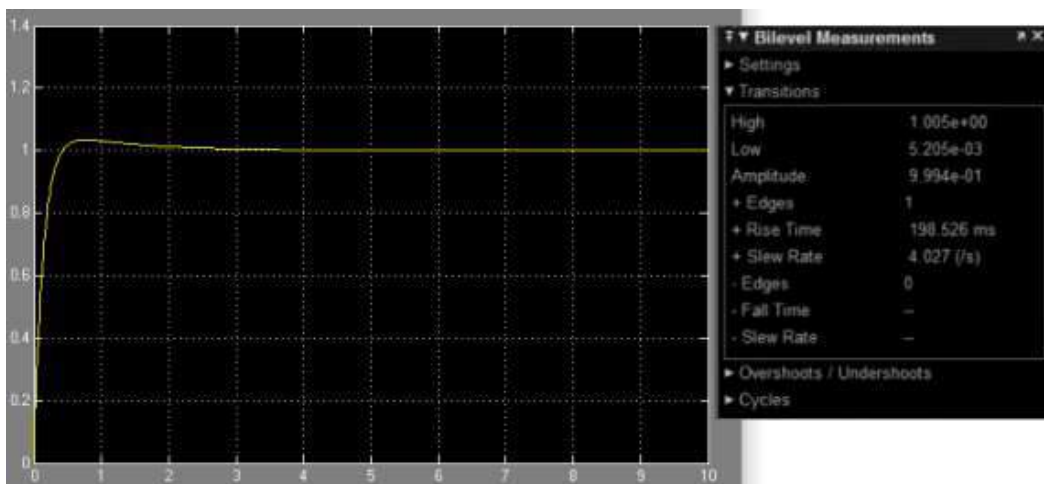
3. KESIMPULAN Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa sistem kontrol PID yang dibuat mampu mengontrol kecepatan Rise time dari motor DC. Secara umum untuk aplikasi yang telah dibuat, semakin kecil harga Rise time maka hasil Gambar 2. Hasil Coding Pada Matlab penggilingan kopi akan semakin optimal. Setelah didapatkan data hasil transfer function PUSTAKA selanjutnya data tersebut akan dimasukkan kedalam rangkaian pada Simulink Matlab. [1] Stuart Bennet, "Real Time Computer Control An Introduction," Hertfordshire: Prentice Hall International (UK) Ltd, 1988. [2] Ogata, Katsuhiko. "Teknik Kontrol Automatik," Edisi 2 Jilid 1. Jakarta : Prentice Hall, 1970.

Gambar 3. Rangkaian Open Loop Setelah dilakukan Run, hasil pada scope menunjukkan kalau Rise time-nya sangat tinggi, berada di angka 5 detik.

Gambar 4. Grafik Sebelum Dipasang PID



Gambar 9.2



Gambar 9.3

## Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT and Febrianti, C. "Prototype of Ship Fuel Monitoring System Using NodeMCU." *Journal of Marine Electrical and Electronic Technology* 2.1, 2024, pp. 54-62.
- [2] Negeri, ATNPP and Negeri, MJSPP. "Comparison of Insulated Switch Gear with Desiccant Addition to SF6 Gas Quality System at Waru Substation."
- [3] Nugraha, AT, diyah, AS, Yuniza, DIYASI, ad, RFA, Shiddiq, MJ and Indaryani, S. "Sepeda Treadmill: Inovasi Dan Desain." ID Patent EC00,202,322,957, 2023
- [4] Purwanti, EP, Nugraha, AT, Sobhita, RA and Rivanda, DD. "PENGENDALI MOTOR DC INDUSTRI BERBASIS PSIM DAN PENYEERAH SATU FASA."
- [5] Firdaus, AA, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Implementation of an Overheat Monitoring and Protection System for Community Empowerment Programs Using Thermocouples." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1, 2025
- [6] Saputra, FY. "Representasi Matematis dan Simulasi Sistem Dinamik Motor DC054B-6." *Conference of Electrical, Marine and Its Application* 4.1, 2025
- [7] Zakariz, NP, Nugraha, AT and Phasinam, K. "The Effect of Inlet Notch Variations in Pico-hydro Power Plants with Experimental Methods to Obtain Optimal Turbine Speed." *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ...*, 2022
- [8] Syaifudin, MM, Saputra, DE and Nugraha, AT. "Single-phase Half-wave Uncontrolled Converter with A Single-phase AC Generator." *MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology* 2.2, 2025, pp. 13-19.
- [9] Realdo, AM, Nugraha, AT and Misra, S. "Design and Development of Electricity Use Management System of Surabaya State Shipping Polytechnic Based on Decision Tree Algorithm." *Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ...*, 2021
- [10] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "PENYEERAH SATU FASE TERKENDALI GLOMBANG PENUH BEBAN RESISTIF." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 46-51.
- [11] Nugraha, AT, IA, MI, Yuniza, SI and Novsyafantri, N. "Penyearah Setengah Gelombang Tiga Fasa Tak Terkontrol Menggunakan Motor Induksi Tiga Fasa." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 11.2, 2021, pp. 78-88.
- [12] Rohman, A, Nugraha, AT, Rachmadillah, DA, Hidayah, E and Herdiansyah, Y. "SKKD NO. 297/UN25. 5.1/TU. 3/2016." *AKSELERASI BUDIDAYA IKAN LELE DENGAN PENAMBAHAN SISTEM KONTROL KEKERUHAN KOLAM."*, 2016
- [13] Apriani, M, Nugraha, AT, Cahyono, L, Utomo, AP and Firnandi, R. "Coastal Community Empowerment: Recovery Of Cockle Shell Waste Into Eco-friendly Artificial Reefs In Mutiara Beach Trenggalek Indonesia." ID Patent EC00,202,300,070, 2023
- [14] Amelia, SR, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Prototipe Sistem Automatic Switch pada Sistem Redundant Pump Cooling Tower Berbasis Mikrokontroler." *Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro* 10.2, 2020, pp. 52-60.
- [15] Utomo, AP, Angga, ATN, Pambudi, DSA and Priyambodo, D. "Battery Charger Design with PI Control Based on Arduino Uno R3." *Applied Technology and Computing Science Journal* 4.2, 2021, pp. 78-90.
- [16] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "SISTEM KENDALI LQR DAN PID PADA ALAT PENERING BIJI KOPI." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 83-87.
- [17] Muttaqin, IM, Yuniza, SI and Nugraha, AT. "Performance Analysis of a Single-Phase Controlled Half-Wave Rectifier Applied to AC Motor." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 2.2, 2024, pp. 1-10.
- [18] Rivanda, DD, Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Penyetelan PID untuk Pengendalian Kecepatan Motor DC." *Seminar MASTER PPNS* 10.1, 2025, pp. 294-305.
- [19] Nugraha, AT, Jami'in, MA, Budiawati, R, Rahmat, MB, Darmajanti, P and .... "Rancangan Listrik Kapal." ID Patent EC002,023,136,593, 2023

- [20] Nugraha, AT. "Robot Pengurai Asap Dalam Ruangan Menggunakan T-Box Dengan Metode Behaviour Based Control." Prosiding SENIATI 3 (1), B10., 2017, pp. 1-6.

## BAB X

### Pengendalian Penyearah Terkendali Satu Fasa pada Motor AC

#### Abstrak

*Electrical energy is one of the most important elements in this world. Humans are very dependent on electrical energy and so that electrical energy can be used properly, a reliable electrical energy generation system is needed. One of the electrical devices, namely an AC generator, an AC generator functions to convert mechanical power into alternating current electric power. This generator is often referred to as an alternator. The working principle of the generator is to take advantage of the change in type flux as stated by Faraday's law of induction. The rate of change of flux in a loop will be proportional to the induced emf that occurs between the ends of the loop of a conductor. If the rate of change of flux is expressed in weber/second, then the electromotive force will be expressed in volts. The effect of load current on the output voltage of a 3-phase AC generator. The supply on this module uses a power supply as a source to drive a DC motor on a 3-phase AC generator using a pulley. Numpad is used to enter the desired output voltage in the range of 6V – 12V, and if there is a change in load, the output voltage will automatically change too. With PSIM software we can plan a system to make a 1 phase AC voltage regulator with a 3 phase AC generator. Simulation using PSIM simplifies system design in the field and can save many things, such as time, effort, cost and risk in the event of a failure. With PSIM software we can plan a system to make a 1 phase AC voltage regulator with a 3 phase AC generator. Simulation using PSIM simplifies system design in the field and can save many things, such as time, effort, cost and risk in the event of a failure. With PSIM software we can plan a system to make a 1 phase AC voltage regulator with a 3 phase AC generator. Simulation using PSIM simplifies system design in the field and can save many things, such as time, effort, cost and risk in the event of a failure. Keywords: 3 phase AC generator, AC voltage regulator*

