

**PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM KENDALI *ADAPTIVE* PID  
PADA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC)  
MENGUNAKAN METODE *MODEL REFERENCE ADAPTIVE*  
*CONTROLLER* (MRAC)**

(Skripsi)

Oleh:

**ZAHWA DINDA AULIA**

**NPM. 1915031031**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

### PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM KENDALI *ADAPTIVE* PID PADA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC) MENGUNAKAN METODE *MODEL REFERENCE ADAPTIVE* *CONTROLLER* (MRAC)

Oleh

**Zahwa Dinda Aulia**

Motor BLDC merupakan salah satu jenis motor listrik arus searah yang dirancang tanpa menggunakan sikat dan sudah banyak digunakan di industri, seperti industri otomotif, konsumsi, kesehatan, otomasi industri dan instrumentasi. Maka dari itu kinerja dari motor ini harus baik. Untuk memastikan motor BLDC tetap dalam keadaan yang baik diperlukan sistem rekayasa kendali sebagai pengontrol sistem. Salah satu sistem kendali yang telah diaplikasikan yaitu sistem kendali kecepatan motor dengan kendali *Proportional Integral Derivative* (PID) tunggal. Penelitian ini merancang sebuah sistem kendali PID untuk mengendalikan kestabilan motor BLDC yang bersifat adaptif. Metode yang digunakan *Model Reference Adaptive Controller* (MRAC) dengan 4 kondisi pengujian yang berbeda, dan didapatkan nilai parameter-parameter  $K_p = 0,4$  ;  $K_i = 50,75$  ;  $K_d = 0,0000867$ . Penelitian ini menggunakan MATLAB R2017a. Perancangan sistem telah berhasil memberikan peningkatan efisiensi berkisar antara 4,2% hingga 21,9% dari 4 kondisi pengujian. Saat sistem dalam keadaan stabil memberikan tingkat keberhasilan sistem 98,9% dengan *error* 1,1%. Perubahan *set point* pada sistem menghasilkan tingkat keberhasilan sistem 98,85% dengan *error* sebesar 1,15%. Pembebanan yang diberikan pada sistem menghasilkan tingkat keberhasilan sistem 81,2% dengan *error* sebesar 18,8%. Gangguan yang terjadi pada sistem memberikan tingkat keberhasilan sistem 96,5% dengan *error* sebesar 3,5%.

**Kata kunci:** motor BLDC, MRAC, *adaptive* PID.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND SIMULATION OF ADAPTIVE PID CONTROL SYSTEM FOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MOTOR USING MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROLLER (MRAC) METHOD**

**By**

**Zahwa Dinda Aulia**

*BLDC motor is one type of direct current electric motor that is designed without using brushes and has been widely used in industries, such as the automotive industry, consumption, health, industrial automation and instrumentation. Therefore, the performance of this motor must be great. To ensure that the BLDC motor remains in good condition, a control engineering system is needed as a system controller. One of the control systems that has been applied is a motor speed control system with a single Proportional Integral Derivative (PID) control. This research designs a PID control system to control the stability of BLDC motors that are adaptive. The method used is Model Reference Adaptive Controller (MRAC) with 4 different test conditions, and obtained parameter values  $K_p = 0.4$ ;  $K_i = 50.75$ ;  $K_d = 0.0000867$ . This research uses MATLAB R2017a. The system design has successfully provided an increase in efficiency ranging from 4.2% to 21.9% from 4 test conditions. When the system is in a stable state, it gives a system success rate of 98.9% with an error of 1.1%. Changes in the set point of the system resulted in a system success rate of 98.85% with an error of 1.15%. The loading given to the system produces a system success rate of 81.2% with an error of 18.8%. Disturbances that occur in the system provide a system success rate of 96.5% with an error of 3.5%.*

**Keywords:** *BLDC motor, MRAC, adaptive PID.*

**PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM KENDALI *ADAPTIVE* PID  
PADA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC)  
MENGUNAKAN METODE *MODEL REFERENCE ADAPTIVE*  
*CONTROLLER* (MRAC)**

Oleh

**ZAHWA DINDA AULIA**

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapat Gelar  
**SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

Judul Skripsi

: **PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM  
KENDALI *ADAPTIVE* PID PADA MOTOR  
*BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC)  
MENGUNAKAN METODE *MODEL  
REFERENCE ADAPTIVE CONTROLLER* (MRAC)**

Nama Mahasiswa

: **Zahwa Dinda Aulia**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1915031031

Program Studi

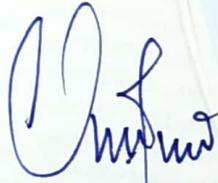
: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik

**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing



**Umi Murdika, S.T.,M.T.**  
NIP. 197202062005012002



**Syaiful Alam, S.T.,M.T.**  
NIP. 196904161998031004

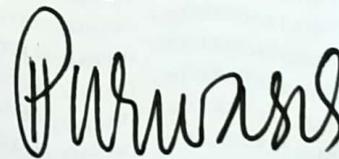
2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro



**Herlinawati, S.T.,M.T.**  
NIP. 197103141999032001

Ketua Program Studi Teknik Elektro

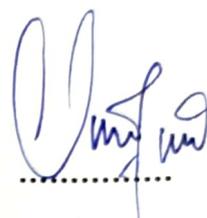


**Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T.,M.T.**  
NIP. 197404222000122001

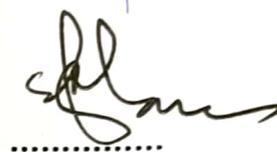
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

Ketua : **Umi Murdika, S.T.,M.T.**



Sekretaris : **Syaiful Alam, S.T.,M.T.**



Penguji Utama  
Bukan Pembimbing : **Herlinawati, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik :



  
**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**  
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **07 Agustus 2023**

## SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar Pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi akademik sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 7 September 2023



Zahwa Dinda Aulia

NPM. 1915031031

## RIWAYAT HIDUP



Penulis Lahir Metro, pada tanggal 09 Januari 2001 sebagai anak ke-2 dari 4 bersaudara, anak dari bapak Muhammad Yasin dan ibu Liswati. Pendidikan Sekolah Dasar diselesaikan di SDN 1 Simbarwaringin pada tahun 2013, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 3 Metro diselesaikan pada tahun 2016, dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Metro diselesaikan pada tahun 2019. Pada tahun 2019, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis aktif mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro sebagai Anggota Divisi Pengembangan Keteknikan yang diamanahkan sebagai penanggung jawab pada program kerja Essay dan PKM. Selain itu, penulis juga aktif mengikuti organisasi Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik (BEM FT) Universitas Lampung pada dinas Pemuda Olahraga dan Kreativitas Mahasiswa (PORAKRESMA). Pada semester 5, penulis mengambil konsentrasi Elektronika dan Kendali (Elkakend). Penulis menjadi asisten laboratorium Pengukuran Besaran Listrik pada tahun 2021 hingga 2023. Penulis pernah mengikuti kegiatan Magang Mandiri yang diselenggarakan oleh Jurusan Teknik Elektro dengan PT. PLN (Persero). Penulis melaksanakan magang pada salah satu cabang Unit Layanan Pelanggan di Way Halim sebagai Pembantu staff pada bidang Teknik.