Abstract: Electrical energy is one of the most important elements in this world. Humans are very dependent on electrical energy and so that electrical energy can be used properly, a reliable electrical energy generation system is needed. One of the electrical devices, namely an AC generator, an AC generator functions to convert mechanical power into alternating current electric power. This generator is often referred to as an alternator. The working principle of the generator is to take advantage of the change in type flux as stated by Faraday's law of induction. The rate of change of flux in a loop will be proportional to the induced emf that occurs between the ends of the loop of a conductor. If the rate of change of flux is expressed in weber/second, then the electromotive force will be expressed in volts. The effect of load current on the output voltage of a 3-phase AC generator. The supply on this module uses a power supply as a source to drive a DC motor on a 3-phase AC generator using a pulley. Numpad is used to enter the desired output voltage in the range of 6V – 12V, and if there is a change in load, the output voltage will automatically change too. With PSIM software we can plan a system to make a 1 phase AC voltage regulator with a 3 phase AC generator. Simulation using PSIM simplifies system design in the field and can save

many things, such as time, effort, cost and risk in the event of a failure. With PSIM software we can plan a system to make a 1 phase AC voltage regulator with a 3 phase AC generator. Simulation using PSIM simplifies system design in the field and can save many things, such as time, effort, cost and risk in the event of a

failure. With PSIM software we can plan a system to make a 1 phase AC voltage regulator with a 3 phase AC generator. Simulation using PSIM simplifies system design in the field and can save many things, such as time, effort, cost and risk in the event of a failure.

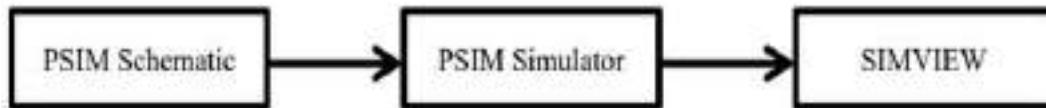
Keywords: AC generator 3 phase, AC voltage regulator

1. INTRODUCTION Electrical energy is very important in all human life to improve the welfare of life. Development and application of alternative renewable electrical energy generation systems by utilizing several energy sources such as: water, wind, and solar as well as for battery charging systems. One of them is obtained by converting mechanical energy into electrical energy through a device known as a synchronous generator. Because this involves the conversion of mechanical energy, it is necessary to know or add insight into how generators convert energy in order to face challenges in the field of renewable energy as expected in their scope of work.

2. LITERATURE REVIEW 2.1. AC Generator Alternating current generators are often referred to as synchronous generators or alternators. Alternating current generators provide a very important link in the process of converting energy from coal, oil, gas, or uranium into forms that are useful for industrial or household use. In a small low-voltage alternating current generator, the field is placed on the rotating part or rotor and the armature winding on the stationary part or stator of the machine. 2.1.1. AC Voltage Regulator For energy transfer, two types of controllers are commonly used: On-off control and Phase angle control. In the on-off control, the thyristor switch connects the load to the ac source for some cycles of the input voltage and is disconnected for several other turns. In phase angle control, the thyristor switch connects the load to an ac source for each part of the input voltage cycle. So when compared to on-off control, phase angle control can provide a full range of voltage regulation. 2.1.2. PID Control System PID Control System (Proportional - Integral - Derivative controller) is a controller to determine the precision of an instrumentation system with the characteristics of the presence of feedback on the system. Feedback. The PID control system consists of three ways of setting it, namely PID control, with each having advantages and disadvantages. In its implementation, each method can work alone or a combination of them. In designing the PID control system, what needs to be done is to adjust

the parameters P, I or D so that the system output signal response to a certain input is as desired. 2.1.3. PSIM PSIM is a computer software used to design and simulate various kinds of power electronics and motor control circuits. PSIM provides a precise simulation system for analyzing power converters, designing control loops and motor control systems

Image 1 how the PSIM software works



*Gambar 10.1*

3. METHOD The research method used in this study is to use PSIM and make direct measurements using a multi meter measuring instrument □ Research Tools This research uses the following tools 1. Windows 10 64 bit laptop 2. PSIM Software □ Research variable

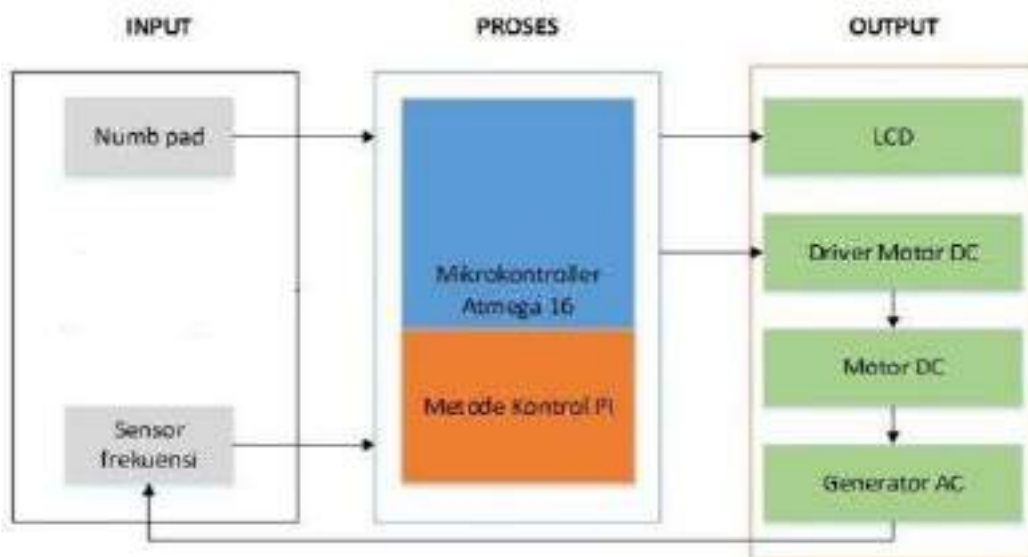
Research variables that need to be considered in this study are:

1. Induction motor rotation speed (Rpm)
2. Anchor Voltage (vlot)
3. Armature Current (Amperes)

### 3.1 System Block Diagram

Figure 2 System Block Diagram

The following explains the function of each system block diagram in Figure 1: 1. Numb Pad Used to enter the value of the set point frequency and DC motor running. 2. Frequency Sensor Used for read frequency from generator, using a zero-cross detector circuit. 3. ATmega 16 . Microcontroller As a controller of the circuit work system through software. 4. LCD Used to display setpointas well as indicatorfrequency and PWM supply at that time. 5. Motor Driver



Gambar 10.2

Serves to drive the motor in accordance with commands from the controller. 6. DC Motor Serves as a driver for the AC generator by mechanically in this case using a pulley. 7. 3 phase AC generator The actuator generates frequency and is controlled using a DC motor rotational speed which is controlled through the motor driver.

4. RESULTS AND DISCUSSION 4.1 Research result DC Motor Driver Circuit Testing Testing the DC motor driver circuit is done by changing the PWM value of the Atmega16 Micocontroller from 0 to 255, and the DC motor is given a voltage of 24 VDC. Tabael 1 shows the change in the frequency of the AC generator that has been coupled with a DC motor based on changes in the PWM value of the Atmega16 microcontroller. The higher the PWM value, the frequency of the no-load generator also increases. While table 2 shows the change in the output voltage to the change in frequency. As the frequency increases, the output voltage will also increase.

Table 1 DC Motor Driver Test Results Table Generator Frequency (No Load) PWM 0 0 50 20 100 112 150 169 200 200 250 221

#### 4.2 Zerocross Sensor Testing

Atmega16 microcontroller testing aims to determine whether the minimum circuit Atmega16 system is functioning properly or not. The test results can be seen in table 3 below:

Table 3 Zerocross Sensor Test Results Table Sensor(Hz) Oscilloscope (Hz) PWM Error (%) 0 0 0 72 50 50.3 0.5964 78 60 63.3 5.2132 84 70 71.2 1.8232 90 80 80.4 0.4975 95 90 91 1.0989 98 100 100.8 0.7936

The results of the zerocross sensor test prove that there are differences in the results of the sensing sensor and oscilloscope. The average of the error of each sensing to changes in PWM is 1.6704%. This shows that the error can still be tolerated and the zerocross is feasible to use. In addition, the results of the sensing sensor displayed on the LCD cannot display a definite value, always changing but within a certain range. The results of sensing on the oscilloscope are also the same. This causes the error, but not too big.