## PERSEMBAHAN

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan Ridho Allah SWT  
Teriring shalawat kepada Nabi Muhammad SAW  
Karya Tulis ini ku persembahkan untuk:

Ayah dan Ibuku Tercinta  
*Muhammad Yasin dan Liswati*

Serta Kakak dan Adik-adikku Tersayang  
*Pangesti Anggraeni*  
*Anugrah Aziz Firdaus*  
*Anugrah Firdaus Raditya*

Terimakasih untuk semua dukungan dan doa selama ini  
Sehingga aku dapat menyelesaikan hasil karyaku ini





# MOTTO

*“Jangan lupa bersyukur untuk hari ini.”—Zahwa*

*“Ampunilah aku dan kedua ibu-bapakku dan semua orang yang beriman pada hari  
diadakan perhitungan (hari kiamat)”*

*(Q.S Ibrahim: 41)*

*“Tunjukilah kami jalan yang lurus.”*

*(Q.S Al-Fatihah:6)*

*“Tugas kita cuman bisa berencana, Allah yang menentukan”*

*“Kaya, Kaya, Kaya! Biar gak liat harga lagi kalo mau belanja”*

## SANWACANA

Alhamdulillah puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala karunia, hidayah, serta inayah-Nya kepada penulis, sehingga laporan skripsi ini yang berjudul **“Perancangan dan Simulasi Sistem Kendali *Adaptive* PID pada Motor *Brushless Direct Current (BLDC)* Menggunakan Metode *Model Reference Adaptive Controller (MRAC)*”** dapat selesai tepat pada waktunya. Yang merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Shalawat serta salam selalu tercurah kepada junjungan seluruh alam, Nabi Muhammad SAW. sahabatnya, serta para pengikutnya yang selalu istiqomah diatas jalan agama islam hingga hari akhir zaman. Selama menjalani pengerjaan Skripsi ini, penulis mendapatkan bantuan pemikiran maupun dorongan moril dari berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan kali ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr.Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati,S.T.,M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung, sekaligus pembimbing utama yang telah banyak memberikan kritik, saran, suasana yang ceria dan motivasi yang bermanfaat bagi penulis.
4. Ibu Dr. Eng. Nining Purwasih,S.T.,M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung
5. Ibu Umi Murdika, S.T., M.T. selaku pembimbing utama tugas akhir, yang telah banyak membantu, membimbing dan memberi dukungan kepada penulis.
6. Bapak Syaiful Alam, S.T.,M.T. selaku dosen pembimbing pendamping, yang telah banyak memberikan kritik, saran motivasi yang bermanfaat bagi penulis.

7. Bapak Sumadi, S.T.,M.T sebagai Dosen Pembimbing Akademik, yang telah banyak membimbing dan membantu penulis selama menjalani kuliah.
8. Ibu Yetti Yuniati, S.T.,M.T. sebagai Kepala Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik.
9. Seluruh Dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan
10. Bapak Baiqodar, S.T. selaku PLP Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik.
11. Ayahanda Muhammad Yasin, Ibunda Liswati, Mba Esti, Ajis dan Radit sebagai orang yang selalu mendukung dan mendo'akan penulis.
12. Rafly Rahmat Dani, sebagai orang spesial bagi penulis, yang selalu mendukung dan menemani selama 4 tahun perkuliahan dan selalu membantu dalam pengerjaan skripsi ini.
13. Sahabat penulis dari TK hingga sekarang Elles, Rahma, Sintia, Nadia, Tarisa yang selalu mendukung penulis.
14. Sahabat penulis sejak SMP hingga sekarang, Fera, Dian, Aulia yang selalu mendengarkan keluh kesah penulis.
15. Sahabat terbaik penulis dikampus, Yunita, Mutia, Rifka, Murti, Rachel yang selalu kebersamai penulis dalam berbagai proses pendewasaan selama menjadi mahasiswa teknik elektro unila.
16. Keluarga penulis di Laboratorium Teknik Pengukuran Besaran Listrik, Rafly, Murti, Zaki, Joseph, Hari dan Ferry yang selalu memberikan dukungan, hiburan, pertolongan, dalam setiap proses apapun selama menjadi asisten laboratorium teknik elektronika.
17. Keluarga besar ETERNITY Angkatan 2019, yang telah memberikan banyak motivasi, nilai-nilai sosial, dan bantuan dalam berbagai hal.
18. Keluarga besar HIMATRO UNILA, yang telah menjadi wadah dalam mengembangkan nilai-nilai organisasi bagi penulis.
19. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu dan terlibat langsung maupun tidak langsung yang telah membantu penulis dalam pembuatan skripsi.

Semoga Allah SWT membalas semua perbuatan dan kebaikan yang telah diberikan kepada Penulis sampai dengan terselesaikannya Skripsi ini. Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan, baik dari segi penyusunan maupun pemilihan kata. Maka dari itu penulis terbuka untuk menerima masukan kritik dan saran yang dapat membangun Penulis kedepannya. Semoga penulisan skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Bandar Lampung, 7 September 2023

Penulis,

**Zahwa Dinda Aulia**

## DAFTAR ISI

Halaman

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>viii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
1.6 Hipotesis .....	4
1.7 Sistematika Penulisan .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1 Penelitian Terdahulu .....	6
2.2 Motor <i>Brushless</i> DC (BLDC).....	7
2.2.1 Prinsip Kerja Motor BLDC.....	8
2.2.2 Sensor Posisi .....	8
2.2.3 Pemodelan Matematika Motor BLDC .....	9
2.3 Sistem Kendali .....	14
2.3.1 Kalang Terbuka ( <i>Open Loop</i> ) .....	14
2.3.2 Kalang Tertutup ( <i>Close Loop</i> ) .....	15
2.3.3 Karakteristik Respon Sistem.....	16
2.4 Sistem Kendali <i>Proportional Integral Derivative</i> (PID) .....	17

2.5 Sistem Kendali Model <i>Reference Adaptive Controller</i> (MRAC).....	19
2.5.1 Aturan <i>Massachusetts Institute of Technology</i> (MIT).....	20
2.6 <i>Matrix Laboratory</i> (MATLAB).....	21
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>24</b>
3.1 Waktu dan Tempat .....	24
3.2 Alat dan Bahan.....	24
3.3 Diagram Alir Perancangan Simulasi Sistem Kendali.....	25
3.4 Parameter Motor BLDC .....	28
3.4.1 Menentukan Pemodelan Matematika Motor BLDC.....	29
3.4.2 Merancang Sistem Kendali MRAC-PID .....	30
3.5 Merancang <i>Graphical User Interface</i> (GUI).....	30
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>32</b>
4.1 Pemodelan Matematika Motor BLDC.....	32
4.2 Pengujian <i>Controllability</i> .....	34
4.3 Simulasi Respon Sistem Motor BLDC <i>Openloop</i> .....	36
4.4 Pemodelan Matematika Sistem Kendali MRAC .....	37
4.5 Penentuan Karakteristik Respon yang Diinginkan.....	38
4.6 Simulasi Respon Sistem Motor BLDC Menggunakan Kontroler MRAC ...	39
4.6.1 Simulasi respon Sistem Tanpa Pembebanan .....	40
4.6.2 Simulasi respon Sistem dengan Perubahan <i>Set point</i> .....	45
4.6.3 Simulasi respon Sistem dengan Pembebanan.....	49
4.6.4 Simulasi respon Sistem dengan Gangguan.....	53
4.7 Visualisasi Respon Sistem Menggunakan GUI .....	57
4.8 Analisis Kinerja Sistem Kendali MRAC .....	60
<b>BAB V PENUTUP .....</b>	<b>62</b>
5.1 Kesimpulan.....	62
5.2 Saran .....	63

## DAFTAR PUSTAKA

## DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Konstruksi Motor BLDC .....	7
Gambar 2.2 Rangkaian motor lustrik sederhana .....	9
Gambar 2.3 Diagram simetris BLDC .....	9
Gambar 2.4 Sistem Kendali <i>Open loop</i> .....	15
Gambar 2.5 Sistem Kendali <i>Close loop</i> .....	15
Gambar 2.6 Kurva karakteristik respon sistem .....	16
Gambar 2.7 Diagram Blok Kendali PID .....	18
Gambar 2.8 Diagram Blok Kendali MRAC .....	19
Gambar 2.9 Tampilan <i>software</i> MATLAB R2017a.....	21
Gambar 2.10 Tampilan awal <i>toolbox Simulink</i> .....	22
Gambar 2.11 Tampilan pemodelan simulasi sistem pada <i>Simulink</i> .....	22
Gambar 2.12 Tampilan PID <i>tuner</i> .....	23
Gambar 2.13 Tampilan GUIDE .....	23
Gambar 3.1 Diagram alir perancangan dan simulasi sistem kontrol.....	27
Gambar 3.2 Respon Motor BLDC yang dihaapkan .....	29
Gambar 3.3 Tampilan GUI Sistem Motor BLDC.....	31
Gambar 4.1 Rangkaian Simulasi Sistem <i>Open loop</i> .....	36
Gambar 4.2 Respon Sistem Motor <i>Open loop</i> .....	37
Gambar 4.3 Hasil <i>tuning</i> otomatis menggunakan PID <i>tuner</i> .....	39
Gambar 4.4 Rangkaian Simulasi sistem kendali MRAC pada motor BLDC.....	41
Gambar 4.5 Respon Sistem kendali MRAC pada motor BLDC .....	44
Gambar 4.6 Respon sistem kendali MRAC kondisi 1 .....	47
Gambar 4.7 Respon sistem kendali MRAC kondisi 2 .....	48
Gambar 4.8 Rangkaian simulasi sistem kendali MRAC pada motor BLDC dengan pembebanan.....	50
Gambar 4.9 Respon sistem kendali MRAC dengan pembebanan.....	52
Gambar 4.10 Rangkaian simulasi sistem kendali MRAC pada motor BLDC dengan sinyal masukan sinus .....	54

Gambar 4.11 Respon sistem kendali MRAC dengan gangguan masukan sinyal sinus.....	56
Gambar 4.12 Noise yang terjadi pada sistem .....	56
Gambar 4.13 Grafik <i>step response</i> MRAC menggunakan GUI.....	58
Gambar 4.14 Grafik <i>root locus</i> sistem MRAC menggunakan GUI .....	59

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Pengaruh respon pengendali PID.....	17
Tabel 3.1 Alat dan bahan .....	24
Tabel 3.2 Parameter Motor BLDC.....	28
Tabel 4.1 Karakteristik Motor BLDC.....	32
Tabel 4.2 Hasil Pengujian <i>Controllability</i> .....	35
Tabel 4.3 Data Hasil Simulasi Sistem Kendali MRAC .....	42
Tabel 4.4 Perbandingan Data Hasil Simulasi dengan PID <i>tuner</i> .....	45
Tabel 4.5 Data Hasil Simulasi Sistem Kendali MRAC dengan Perubahan <i>Set point</i> .....	46
Tabel 4.6 Karakteristik <i>Waterproof DC fan</i> .....	49
Tabel 4.7 Data Hasil simulasi Sistem Kendali MRAC dengan Pembebanan.....	51
Tabel 4.8 Data Hasil Simulasi Sistem dengan Gangguan .....	55
Tabel 4.9 Kinerja Sistem .....	59

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini teknologi berkembang sangat pesat di berbagai bidang kehidupan seperti bidang industri, informasi, transportasi dan bidang-bidang lainnya. Salah satu contoh perkembangan teknologi yang ada saat ini adalah perkembangan motor listrik. Motor listrik adalah suatu perangkat yang dapat merubah energi listrik menjadi energi mekanik [1]. Salah satu motor listrik yang banyak digunakan saat ini yaitu Motor *Brushless* DC (BLDC).

Motor BLDC merupakan salah satu jenis motor listrik arus searah yang dirancang tanpa menggunakan sikat. Motor BLDC sudah banyak digunakan di industri seperti industri otomotif, konsumsi, kesehatan, otomasi industri dan instrumentasi. Motor ini tidak menggunakan sikat, medan magnet pada stator dengan medan magnet pada rotor akan berputar dengan kecepatan yang sama dan dikendalikan secara elektronik, sehingga mempunyai keuntungan seperti rasio inersia/torsi tinggi efisiensi tinggi, jangkauan pengaturan kecepatan yang besar dan rendahnya *electromagnetic interference* (EMI) [1].

Meskipun memiliki banyak keunggulan, motor BLDC juga memiliki beberapa kekurangan antara lain yaitu kurangnya kestabilan kecepatan motor saat diberikan sebuah beban sedemikian rupa, hal itu menyebabkan kecepatan motor BLDC kurang stabil. Mengingat motor BLDC sudah banyak diaplikasikan di berbagai bidang industri dan juga otomotif, maka performa dari motor ini harus baik. Untuk memastikan motor BLDC tetap dalam keadaan baik diperlukan sistem rekayasa kendali sebagai pengontrol sistem.

Sistem kendali sudah banyak diaplikasikan pada peralatan elektronik, termasuk motor BLDC. Salah satu sistem kendali yang telah diaplikasikan yaitu sistem kendali kecepatan motor dengan kendali *Proportional Integral Derivative* (PID) tunggal. Sistem kendali ini hanya mampu bekerja untuk kondisi yang bersifat linear. Sehingga sistem kendali PID tunggal ini belum mampu menghasilkan keluaran yang cukup baik apabila terjadi perubahan *set point* [2].

Berdasarkan permasalahan diatas, maka penulis melakukan sebuah penelitian untuk merancang sebuah sistem kendali PID dalam mengendalikan kestabilan motor BLDC yang bersifat adaptif yang dapat menghasilkan keluaran kestabilan motor BLDC dengan *error* yang rendah walaupun terjadi perubahan *set point*.

Terdapat beberapa penelitian mengenai sistem kendali PID pada motor BLDC, diantaranya adalah:

“Pengaturan Kecepatan Motor *Brushless* DC Menggunakan Kontroler *Fuzzy* Berbasis *Linear Quadratic Regulator*” oleh Fairuzza Dinansyar tahun 2016. Pada penelitian tersebut menggunakan kontroler *fuzzy* LQR untuk mengatur kecepatan motor BLDC, agar respon yang dihasilkan sama untuk pembebanan yang bervariasi sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan [3].

“*Speed Control of BLDC Motor using Adaptive Fuzzy PID Controller*” oleh R. Kandiban dan R. Arulmozhiyal tahun 2012. Dalam penelitian tersebut ingin membuktikan apakah benar bahwa kendali *Adaptive Fuzzy PID* dapat memberikan performa yang lebih baik dalam mengontrol kecepatan motor BLDC [4].

“Implementasi dan Analisis Kendali Kecepatan Motor BLDC 1 kW Menggunakan Algoritma PID” oleh Muchlis Dwi Ardiansyah dan Fatkhur Rohman tahun 2019. Pada penelitian tersebut pengambilan data dengan cara memasukkan nilai parameter secara *trial and error* dimana motor BLDC digabungkan dengan generator yang diberi beban lampu yang divariasikan [5].

“Pengendalian Kecepatan Motor *Brushless* DC (BLDC) Menggunakan Metode Logika *Fuzzy*” oleh Agung Dwi Yulianta, Sasongko Pramono Hadi dan Suharyanto pada tahun 2015. Dalam penelitian tersebut menggunakan metode logika *fuzzy* sebagai metode pengendalian kecepatan motor [6].