4.3 Testing the Ziegler-Nichols PI Oscillation Method at Generator Frequency Testing the Ziegler-Nichols PI oscillation method at the generator frequency is carried out by entering  $K_p$  with a value of 0.45 and  $K_i$  with a value of 0.27 obtained through the previous method in Chapter 3, and analyzing the frequency response of the generator given the PI method. It aims to determine whether this method is better or less good when compared to no control

a.)  $K_p = 0.45$ ,  $K_i = 0.27$ , setpoint 50Hz, no load

Set point : 50 Hz

60 50 frequency (Hz)

40 30 20 10 0

1 7 1319253137434955616773798591 Times (ms)

Figure 3 No Load Controlled Generator Frequency Response (50Hz Setpoint)

Figure 3 shows that the frequency of the generator with no-load control starts at a steady state at peak time ( $t_p$ ) 700ms. This is because the DC motor coupled with the generator experiences heavy starting. In addition, the graph also shows that the generator frequency at steady state is not right at the 50Hz setpoint, but always oscillates between 45Hz to 56Hz.

b.)  $K_p = 0.45$ ,  $K_i = 0.27$ , setpoint 100Hz, no load

Set point : 100 Hz 120 100

frequency (Hz) 80 60 40 20

64 15 22 29 36 43 50 57

71 78 85 92 99 106 1 0 8

Times (ms)

Figure 4 No Load Controlled Generator Frequency Response (Setpoint 100Hz)

c.)  $K_p = 0.45$ ,  $K_i = 0.27$ , setpoint 100Hz, load 2k2.

Set point : 100 Hz, Load 2k2 Ohm 120 frequency (Hz) 100 80 60 40 20 0 1

82 10 19 28 37 46 55 64 73

91 100 109 Times (ms)

Figure 5 Generator Frequency Response with 2k2 Load Figure 5 shows the generator

frequency with  $K_p = 0.45$ ,  $K_i = 0.27$ , with a 2k2 load having a maximum peak ( $M_p$ ) of 106Hz with a peak time ( $t_p$ ) of 2600 ms, and the lowest frequency of 93Hz peak time ( $t_p$ ) of 1900 ms. Percent Overshoot(PO) generated by a controlled generator frequency with a load can be determined by the formula:  $\frac{M_p - \text{int}}{\text{int}} \times 100\%$  PO =  $\frac{106 - 100}{100} \times 100\% = 6\%$

c.)  $K_p = 0.45$ ,  $K_i = 0.27$ , setpoint 100Hz, load 4k7 Set point : 100 Hz, Load 4k7 Ohm

120 100 80 Frequenc

60 40 20 y

0 1 5 9 13 17 21 25 29 33 37 41 45 49 53 57 61 65 69 Times (ms)

Figure 6 Generator Frequency Response with 4k7 . Load

Figure 6 shows that when the generator frequency with a load of 4k7 has a maximum peak ( $M_p$ ) of 107Hz with a peak time ( $t_p$ ) of 800 ms, and the lowest frequency of 94Hz at a peak time ( $t_p$ ) of 940 ms. Percent Overshoot(PO) generated by the frequency of the generator with the load can be determined by the formula:  $\frac{M_p - \text{int}}{\text{int}} \times 100\%$  PO =  $\frac{107 - 100}{100} \times 100\% = 7\%$

5. CONCLUSION From the results of the design and testing that has been done, it can be concluded that the generator frequency controller has been successfully made and works well, especially the frequency setting which can be controlled from the DC motor rotation speed. And the following are other conclusions obtained: 1. By implementing the PI (Proportional Integral) method with parameters  $K_p = 0.45$  and  $K_i = 0.27$  at the generator frequency, the PI method is able to accelerate the system to the specified setpoint. However, it causes the system response to fluctuate in a predetermined set point range. When the frequency is set to 50Hz with no load, the frequency response is not perfectly stable at the 50Hz set point but fluctuates between the 45Hz – 56Hz range. 2. The comparison between the frequency and the output voltage of the generator is directly proportional and linear. The higher the frequency of the generator, the higher the output voltage produced by the generator. In the minimum frequency range of 50 Hz the generator produces an output voltage of 5.4 V, and in the maximum frequency range of 100 Hz generator produces an output voltage of 12.5 V 3. Percent Overshoot (PO) generated by the frequency response

with a  $2k2\Omega$  load of 6%, with a  $4k7$  load of 7%, and a  $10k\Omega$  load of 6%. 4. If the load is getting bigger, the rise time to reach steady state is faster. With a load of  $2k2$  the rise time reaches a steady state at 1000 ms, with a load of  $4k7$  the rise time reaches a steady state at 800 ms, and with a load of  $10k$  the rise time reaches a steady state at 700 ms. 5. From the experimental results with no load and using a load of  $2k2\Omega$ ,  $4k7\Omega$ , and  $10k\Omega$ . It can be seen that the difference between Maximum Peak and Minimum Peak there is no significant difference or the results are relatively the same, this proves that the frequency control is running well.

### Daftar Pustaka

- [1] Dermawan, D, Ainudin, FH, Ashlah, MB and Nugraha, AT. "Pengontrol Kecepatan Respon Motor dengan Pid dan Lqr." Seminar MASTER PPNS 8.1, 2023, pp. 222-235.
- [2] Apriani, M, Nindyapuspa, A, Cahyani, FDAF and Nugraha, AT. "Recovery of sugarcane bagasse as adsorbent for chromium (Cr)(III) removal." IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 1265.1, 2023, p. 12006.
- [3] Achmad, I and Nugraha, AT. "Implementation of voltage stabilizers on solar cell system using buck-boost converter." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2022
- [4] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "PENGIMPLEMENTASIAN SISTEM KONTROL KENDALI LQR UNTUK MENGONTROL MOTOR DC." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 78-82.
- [5] Khabibi, SR, Poetro, JE and Nugraha, AT. "Rancang Bangun Panel Sistem Kontrol dan Monitoring Motor 3 Fasa Dual Speed Berbasis Mikrokontroler." Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 10.2, 2020, pp. 61-68.
- [6] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "SISTEM KENDALI LQR DAN PID PADA ALAT PENERANG BIJI KOPI." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 83-87.
- [7] Fauzi, AR, Sobhita, RA, Nugraha, AT and Santosa, AF. "Performance of Permanent Magnet Synchronous Generator (pmsg) 3 Phase Radial Flux Results Modification of Induction Motor." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 1.2, 2024, pp. 5-11.
- [8] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Adzani, FR, Itislam, TA, Firdiansyah, R and .... "PENINGKATAN EFISIENSI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA MENGGUNAKAN KONVERTER SEPIC BERBASIS MOSFET IRF540." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 53-61.
- [9] Nugraha, AT, Asri, P, Widodo, HA, Poetro, JE, Jamiin, MA, Mudjiono, U and .... "Anticipation of Deep Discharge of Batteries in Solar Panels Based on the Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm." SAGA: Journal of Technology and Information System 2.2, 2024, pp. 212-227.
- [10] Pradana, RBP, Widiarti, Y and Nugraha, AT. "Implementasi Komunikasi LoRa RFM95 untuk Pengiriman Data Tegangan dan Arus pada Panel Shore Connection." Elektriase: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 10.2, 2020, pp. 45-51.
- [11] Nugraha, AT, Tiwana, MZA and Ravi, AM. "Analisis Optimalisasi Manajemen Daya Chiller Untuk Rencana AC Sentral Industri." Jurnal Janitra Informatika dan Sistem Informasi 1.1, 2021, pp. 35-46.
- [12] Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Buku Penerapan Sistem Elektronika Daya: AC Regulator, DC Chopper, dan Inverter.", 2022

- [13] Setiawan, E, Anindita, G, Nugraha, AT and Pramesti, L. "Integration of Renewable Energy Sources in Maritime Operations." *Maritime Infrastructure for Energy Management and Emission Reduction Using ...*, 2025
- [14] Utomo, AP, Apriani, M, Ruddianto, R, Cahyono, L, Nugraha, AT and Nugroho, MI. "Pelatihan Pembuatan Terumbu Buatan Berbasis Eco-friendly sebagai Sarana Rehabilitasi Terumbu Karang di Daerah Pantai Wisata Pasir Putih, Situbondo." *INTEGRITAS: Jurnal Pengabdian* 5.2, 2021, pp. 299-312.
- [15] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "TUNING PID UNTUK KONTROL KECEPATAN MOTOR DC." *Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application* 2.1, 2022, pp. 88-97.
- [16] Primaningtyas, WE, Utomo, AP, Wulandari, KD, Alfanda, BD, Cahyono, L and .... "DISEMINASI PEMBUATAN PAPLAS (PAVING PLASTIK) SEBAGAI SARANA DEMARKASI AREA POTENSI BAHAYA DI LINGKUNGAN SEKOLAH." *Jurnal Cakrawala Maritim* 4.2, 2021
- [17] Nugraha, AT, Pradana, RA and Shiddiq, MJ. "Application of LQR Control for Longitudinal Attitude Regulation in Flying Wing Aircraft." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 2.2, 2024, pp. 1-6.
- [18] Nugraha, AT, Asri, P, Sunarno, E, Eviningsih, RP, Putra, ZMA, Indaryani, S and .... "Design Build an Off Grid Based Solar Power Plant System Using The Bidirectional Buck And Boost Topology In The Conservation Of Sea Pearl Turtles." *E3S Web of Conferences* 473, 2024, p. 1006.
- [19] Nugraha, AT and Sobhita, RA. "Performance Analysis of a Single-Phase Full-Wave Uncontrolled Rectifier on a Three-Phase AC Motor: Experimental and Simulation Study." *Journal of Electrical, Marine and Its Application* 3.1, 2025
- [20] Firdaus, AA, Sobhita, RA and Nugraha, AT. "Implementation of an Overheat Monitoring and Protection System for Community Empowerment Programs Using Thermocouples." *Maritime in Community Service and Empowerment* 3.1, 2025

## BAB XI

# Pemodelan dan Pengendalian Optimal Motor DC Menggunakan Metode LQR dan LQT

*Oleh: Vania Hasna Kirana Sutrisna*

*Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*

In this study, we can find out how to determine the PID and LQR controller parameters for controlling a dc motor, how to design and simulate a PID and LQR controller in creating a stable dc motor at a desired speed, and the comparison of the two system responses from the two controllers used.

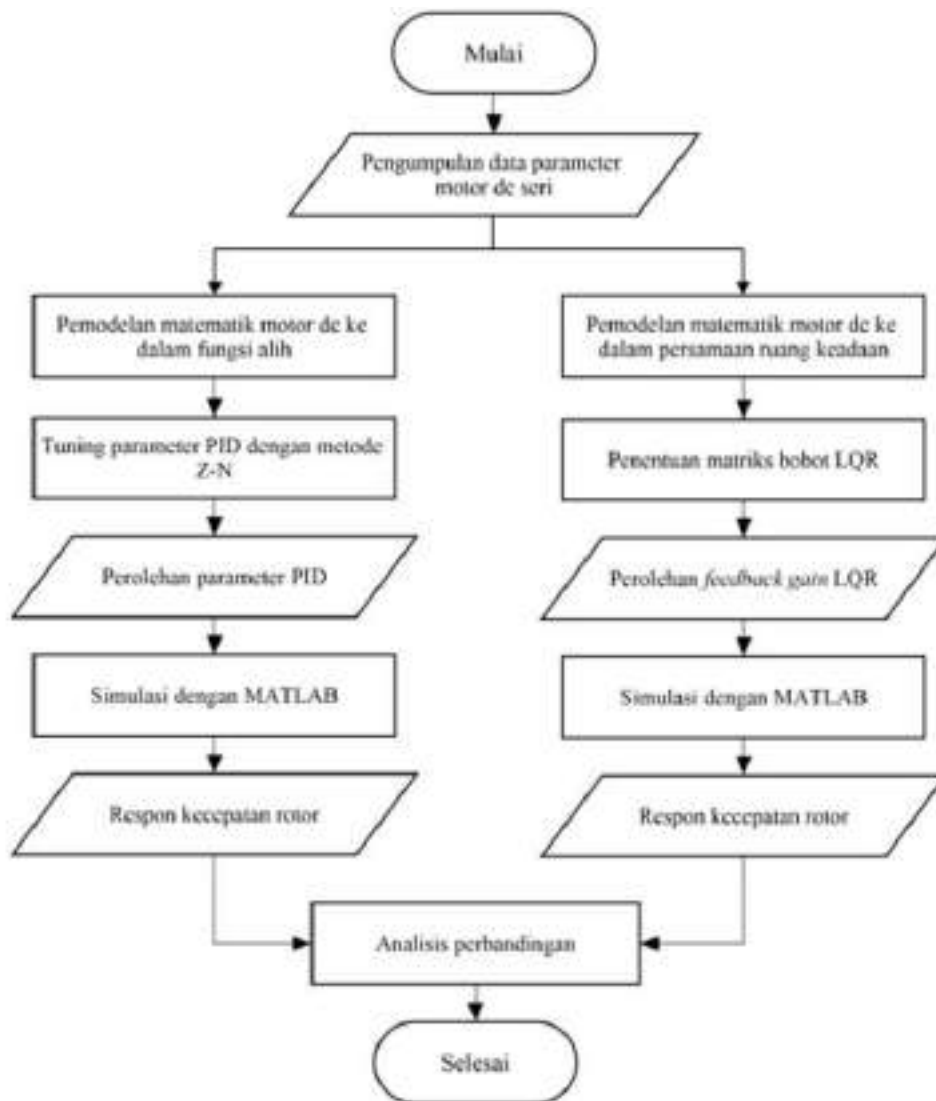
This study has the aim of analyzing the performance of the PID and LQR controllers on a dc motor in achieving a steady state according to the desired motor speed, getting the optimum results of the output response of each controller from the simulation carried out, getting a comparison curve for the resulting system response. by the PID and LQR controllers.

### **Discussion**

Describe the results of qualitative and/or quantitative analysis with an emphasis on answers to problems. The contents of this discussion contain everything about the activities carried out in the paper. Starting from the concept, design, hypothesis (if any), experiments, observational data, and the results of existing observational data.

The content is supported by figures, tables, and equations referenced in the manuscript.

## A. Research Flowchart



Gambar 11.1

## B. Equality

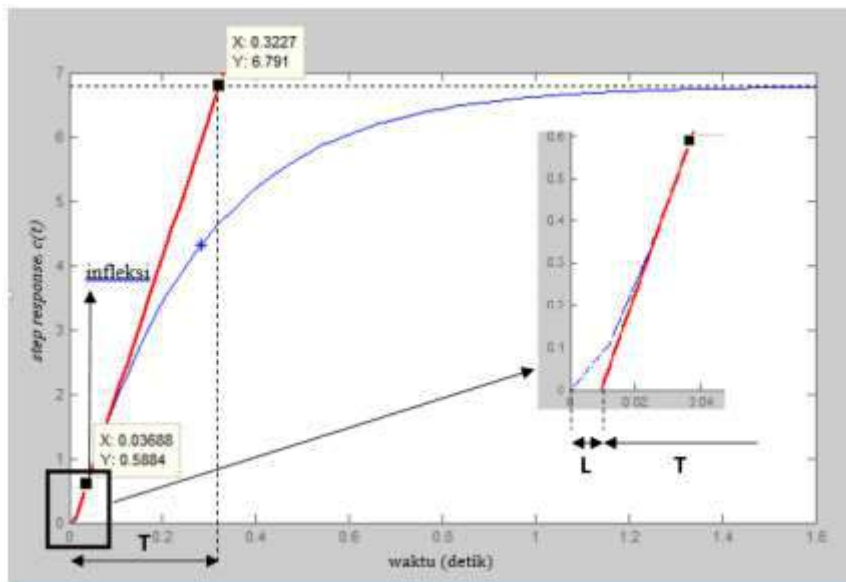
### Data Acquisition

| Parameter                 | Simbol | Besar dan Satuan            |
|---------------------------|--------|-----------------------------|
| Momen inersia             | $J_m$  | 0.0007046 kg.m <sup>2</sup> |
| Koefisien gesekan         | $B_m$  | 0.0004 N.m/(rad/s)          |
| Konstanta torsi           | $K_t$  | 0.1236 N.m/A                |
| Konstanta tegangan balik  | $K_b$  | 0.1236 V/(rad/s)            |
| Tahanan total kumparan    | $R_t$  | 7.2 ohm                     |
| Induktansi total kumparan | $L_t$  | 0.0917 H                    |

Gambar 11.2

### PID Parameter Gain

The values that need to be found from the curve are the time delay value (L) and the time constant value (T). By using a straight line equation, the values of L and T will be determined. In Figure 4.4 it can be seen that there are 2 points with coordinates: X1 = 0.03688, Y1 = 0.5884 dan X2 = 0.3227, Y2 = 6.791



Gambar 11.3

General form the equation of a straight line:

$$Y2 - Y1 = m(X2 - X1) \quad (1)$$

where  $m$  is gradient slope of line.

$$6.791-0.5884=m(0.3227-0.03688) \quad (2)$$

$$m=6.791-0.5884/0.3227-0.03688 \quad (3)$$

$$m=21.701 \quad (4)$$

The tangent line touches the x-axis at a point with coordinates (X,0), then

$$Y_2 - 0 = m(X_2 - X) \quad (5)$$

$$6.791 - 0 = 21.701(0.3227 - X) \quad (6)$$

$$X = 0.3227 - 6.791/21.701 \quad (7)$$

$$X = 0.009765 \quad (8)$$

From Figure 4.4 it appears that the value of L is equal to X. T

equal to  $X_2 - L$

$$L = 0.009765 \quad (9)$$

, maka  $T = 0.3227 - 0.009765 = 0.3130$

After the L and T values are obtained, we can determine the PID . parameter values