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada metode yang digunakan. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *Model Reference Adaptive Controller* (MRAC) untuk memodelkan sistem kendali dan mengontrol sistem kestabilan pada motor BLDC, dan jenis PID yang digunakan adalah jenis *adaptive* PID. Selain itu, pada penelitian ini menggunakan *Graphical User Interface* sebagai visualisasi dari sistem yang telah dirancang. Perancangan ini berperan sangat penting guna meminimalisir slip atau gangguan, sehingga sistem kecepatan motor BLDC memiliki tingkat kestabilan yang baik.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana cara pemodelan sistem kendali *adaptive* PID pada motor BLDC.
2. Bagaimana pengaruh sistem kendali *adaptive* PID terhadap kestabilan Motor BLDC.

## **1.3 Batasan Masalah**

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Metode yang digunakan untuk penalaan parameter PID adalah *adaptive* PID.
2. *Plant* yang digunakan Motor BLDC.
3. Simulasi pengendalian menggunakan *software Simulink* MATLAB.

## **1.4 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Dapat memodelkan simulasi sistem kendali *adaptive* PID untuk kestabilan Motor BLDC.
2. Mengetahui pengaruh sistem kendali *adaptive* PID terhadap kestabilan Motor BLDC.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat mengetahui pengaruh sistem kendali *adaptive* PID pada sistem kecepatan motor BLDC dan dapat membuat simulasi sistem kendali *adaptive* PID yang nantinya dapat digunakan pada berbagai peralatan yang menggunakan motor BLDC agar penggunaannya lebih efektif.

### **1.6 Hipotesis**

Sistem kendali *adaptive* PID yang dirancang dan disimulasikan pada motor BLDC ini dapat mengontrol dan menjaga kestabilan motor serta meminimalisir gangguan yang terjadi.

### **1.7 Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan Laporan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

#### **BAB I PENDAHULUAN**

Pada pendahuluan terdapat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, hipotesis dan sistematika penulisan.

#### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Pada tinjauan pustaka berisi tentang teori-teori yang mendasari penelitian ini.

#### **BAB III METODE PENELITIAN**

Pada metode penelitian terdapat waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode yang akan digunakan, serta diagram alir penelitian.

#### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada hasil dan pembahasan terdapat hasil penelitian serta analisis hasil penelitian yang diperoleh.

## BAB V PENUTUP

Pada penutup terdapat rangkuman akhir atau kesimpulan yang diperoleh dari hasil dan pembahasan serta saran untuk pengembangan penelitian ini lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian mengenai sistem kendali motor BLDC, diantaranya adalah:

“Implementasi dan Analisis Kendali Kecepatan Motor BLDC 1 kW Menggunakan Algoritma PID” oleh Muchlis Dwi Ardiansyah dan Fatkhur Rohman pada tahun 2019. Pada penelitian ini merancang sistem kendali motor BLDC menggunakan sistem kendali PID untuk mendapatkan nilai *error steady state* terkecil pada variasi kecepatan dan motor BLDC, dengan menggunakan metode *trial error* melalui simulasi Simulink MATLAB. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini yaitu nilai  $K_p = 0,8$ ;  $K_i = 6$  dan  $K_d = 0,02$ . Dengan nilai parameter tersebut motor BLDC dapat mempertahankan nilai *set point* dengan kestabilan yang tinggi (*error steady state* rendah) [5].

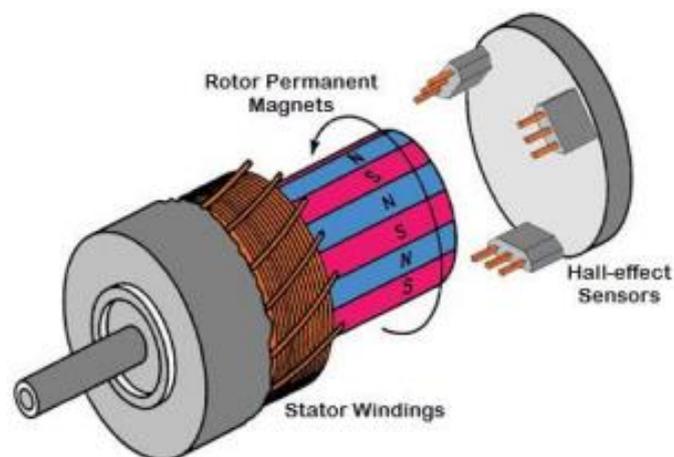
“Pengendalian Kecepatan Motor *Brushless* DC (BLDC) Menggunakan Logika *Fuzzy*” oleh Agung Dwi Yulianta, dkk pada tahun 2015. Pada penelitian ini pengendalian motor BLDC yang akan diuji menggunakan *fuzzy logic* dengan simulasi kecepatan keluaran berdasarkan referensi pengendalian *fuzzy*, sehingga diperoleh hasil pengendalian yang optimal. Defuzzifikasi yang digunakan yaitu COA/centroid, bisektor, MOM, LOM, dan SOM. Pada penelitian ini dihasilkan bahwa metode defuzzifikasi yang mampu mengikuti *setting* kecepatan yang diberikan adalah metode COA [6].

“Analisis Performa PID Pada Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC” oleh Muhammad Abdhul Aziz pada tahun 2021. Pada penelitian ini menggunakan

metode tuning *Ziegler-Nichols* dengan *software* MATLAB. Dari penelitian tersebut dihasilkan parameter PID dengan nilai  $K_p$  0.6996, nilai  $K_i$  2.3320, dan nilai  $K_d$  0.0525. Kemudian, hasil dari respon tanggapan sistem dibandingkan dengan hasil performa yang paling baik adalah kendali PI [1].

## 2.2 Motor *Brushless* DC

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) merupakan salah satu jenis motor DC yang merupakan motor sinkron yang tidak memiliki sikat. Motor BLDC ini memiliki stator yang berupa lilitan kawat yang digunakan sebagai medan magnet, rotor yang berupa magnet permanen serta memiliki 3 buah sensor *Hall* yang berfungsi untuk mendeteksi medan magnet dan menghasilkan tegangan yang proporsional.



Gambar 2.1 Konstruksi Motor BLDC.

Motor BLDC memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor DC konvensional lainnya. Kelebihan ini yang membuat motor BLDC banyak digunakan di bidang industri dan juga otomotif. Kelebihan dari motor BLDC yaitu:

1. Komutasinya dilakukan secara elektronik.
2. Jika dibandingkan dengan motor DC yang memiliki sikat, motor BLDC ini memiliki rentang kecepatan dan efisiensi yang lebih tinggi.
3. Umur operasi yang panjang dan saat beroperasi tidak ada suara atau tanpa suara.

### 2.2.1 Prinsip Kerja Motor BLDC

Prinsip kerja dari motor BLDC ini menggunakan prinsip elektromagnetik, gaya tarik menarik antara magnet permanen pada rotor dan elektromagnet pada stator. Untuk membuat motor BLDC berputar atau bergerak, pada lilitan stator harus diberikan energi secara berurutan. Pada saat kutub magnet rotor berada di dekat sensor Hall, maka sensor ini akan memberikan sinyal tinggi atau rendah, yang menunjukkan kutub N atau S lewat di dekat sensor. Berdasarkan kombinasi dari tiga sinyal sensor Hall ini maka urutan pergantian yang tepat dapat ditentukan [1].

Saat motor berputar, magnet permanen pada rotor akan bergerak melewati kumparan pada stator yang kemudian akan menginduksi potensial listrik pada kumparan tersebut dan terjadilah BEMF atau *Back electromotive force*. BEMF ini berbanding lurus dengan kecepatan motor [7].