Proportional Constant ( $K_p$ ):

$$K_p = 1.2TL \quad (10)$$

$$K_p = 1.2 \cdot 0.3130 \cdot 0.009765 \quad (11)$$

$$K_p = 38.464 \quad (12)$$

$$(K_i) \quad (13)$$

Konstanta Integral :

$$T_i = 2L, K_i = K_p T_i \quad (14)$$

maka:

$$K_i = K_p 2L = 38.4642(0.009765) = 1969.483 \quad (15)$$

$$(K_d) \quad (16)$$

Konstanta Derivative :

$$T_i = 0.5L, K_d = T_d K_p \quad (17)$$

maka:

$$K_d = 0.5LK_p = 0.50 \cdot 0.009765 \cdot 38.464 = 0.1878 \quad (18)$$

### **PID Parameter Gain**

In the LQR simulation, the motor is modeled in the form of a state space, namely:

$$\dot{X}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (19)$$

)

$$Y(t) = Cx(t)$$

Where matriks A, B, C determined by :

$$-RL-KbLKtJm-BmJm \tag{20}$$

$$1L0 \tag{21}$$

$$01 \tag{22}$$

A =, B =, dan C =

By entering the data from Table 4.1 into the matrix equation, we get :

$$-7,20,0917-0,12360,09170,12360,0007046-0,00040,0007046 \tag{23}$$

$$10,09170 \tag{24}$$

$$01 \tag{25}$$

A =, B =, C =, dan D =

Obtaining LQR Parameters To obtain the Q and R matrices, the matlab script program using the trial and error method can be seen in Appendix II, where the conditions for the Q matrix are real positive semidefinite matrices ( $Q \geq 0$ ) and the R matrix is real positive definite matrix ( $R > 0$ ).

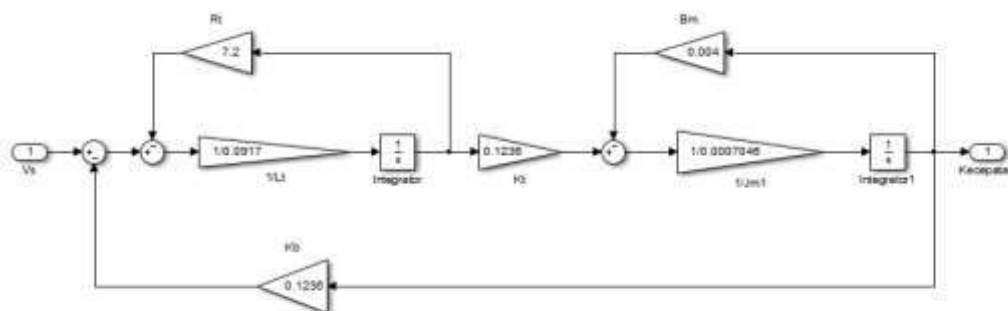
$$1001 \tag{26}$$

We set the initial value Q = dan R =

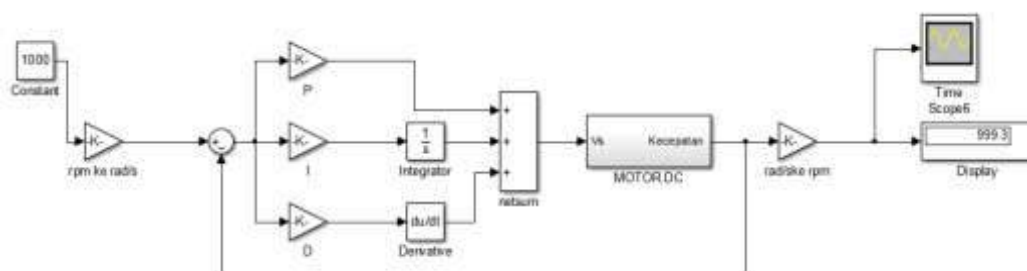
$$K=[1.2892 \ 0.6016]$$

### Circuits

#### PID Simulation Circuits

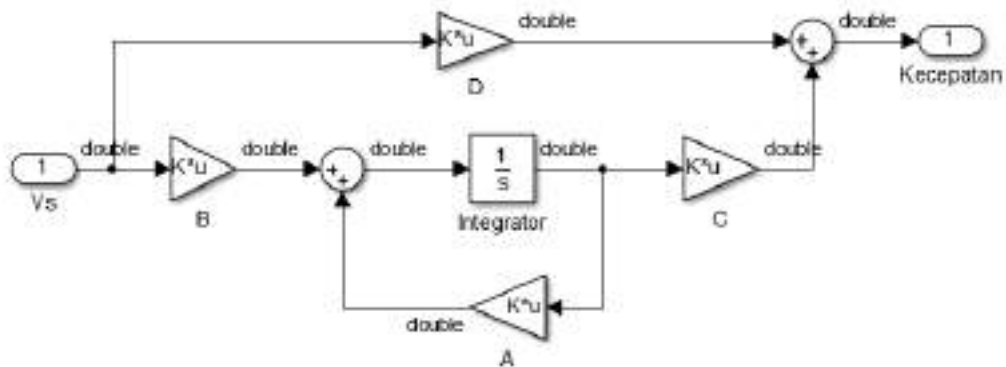


Gambar 11.4 Simulink Motor DC Circuits Series with PID

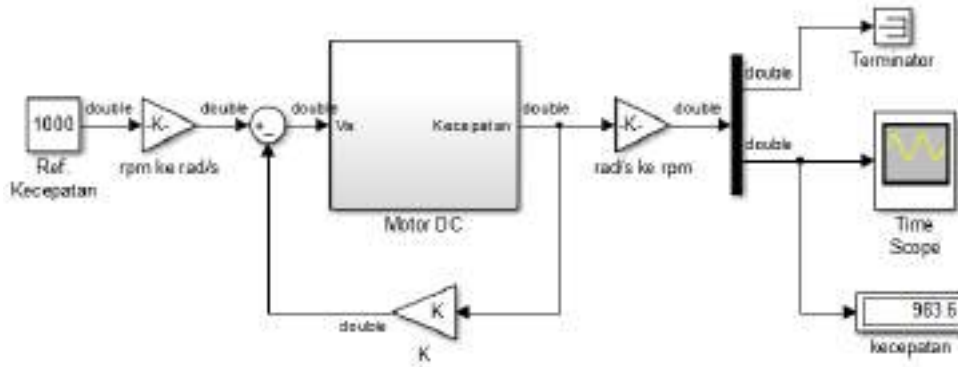


Gambar 11.5 PID Simulation Circuits

## LQR Simulation Circuits



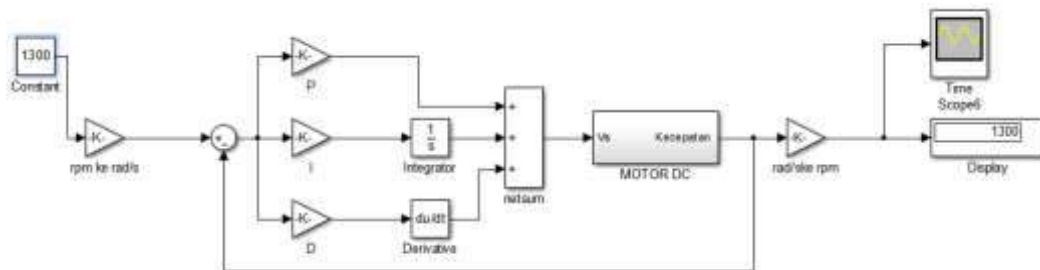
Gambar 11.6 Simulink Motor DC Series Circuits with LQR



Gambar 11.7 LQR Simulation Cicuits

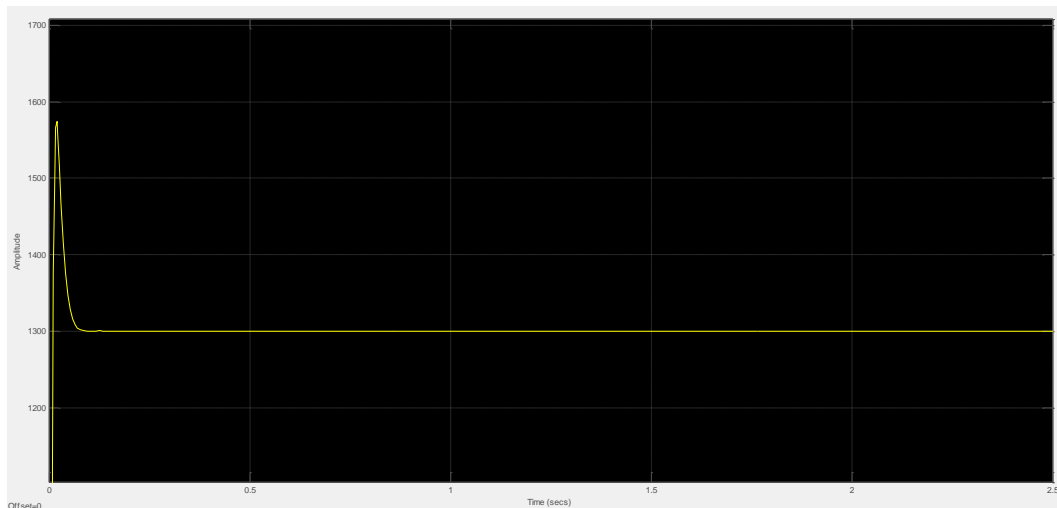
## PID Simulation

### PID Simulation at 1300 rpm reference speed



Gambar 11.8 PID Simulation at 1300 rpm Reference Speed

Obtained a steady speed of 1300 rpm. The rotor speed response at a reference speed of 1300 rpm is shown in Figure 5.



*Gambar 11.9 Rotor Speed Response at 1300 rpm Reference Speed with PID . Control*

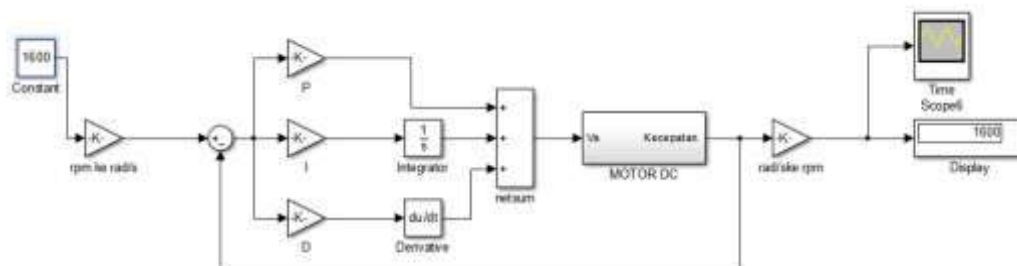
Parameter respon kecepatan rotor yang diperoleh : Rise time : 6.995 ms

Settling time :53.7 ms

Max. Overshoot : 21.09 %

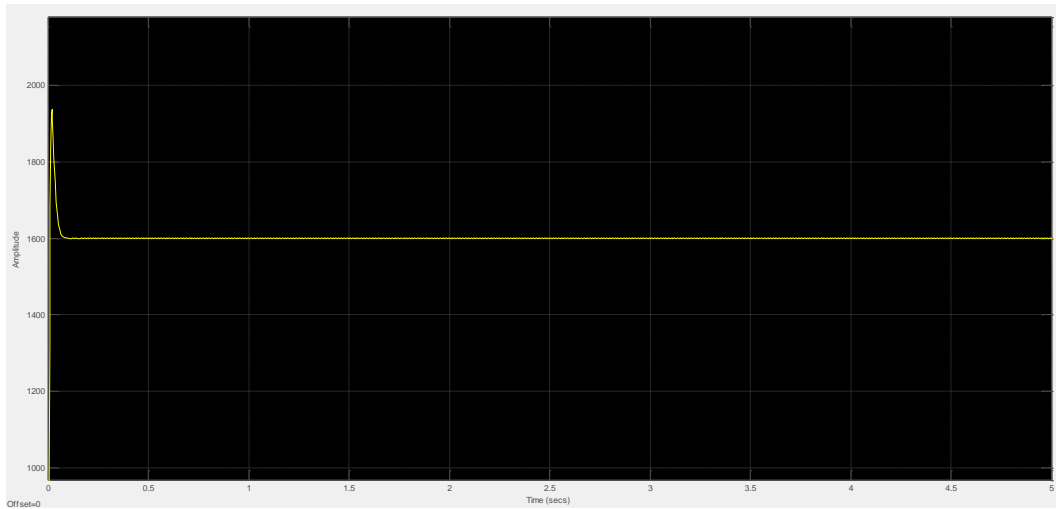
Error steady state : 0 %

### **PID Simulation at 1600 rpm Reference Speed**



*Gambar 11.10 PID Simulation at 1600 rpm Reference Speed*

Obtained a steady speed of 1600 rpm. The rotor speed response at a reference speed of 1600 rpm is shown in Figure 7.



*Gambar 11.11 Rotor Speed Response at 1600 rpm Reference Speed with PID Control*

The obtained rotor speed response parameters : Rise time : 7.067 ms

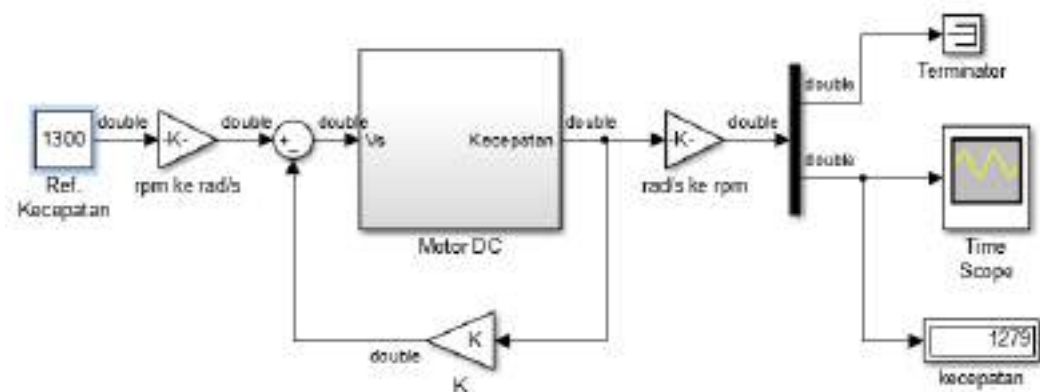
Settling time :53.8 ms

Max. Overshoot : 21.05 %

Error steady state : 0 %

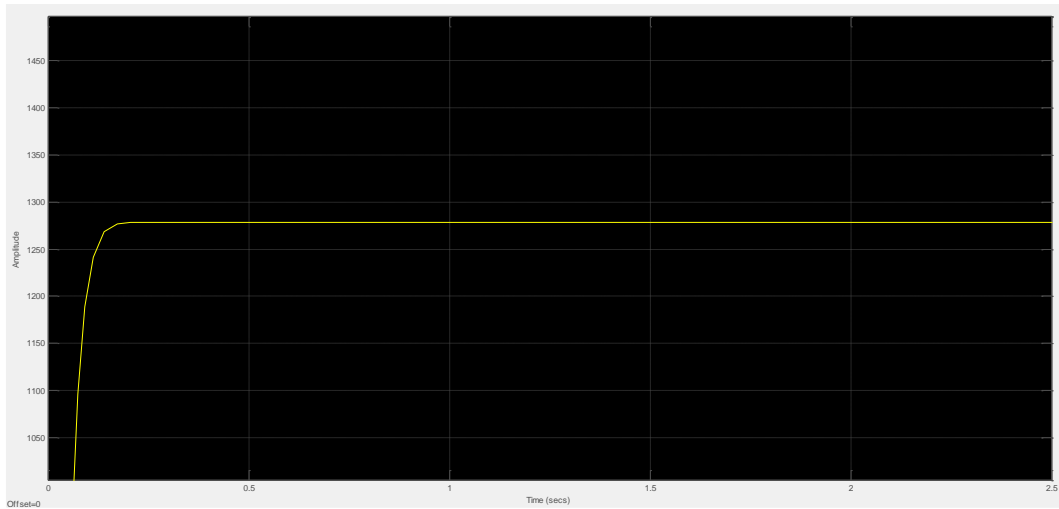
### **LQR Simulation at 1600 rpm Reference Speed**

### **LQR Simulation at 1300 rpm Reference Speed**



*Gambar 11.12 LQR Simulation Circuits at 1300 rpm Reference Speed*

Obtained a steady speed of 1300 rpm. The rotor speed response at a reference speed of 1300 rpm is shown in figure 9