### 2.2.2 Sensor Posisi Motor BLDC

Sistem komutasi pada motor BLDC berbeda dengan sistem komutasi pada motor DC konvensional. Pada motor BLDC sistem komutasi dilakukan secara elektronik. Oleh sebab itu, maka diperlukan sensor yang dapat memberikan informasi secara presisi dan akurat kepada kontroler untuk mengatur lilitan pada stator manakah yang akan di aliri listrik. Pengaturan ini berfungsi agar kecepatan dan torsi pada motor tetap konstan [3]. Apabila perubahan komutasi yang dilakukan tidak sesuai atau tidak tepat maka akan terjadi slip pada motor BLDC, jika terjadi slip maka kecepatan dan torsi pada motor BLDC ini tidak konstan dan memungkinkan membuat motor berhenti berputar.

Kecepatan putar motor dapat dilihat melalui persamaan berikut:

$$\omega = \frac{Vt - IaRa}{K\phi} \quad (2.1)$$

Dimana:

$\omega$  = kecepatan putar motor (rad/sec)

$Vt$  = tegangan masukan motor (V)

$I_a$  = arus masukan motor (A)

$R_a$  = hambatan jangkar motor (Ohm)

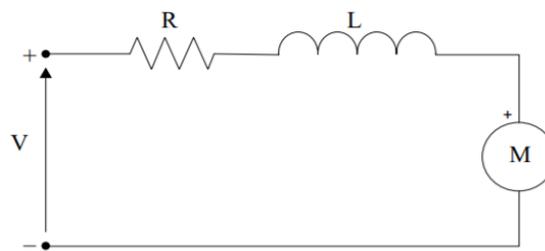
$K\Phi$  = konstanta fluks magnetik

Torsi yang dihasilkan pada motor BLDC tergantung dari besarnya arus dan jumlah lilitan yang ada pada stator, kekuatan medan magnet yang ada pada magnet permanen di rotor, celah udara antara stator dengan rotor serta panjang dari magnet permanen pada rotor [8]. Besarnya nilai torsi yang dihasilkan dapat dilihat pada persamaan berikut:

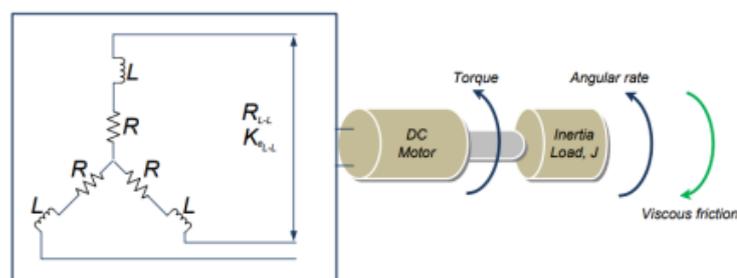
$$\tau = K\Phi \cdot I_a \quad (2.2)$$

### 2.2.3 Pemodelan Matematika Motor BLDC

Berikut dijelaskan pemodelan matematika untuk Motor BLDC.



Gambar 2.2 Rangkaian motor listrik sederhana.



Gambar 2.3 Diagram simetris BLDC.

Dengan menggunakan hukum *kirchoff* maka:

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.3)$$

Untuk kedudukan tetap (dimana kedudukan DC pada frekuensi 0) maka

$$V_s = Ri + e \quad (2.4)$$

Sedangkan, untuk kedudukan yang tidak stabil maka persamaan (2.3) diatur ulang dengan menambahkan BEMF, persamaan tersebut menjadi

$$e = -Ri - L \frac{di}{dt} + V_s \quad (2.5)$$

Dimana:

$V_s$  = sumber tegangan DC

$i$  = arus dinamo/arus motor

Berdasarkan hukum gerak *Newton* yang kedua, sifat matematis tergantung pada putaran pada sistem. Sistem pengaturan tersebut akan menghasilkan beban inersia ( $J$ )

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \sum T_i \quad (2.6)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} T_L \quad (2.7)$$

Dimana:

$T_e$  = Putaran elektrik

$k_f$  = gesekan konstan

$J$  = rotor inersia

$\omega_m$  = kecepatan sudut

$T_L$  = beban mekanik

Sehingga, putaran elektrik dan BEMF dapat dituliskan menjadi:

$$e = k_e \omega_m \quad (2.8)$$

Dan

$$T_e = k_t \omega_m \quad (2.9)$$

Dimana  $k_e$  adalah BEMF konstan dan  $k_t$  adalah putaran konstan. Persamaan (2.5) dan (2.6) dapat dituliskan menjadi:

$$\frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.10)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.11)$$

Persamaan (2.10) dan (2.11) tersebut dapat dievaluasi menggunakan transformasi *laplace* dengan membuat kondisi awal semuanya 0, maka untuk persamaan (2.10):

$$L \left\{ \frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \right\} \quad (2.12)$$

Berubah menjadi,

$$s i = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.13)$$

Dan untuk persamaan (2.11):

$$L \left\{ \frac{d\omega_m}{dt} = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \right\} \quad (2.14)$$

Berubah menjadi,

$$s \omega_m = -i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.15)$$

Dengan  $T_L = 0$  maka persamaan (2.15) di atas dapat ditulis menjadi

$$s \omega_m = -i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m \quad (2.16)$$

Dengan

$$i = \frac{s \omega_m + \frac{k_f}{J} \omega_m}{\frac{k_t}{J}} \quad (2.17)$$

Kemudian, persamaan (2.13) dapat ditulis menjadi

$$\left( \frac{s \omega_m + \frac{k_f}{J} \omega_m}{\frac{k_t}{J}} \right) \left( s + \frac{R}{L} \right) = -\frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.18)$$

$$\left\{ \left( \frac{s^2 J}{k_t} + \frac{s k_f}{k_t} + \frac{s R J}{k_t} + \frac{k_f R}{k_t} \right) + \frac{k_e}{L} \right\} \omega_m = \frac{1}{L} V_s \quad (2.19)$$

$$V_s = \left\{ \frac{s^2 J + s k_f + s R J + k_f R + k_e k_t}{k_t} \right\} \omega_m \quad (2.20)$$

Sehingga, *transfer function* atau fungsi alih dapat dicari dengan menggunakan rasio kecepatan sudut  $\omega_m$  dengan sumber tegangan  $V_s$  yaitu:

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{s^2 J + s k_f + s R J + k_f R + K_e k_t} \quad (2.21)$$

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{s^2 J + (R J + k_f L) + k_f R + K_e k_t} \quad (2.22)$$

Dengan mempertimbangkan asumsi berikut ini:

1. Gesekan konstan kecil, yaitu  $k_f$  mendekati 0, maka
2.  $R J \gg k_f L$  dan
3.  $k_e k_t \gg R k_f$

Dengan mengabaikan nilai 0, maka fungsi alih dapat disederhanakan menjadi:

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{s^2 J L + R J s + k_e k_t} \quad (2.23)$$

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{\frac{k_t R}{k_e k_t R}}{\frac{s^2 J L R + R J s R + k_e k_t R}{k_e k_t R + k_e k_t R + k_e k_t R}} \quad (2.24)$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\frac{R J}{k_e k_t R} s^2 + \frac{R J}{k_e k_t} s + 1} \quad (2.25)$$

Berdasarkan persamaan (2.25) di atas maka diperoleh rumus:

Untuk *mechanical (time constant)*:

$$\tau_m = \frac{R J}{k_e k_t} \quad (2.26)$$

Untuk *electrical (time constant)*:

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (2.27)$$

Kemudian, substitusikan nilai  $\tau_m$  dan  $\tau_e$  ke persamaan (2.25), sehingga diperoleh

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1} \quad (2.28)$$

Pada pemodelan motor BLDC tidak jauh berbeda dengan motor DC, hal yang membedakannya yaitu pada peletakan fasanya yang dimana akan mempengaruhi hasil keseluruhan pemodelannya. Pada persamaan (2.25) sampai (2.27) dapat dilihat perbedaan antara motor DC dengan motor BLDC. Perbedaan tersebut dapat dilihat melalui persamaan berikut:

Untuk *mechanical (time constant)*:

$$\tau_m = \sum \frac{RJ}{k_e k_t} = \frac{J \sum R}{k_e k_t} \quad (2.29)$$

Untuk *electrical (time constant)*:

$$\tau_e = \sum \frac{L}{R} = \frac{L}{\sum R} \quad (2.30)$$

Karena adanya susunan sistematis dan fase ke-3, persamaan untuk *mechanical time constant* dan *electrical time constant* menjadi:

$$\tau_m = \frac{J \cdot 3R}{k_e k_t} \quad (2.31)$$

$$\tau_e = \frac{L}{3R} \quad (2.32)$$

Dan untuk efek fase yaitu,

$$\tau_m = \frac{3 \cdot R \cdot \emptyset J}{\left( \frac{k_e(L-L)}{\sqrt{3}} \right) k_t} \quad (2.33)$$

$$\tau_m = \frac{3 \cdot R \cdot \emptyset J}{k_e \cdot k_t} \quad (2.34)$$

Dimana  $k_e$  merupakan nilai dari fase EMF tegangan konstan:

$$k_e = \frac{k_e(L-L)}{\sqrt{3}} \quad (2.35)$$

Terdapat hubungan antara  $k_e$  dan  $k_t$  yaitu menggunakan tenaga elektrik (sisi kiri) dan (sisi kanan) maka:

$$\sqrt{3} \times E \times I = \frac{2\pi}{60} \times N \times T \quad (2.36)$$

$$\frac{E}{N} = \frac{T}{I} \times \frac{2\pi \times 1}{60 \times \sqrt{3}} \quad (2.37)$$

$$k_e = k_t \times \frac{2\pi \times 1}{60 \times \sqrt{3}} \quad (2.38)$$

$$k_e = k_t \times 0.0605 \quad (2.39)$$

Dimana:

E = Percepatan (v/s)

N = Kecepatan putar motor (Rad/sec)

T = Medan magnet (Nm)

I = Arus listrik (A)

$$k_e = \left[ \frac{V-secs}{rad} \right] : \text{Torsi elektrik}$$

$$k_e = \left[ \frac{N-M}{A} \right] : \text{Torsi konstan}$$

Sehingga persamaan fungsi alih untuk motor BLDC dapat dituliskan sebagai berikut dengan menghitung efek konstan dan fase:

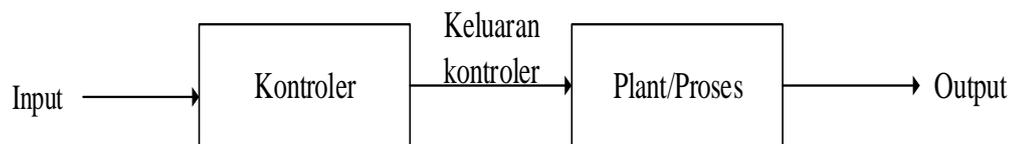
$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1} \quad (2.40)$$

### 2.3 Sistem Kendali

Sistem adalah kumpulan dari beberapa komponen yang saling berhubungan dan menjadi satu kesatuan untuk menjalankan sebuah aksi. Kendali adalah mengawasi, mengontrol, memerintahkan, mengendalikan. Jadi, sistem kendali adalah proses pengaturan atau pengendalian terhadap suatu besaran untuk mencapai harga atau *range* tertentu. Tujuan dari sistem kendali yaitu untuk mendapatkan titik optimal pada sebuah sistem yang dirancang. Sistem kendali dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu sebagai berikut:

### 2.3.1 Kalang Terbuka (*Open Loop*)

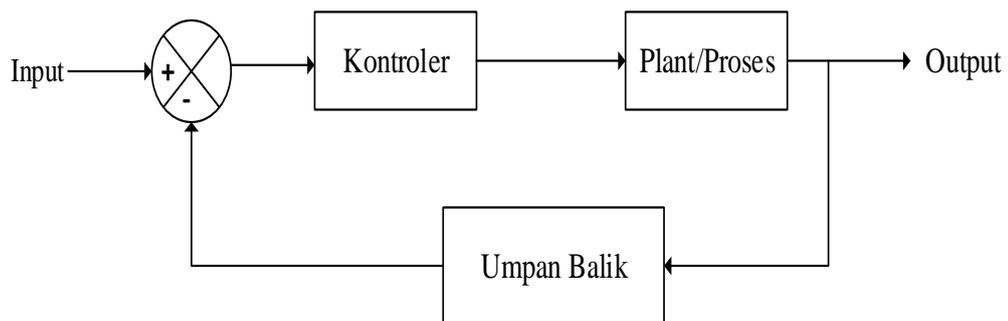
Sistem kendali kalang terbuka atau *open loop* adalah salah satu jenis sistem kendali yang aksi kontrolnya tidak tergantung dari keluaran sistem. Pada *open loop* saat masukan diberikan, maka akan diproses lalu mengeluarkan keluaran tanpa adanya umpan balik dari keluaran dan apabila terjadi gangguan pada sistem maka tidak dapat dikoreksi, sehingga pada *open loop* masih membutuhkan peranan manusia sebagai operator.



Gambar 2.4 Sistem Kendali *Open Loop*.

### 2.3.2 Kalang Tertutup (*Close Loop*)

Sistem kendali kalang tertutup atau *close loop* adalah salah satu jenis sistem kendali yang aksi kontrolnya bergantung pada keluaran sistem. Pada *close loop* saat masukan dimasukkan dan diproses maka akan ada umpan balik dari keluarannya, dimana jika terjadi kesalahan atau *error* maka akan diperbaiki agar nilai keluaran sistem yang dihasilkan semakin mendekati nilai yang diharapkan.

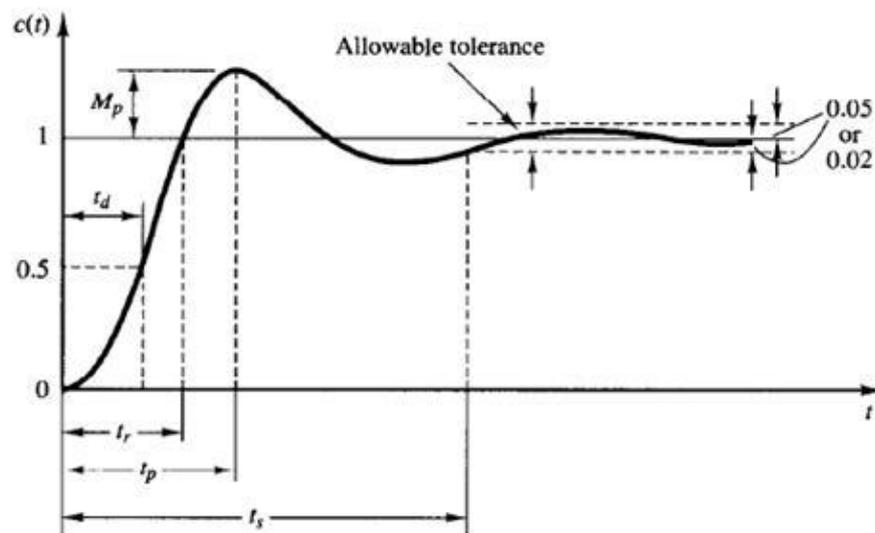


Gambar 2.5 Sistem Kendali *Close Loop*.