*Gambar 11.13 Rotor Speed Response at 1300 rpm Reference Speed with LQR Control*

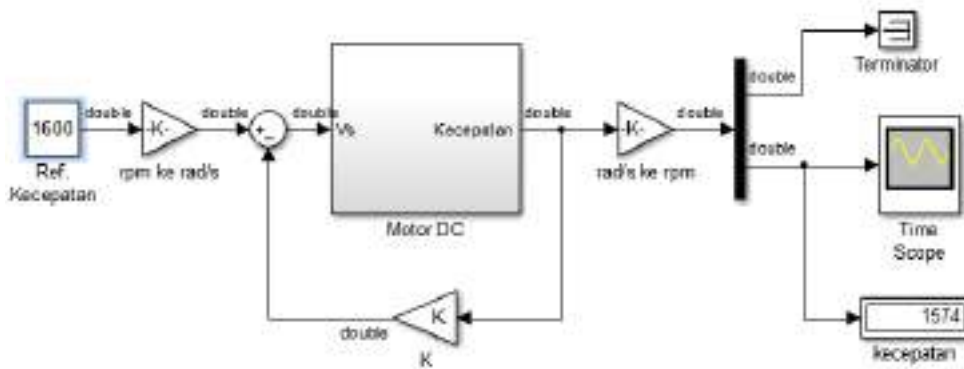
The obtained rotor speed response parameters : Rise time : 89.743 ms

Settling time : 166.9 ms

Max. Overshoot : 0 %

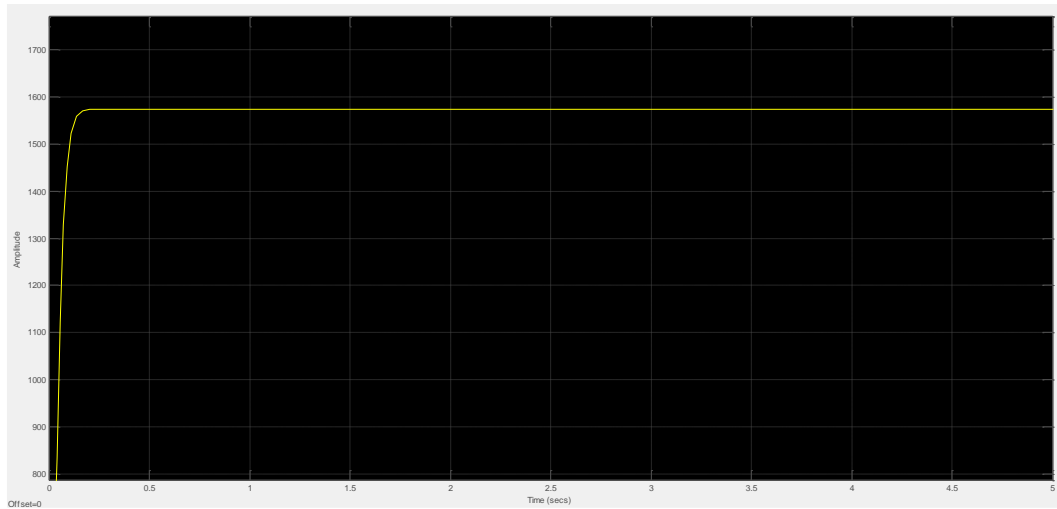
Error steady state : 0 %

### **LQR Simulation at 1600 rpm Reference Speed**



*Gambar 11.14 LQR Simulation Circuits at 1600 rpm Reference Speed*

Obtained a steady speed of 1600 rpm. The rotor speed response at a reference speed of 1600 rpm is shown in figure 11



*Gambar 11.15 Rotor Speed Response at 1600 rpm Reference Speed with LQR Control*

The obtained rotor speed response parameters: Rise time : 90.340 ms

Settling time : 164.1 ms

Max. Overshoot : 0 %

Error steady state : 0 %

### C. Comparison Table

*Table 11.1 Results of Comparison of Rotor Speed Response with PID and LQR*

| Controller | Speed (rpm) | Rise Time (ms) | Settling Time (ms) | Max.Over Shoot (%) | Error Steady (%) |
|------------|-------------|----------------|--------------------|--------------------|------------------|
| PID        | 1300        | 6.995          | 53.7               | 21.09              | 0                |
|            | 1600        | 7.067          | 53.8               | 21.05              | 0                |
| LQR        | 1300        | 89.743         | 166.9              | 0                  | 0                |
|            | 1600        | 90.340         | 164.1              | 0                  | 0                |

### Conclusion

From the simulation results, several conclusions can be obtained, namely as follows:

1. In achieving a stable speed, PID provides a shorter time than LQR as we can see in the simulation results, the rise time and completion time obtained using PID are smaller than using LQR.

2. The rotor response speed characteristic obtained by using LQR has no overshoot at all, while using PID the resulting overshoot is quite large, which is around 20%.

3. Of the five speed variation experiments for each controller, PID has a steady state error twice while LQR has a steady state error once.

4. The simulation results show that the speed variation applied to a series dc motor with PID and LQR control has no effect on the rotor response speed in achieving a stable speed.

5. Percentage of max. The armature current overshoot that occurs using the PID controller is around 460% while using the LQR controller is around 188% which means that the current starting with the PID controller is much larger than using the LQR controller.

### Daftar Pustaka

- [1] Nugraha, AT, Pratiwi, OD and Setiyoko, AS. "Simulasi gangguan saat terjadi gangguan undervoltage dan unbalance load pada sub-sub distribusi panel." MEDIA ELEKTRIKA Учредители: LPPM Universitas Muhammadiyah Semarang 16.2, 2024, p. 162.
- [2] Nugraha, AT and Haj, MI. "Zeta Converter Design for Solar Power Generation System with Controller Using Arduino Microcontroller." Conference of Electrical, Marine and Its Application 2.1, 2023, pp. 54-64.
- [3] Nugraha, AT. "Desain kontrol path following quadcopter dengan command generator tracker model following." Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017
- [4] Nugraha, AT, Pambudi, DSA, Utomo, AP and Priyambodo, D. "Design of Charger Controller on Wind Energy Power Plant With Arduino Uno Based on Pi Controller." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2021
- [5] Cahyono, L, Apriani, M, Nugraha, AT and Utomo, AP. "TIME RISK ANALYSIS OF IMPLEMENTATION SELF-MANAGED COMMUNITY PROJECT IN KALIANYAR-BANGIL VILLAGE." Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil 11.2, 2022, pp. 142-151.
- [6] Nugraha, AT, Eviningsih, RP, Riyadi, F, Sheila, SY, Pramudika, AES and .... "DESAIN DAN SIMULASI BUCK-BOOST CONVERTER MENGGUNAKAN PSIM PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 3.1, 2023, pp. 68-77.
- [7] Ardiansyah, MD, Nugraha, AT and Jami'in, MA. "Perbandingan Respons Sistem Motor DC dan Motor AC Berdasarkan Identifikasi Model Menggunakan MATLAB/Simulink." Conference of Electrical, Marine and Its Application 4.1, 2025
- [8] Kurniawan, RF, Mudhoffar, MH, Nugraha, AT and Widyaningrum, LA. "HOW THE PERFORMANCE OF A DC MOTOR SYSTEM IS IMPACTED BY NOISE." Jurnal Teknologi Maritim 6.1, 2023, pp. 23-32.
- [9] Amelia, SR, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Prototipe Sistem Automatic Switch pada Sistem Redundant Pump Cooling Tower Berbasis Mikrokontroler." Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro 10.2, 2020, pp. 52-60.
- [10] Nugraha, AT and Priyambodo, D. "Prototype Design of Carbon Monoxide Box Separator as a Form of Ar-Rum Verse 41 and To Support Sustainable Development Goals Number 13 (Climate Action)." Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics ..., 2021
- [11] Nugraha, AT, Santosa, AF and Sobhita, RA. "A Comparative Study on DC Motor Speed Regulation Using Full-Wave Uncontrolled Rectifiers." Sustainable Energy Control and Optimization 1.1, 2025, pp. 43-52.
- [12] Fauzi, AR, Sobhita, RA, Nugraha, AT and Santosa, AF. "Performance of Permanent Magnet Synchronous Generator (pmsg) 3 Phase Radial Flux Results Modification of Induction Motor." MEIN: Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology 1.2, 2024, pp. 5-11.
- [13] Utomo, AP, Nugraha, AT and Zakariz, NP. "Speed Adjustment on Variable Frequency Induction Motor Using PLC for Automatic Polishing Machine." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2021

- [14] Nugraha, AT, Priyambodo, D and Sarena, ST. "Design A Battery Charger with Arduino Uno-Based for A Wind Energy Power Plant." JPSE (Journal of Physical Science and Engineering) 7.1, 2022, pp. 23-38.
- [15] Sofyan, M, Syaifudin, S, Pudji, A, Utomo, B and Nugraha, AT. "Comparative Analysis of Water and Oil Media on Temperature Stability in PID Control-Based Digital Thermometer Calibrator." Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical ..., 2023
- [16] Shiddiq, MJ and Nugraha, AT. "Sistem monitoring detak jantung pada sepeda treadmill." Journal of Computer, Electronic, and Telecommunication (COMPLETE) 3.2, 2022
- [17] Nugraha, AT and Eviningsih, RP. "Penerapan Sistem Elektronika Daya: AC Regulator, DC Chopper, Dan Inverter." ID Patent EC00202208823,, 2022
- [18] Ravi, AM, Widodo, HA and Nugraha, AT. "Pengaruh Penggunaan Metode Kontrol Pi Pada Kontrol Eksitasi Generator Sinkron." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [19] Nugraha, AT. "Rancang Bangun Charger Controller Pada Pembangkit Listrik Energi Angin Berbasis Arduino Uno." Seminar Master Ppns 6.1, 2021
- [20] Nugraha, AT, Yuniza, SI, Fathurrohman, MF, Novsyafantri, Purba, JV and .... "PERBANDINGAN RESPON KECEPATAN MOTOR DC MENGGUNAKAN METODE PID DAN LQR." Jurnal Conference on Automation Engineering and Its Application 2.1, 2022, pp. 10-15.