Perbedaan antara sistem kendali *open loop* dan *close loop* dapat dilihat pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5 yang menunjukkan ada atau tidaknya umpan balik keluaran untuk dibandingkan kembali dengan masukan. Pada sistem *close loop* terdapat *summing point* dengan tanda (+/-) yang berfungsi untuk menjumlahkan

sinyal yang masuk dan kemudian membandingkan besaran *set point* dengan sinyal hasil pengukuran [13].

### 2.3.3 Karakteristik Respon Sistem



Gambar 2.6 Kurva karakteristik respon sistem.

Respon sistem merupakan salah satu parameter dari keberhasilan perancangan sistem yang dibuat, apabila respon sistem yang dihasilkan sesuai dengan keadaan yang diinginkan maka dapat dikatakan perancangan sistem tersebut berhasil. Perancangan suatu sistem pengendalian bertujuan untuk mendapatkan hasil kerja yang optimal dari sebuah sistem yang dikendalikan. Kurva karakteristik dari respon sistem dapat dilihat pada Gambar 2.6. Beberapa parameter yang dapat digunakan untuk mengetahui hasil kerja dari sistem pengendalian antara lain:

#### 2.3.3.1 Waktu tunda / *delay time* ( $t_d$ )

*Delay time* adalah ukuran waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai setengah dari nilai akhir yang pertama.

#### 2.3.3.2 Waktu naik / *rise time* ( $t_r$ )

*Rise time* adalah ukuran waktu yang menyatakan keadaan respon yang diukur dari respon 10% sampai 90% atau 0% sampai 100%.

### 2.3.3.3 Waktu puncak / *peak time* ( $t_p$ )

*Peak time* adalah ukuran waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai titik puncak *overshoot* yang pertama.

### 2.3.3.4 Waktu tunak / *settling time* ( $t_s$ )

*Settling time* adalah ukuran waktu yang dibutuhkan oleh kurva respon untuk mencapai keadaan tetap dalam *range* nilai akhir yang ditetapkan oleh persentase absolut berkisar 2% atau 5% dari respon *steady state*.

### 2.3.3.5 *Overshoot* Maksimal / *Maximum Overshoot* ( $M_p$ )

*Maximum Overshoot* adalah ukuran waktu yang menyatakan nilai puncak maksimum dari kurva respon yang merupakan perbandingan nilai maksimum respon yang melampaui nilai *steady state* dengan nilai *steady state* atau dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$M_p = \frac{\text{nilai puncak pertama} - \text{nilai akhir}}{\text{nilai akhir}} \times 100\% \quad (2.41)$$

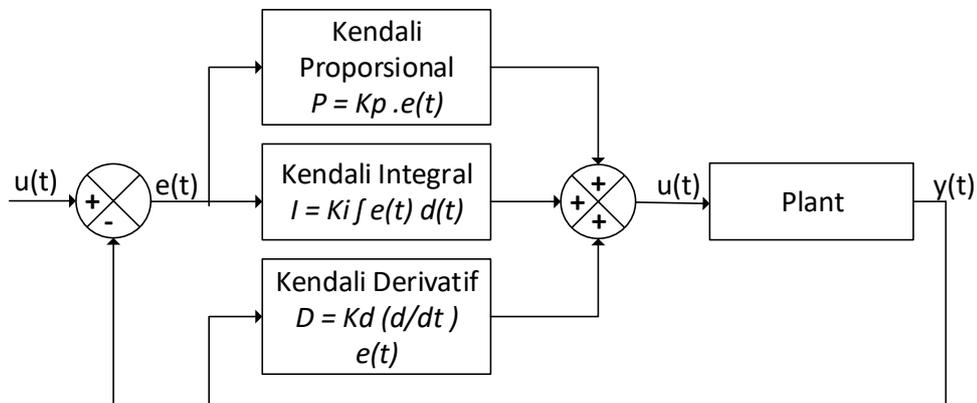
## 2.4 Sistem Kendali *Proportional Integral Derivative* (PID)

Sistem kendali PID adalah sistem yang tersusun dari tiga elemen pengendali yaitu *proportional*, *integral* dan *derivative*. Ketiga elemen tersebut dapat dikombinasikan menjadi beberapa tipe sistem kontrol sesuai dengan *plant* yang dibutuhkan. Elemen-elemen tersebut memiliki pengaruh yang berbeda-beda terhadap sistem yang dikontrol. Di bawah ini merupakan tabel yang menunjukkan pengaruh  $K_p$ ,  $K_d$  dan  $K_i$  pada sistem *close loop* yang merupakan *gain* dari elemen P, I dan D.

Tabel 2.1 Pengaruh respon pengendali PID

Respon Close loop	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady State Error
Kp	Menurun	Meningkat	Perubahan kecil	Menurun
Ki	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
Kd	Perubahan kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil

Dari Tabel 2.1 di atas dapat dilihat bahwa pengendali *proportional* (Kp) akan membuat waktu naik (*rise time*) menurun dan meningkatkan *overshoot* serta menurunkan *error* yang terjadi saat keadaan tunak. Pengendali *integral* (Ki) akan meningkatkan nilai *overshoot* dan *settling time*, menurunkan waktu naik atau *rise time* serta menghilangkan *error* yang terjadi di keadaan tunak.



Gambar 2.7 Diagram Blok Kendali PID.

Dari blok diagram dapat diketahui bahwa penggabungan kendali proporsional, integral dan derivatif dapat dituliskan dalam bentuk *laplace* menjadi persamaan  $u(t)$  yaitu hasil keluaran dari sistem kendali PID.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) d(t) + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.42)$$

Atau dalam bentuk *transfer function* dapat dituliskan sebagai berikut:

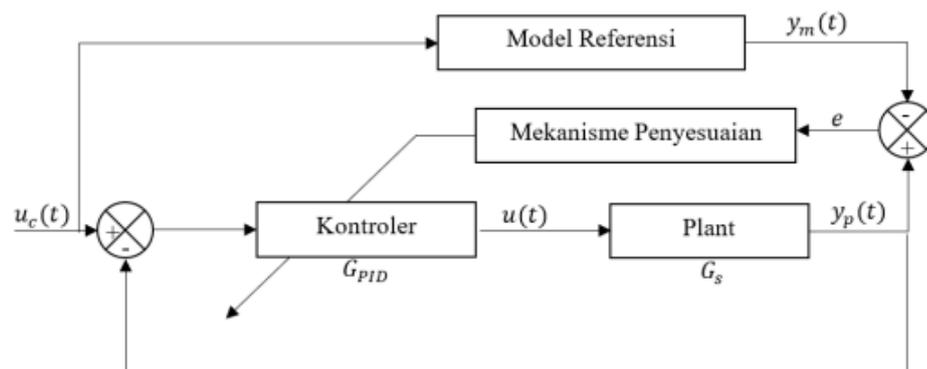
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right\} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.43)$$

Dimana  $K_p$  adalah penguatan *Proportional*,  $K_i$  adalah penguatan *integral* dan  $\tau_i$  adalah waktu *integral*,  $K_d$  adalah penguatan *diferensial* dan  $\tau_d$  adalah waktu *derivative*.  $K_p$  berfungsi untuk membuat kecepatan respon sistem meningkat, jika

nilai  $K_p$  semakin besar maka respon dari sistem akan lebih cepat.  $K_i$  berfungsi untuk memperbaiki atau menghilangkan *error* yang terjadi pada *steady state*.  $K_d$  berfungsi untuk meningkatkan kestabilan sistem dan mengurangi *overshoot* [9].