## GLOSARIUM

**Arus Searah (DC) :** Arus listrik yang mengalir dalam satu arah dengan polaritas tetap.

**Arus Bolak-balik (AC) :** Arus listrik yang arah dan besarnya berubah secara periodik terhadap waktu.

**Penyearah (Rectifier) :** Rangkaian yang mengubah tegangan/arus bolak-balik (AC) menjadi searah (DC).

**LQR (Linear Quadratic Regulator) :** Metode kendali optimal yang meminimalkan fungsi biaya kuadratik untuk mengatur keadaan sistem.

**LQT (Linear Quadratic Tracking) :** Pengembangan LQR yang bertujuan mengikuti (tracking) sinyal referensi tertentu.

**PID (Proportional Integral Derivative) :** Pengendali umpan balik yang menggabungkan aksi proporsional, integral, dan turunan.

**PWM (Pulse Width Modulation) :** Teknik pengaturan daya dengan memodulasi lebar pulsa sinyal.

**THD (Total Harmonic Distortion) :** Ukuran tingkat distorsi harmonik pada suatu gelombang listrik.

**SCR (Silicon Controlled Rectifier) :** Komponen semikonduktor daya yang berfungsi sebagai sakelar terkendali.

**TRIAC :** Komponen semikonduktor yang dapat menghantarkan arus pada kedua arah gelombang AC.

**Overshoot :** Lonjakan respons sistem yang melampaui nilai akhir (steady state) sebelum stabil.

**Settling Time :** Waktu yang dibutuhkan respons sistem untuk menetap dalam rentang toleransi tertentu.

**Steady State :** Kondisi tunak ketika keluaran sistem tidak lagi berubah secara signifikan terhadap waktu.

**Plant :** Objek atau sistem fisik yang dikendalikan dalam suatu sistem kontrol.

**Duty Cycle :** Rasio durasi sinyal aktif terhadap satu periode penuh, biasa dinyatakan dalam persen.

# INDEKS

## A

Arus Bolak-balik  
Arus Searah

## C

Coffee Milling Machine  
Cold Storage  
Control System

## D

DC Motor  
Dinamometer

## E

Eddy Current

## F

Full-Wave

## G

Gelombang Penuh

## K

Kontrol Optimal

## L

Linear  
Linear Quadratic Regulator (LQR)  
Longitudinal  
LQR  
LQT

## M

MATLAB  
Motor AC  
Motor DC  
Motor Induksi

## N

Nonlinear

## O

Occupational Safety  
OHS  
Operational Efficiency  
Optimisation  
Overshoot

## **P**

Penyearah  
PID  
PSIM  
PWM

## **R**

Rectifier  
Regulator Tegangan

## **S**

SCR  
Setengah Gelombang  
Settling Time  
Simulink  
Single Phase  
Sistem Kendali  
Speed Control  
Steady State  
Steady State Error

## **T**

THD  
TRIAC

## **U**

Unnamed Aerial Vehicle

## BIOGRAFI PENULIS

### **Anggara Trisna Nugraha** — *Pengarah*

Anggara Trisna Nugraha merupakan pengarah penyusunan buku bunga rampai ini. Beliau aktif membimbing kegiatan ilmiah mahasiswa di bidang elektronika daya, sistem kendali, dan kelistrikan kapal di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, serta menaruh perhatian besar pada penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID.

### **Penulis** — *Penulis BAB I*

Penulis adalah kontributor pada BAB I buku ini dengan judul “Application of a Single-phase AC Voltage Regulator to Improve Transformer Efficiency in Rural Electrification Programs”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

### **Penulis** — *Penulis BAB II*

Penulis adalah kontributor pada BAB II buku ini dengan judul “Pengendalian Penyearah Terkendali Satu Fasa pada Motor AC”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

### **Patric Yuda Suharsono** — *Penulis BAB III*

Penulis adalah kontributor pada BAB III buku ini dengan judul “Simulasi Pengendalian LQR-PID untuk Cold Storage Ikan Tenggiri”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

### **Rachmat Marjukil\*** — *Penulis BAB IV*

Penulis adalah kontributor pada BAB IV buku ini dengan judul “Implementasi Pendekatan Linear Quadratic Regulator (LQR) dan Linear Quadratic Tracking (LQT) dalam Sistem Rem Otomatis untuk Meningkatkan Keamanan Kerja di Lingkungan Industri”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

### **Puspita Arifa Setyawati** — *Penulis BAB V*

Penulis adalah kontributor pada BAB V buku ini dengan judul “Identifikasi Sistem Motor DC dan Pengendalian Linear Quadratic Regulator Berbasis Arduino-simulink Matlab”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

### **Riezandini Rakis Putri** — *Penulis BAB VI*

Penulis adalah kontributor pada BAB VI buku ini dengan judul “Identifikasi Sistem Motor DC dan Pengendalian Linear Quadratic Regulator Berbasis Arduino-simulink Matlab”. Tulisan tersebut

dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

**Rizal Faturrohman** — *Penulis BAB VII*

Penulis adalah kontributor pada BAB VII buku ini dengan judul “PID Tuning for DC Motor Speed Regulation: a Comprehensive Evaluation in Engineering Applications”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

**Rizki Abdi Pradana** — *Penulis BAB VIII*

Penulis adalah kontributor pada BAB VIII buku ini dengan judul “Penerapan Pengendalian LQR untuk Kontrol Sikap Longitudinal Pesawat Flying Wing”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

**Rizky Wahyunto** — *Penulis BAB IX*

Penulis adalah kontributor pada BAB IX buku ini dengan judul “Sistem Kontrol LQR-PID sebagai Pengendalian Laju Mesin Penggilingan Kopi”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

**Penulis** — *Penulis BAB X*

Penulis adalah kontributor pada BAB X buku ini dengan judul “Pengendalian Penyearah Terkendali Satu Fasa pada Motor AC”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

**Vania Hasna Kirana Sutrisna** — *Penulis BAB XI*

Penulis adalah kontributor pada BAB XI buku ini dengan judul “Pemodelan dan Pengendalian Optimal Motor DC Menggunakan Metode LQR dan LQT”. Tulisan tersebut dikembangkan sebagai bagian dari kegiatan ilmiah mahasiswa di lingkungan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

# BUNGA RAMPAI

## TEKNOLOGI ELEKTRONIKA DAYA DAN SISTEM KENDALI

### TENTANG BUKU INI

Bunga rampai ini menghimpun karya tulis ilmiah mahasiswa dalam bidang elektronika daya dan sistem kendali yang dikembangkan melalui kegiatan ilmiah INERGYC. Edisi II Jilid A tahun 2023 memuat 11 bab yang membahas perancangan dan analisis pengatur tegangan AC, rangkaian penyearah (rectifier), serta penerapan metode kendali optimal seperti LQR, LQT, dan PID pada pengendalian motor listrik.

Setiap bab disusun oleh penulis yang berbeda dengan pendekatan dan studi kasus masing-masing, sehingga buku ini menjadi sumber rujukan yang kaya bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi di bidang teknik kelistrikan.

### Topik Utama

- Pengaturan tegangan AC satu fasa dan tiga fasa
- Rangkaian penyearah (rectifier) terkontrol
- Kendali motor DC dengan metode LQR dan LQT
- Pengendali PID dan perbandingan antarmetode
- Simulasi menggunakan PSIM dan MATLAB/Simulink

Edisi II • Jilid A • Tahun 2023

Diterbitkan oleh :

DEPARTMENT OF MARINE ELECTRICAL ENGINEERING  
SHIPBUILDING INSTITUTE OF POLYTECHNIC SURABAYA