## 2.5 Sistem Kendali *Model Reference Adaptive Controller* (MRAC)

Sistem kendali adaptif adalah sistem yang kendali yang dapat beradaptasi dengan kondisi sistem yang dikontrol, baik itu dari luar sistem maupun dari dalam sistem itu sendiri. Sistem kendali adaptif ini dapat memperbaiki kinerja sistem dan mempertahankan stabilitas sistem. Sistem kendali adaptif sendiri dibagi menjadi beberapa tipe, salah satunya yaitu *Model Reference Adaptive Controller* (MRAC). MRAC merupakan salah satu skema adaptif dimana performansi keluaran sistem (proses) mengikuti dari performansi keluaran model referensinya. Parameter-parameter pengendali diatur melalui mekanisme pengaturan yang didasari pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran *plant* dengan keluaran model referensi [10]. Untuk lebih jelas, dapat dilihat diagram blok dari MRAC pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram Blok Kendali MRAC.

Dari diagram blok di atas dapat dilihat bahwa terdapat 2 *loop*, *loop* yang pertama yaitu *loop* umpan balik normal antara keluaran proses dengan kontroler dan pada *loop* yang kedua adalah *loop* yang digunakan mekanisme pengaturan kontroler.

Pada *loop* kedua ini dilakukan proses untuk *update* parameter-parameter kontroler maupun parameter *plant* sesuai dengan skema adaptif yang digunakan. Pengaturan dilakukan dengan meminimalkan sinyal *error*, sehingga keluaran sistem ( $y$ ) sesuai dengan keluaran model referensinya ( $y_m$ ) [10].

### 2.5.1 Aturan *Massachusetts Institute of Technology* (MIT)

Aturan MIT adalah hukum penyesuaian parameter skalar yang diusulkan sekitar tahun 1960 yang digunakan untuk kendali adaptif. Aturan MIT merupakan turunan dari hasil perhitungan aturan adaptasi dengan menggunakan metode *gradient*. Pada aturan MIT *loop* tertutup kontroler memiliki parameter yang dapat diatur berupa  $\theta$ . Respon sistem *loop* tertutup ditentukan oleh model yang keluarannya dinotasikan dengan  $y_m$  dan keluaran proses dinotasikan sebagai  $y$ . *Error* ( $e$ ) merupakan selisih antara keluaran  $y$  dari sistem dengan keluaran dari model  $y_m$ . Pengaturan parameter dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian (*The loss function* ( $J(\theta)$ )) [10]:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.44)$$

Maka untuk mengubah parameter kendali  $\theta$  dalam arah negatif terhadap gradien  $J$ .

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2.45)$$

Koefisien  $\gamma$  adalah koefisien laju adaptasi. Dalam MRAC aturan MIT disebut juga dengan penguat adaptasi. Koefisien  $\gamma$  merupakan faktor pengali terhadap deret aritmatika. Dalam beberapa aplikasi ditemukan bahwa penentuan penguat adaptasi sangat penting dan nilainya tergantung pada tingkat kebutuhan sinyal.

Pada penelitian ini, penentuan model matematika MRAC dapat ditentukan menggunakan karakteristik orde dua dengan mengikuti persamaan model referensi berikut:

$$y_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.46)$$

Dimana

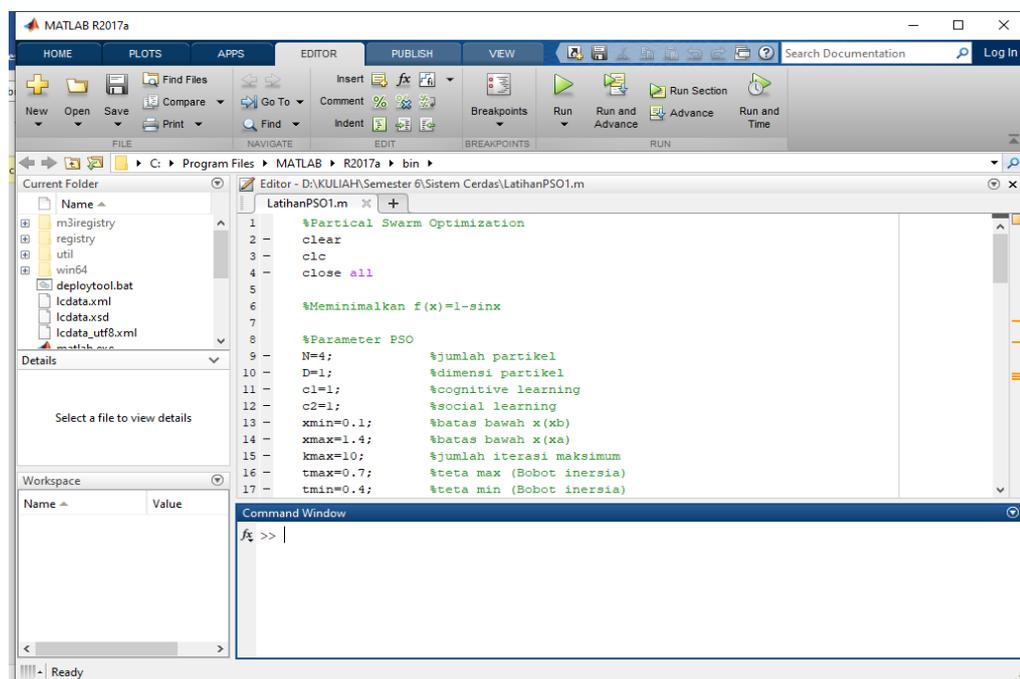
$$\omega_n = \frac{4}{\zeta t_s} \quad (2.47)$$

$$t_s = \frac{4}{\zeta \omega_n} \quad (2.48)$$

Besarnya nilai  $\zeta$  dapat mempengaruhi respon model referensi. Nilai  $\zeta < 1$  respon akan *underdamp*,  $\zeta = 1$  respon akan *critical damp*, dan  $\zeta > 1$  respon akan *overdamp*.

## 2.6 Matrix Laboratory (MATLAB)

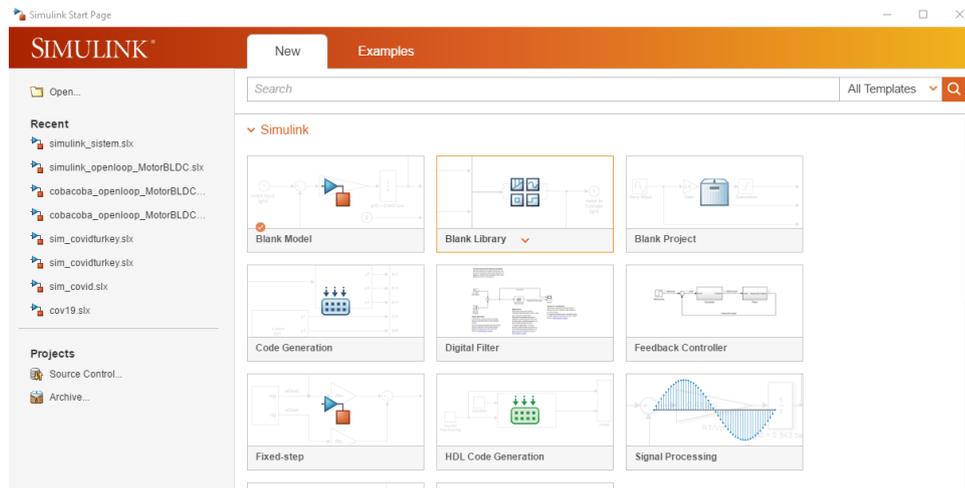
*Matrix laboratory* atau MATLAB merupakan sebuah *software* yang dapat melakukan suatu analisis dan juga komputasi. MATLAB dikembangkan oleh MathWorks. Pada MATLAB terdapat alat bantu (*toolbox*) yang menggunakan mesin simbolik MuPAD. *Toolbox* tersebut dapat memungkinkan akses terhadap kemampuan dalam komputasi aljabar.



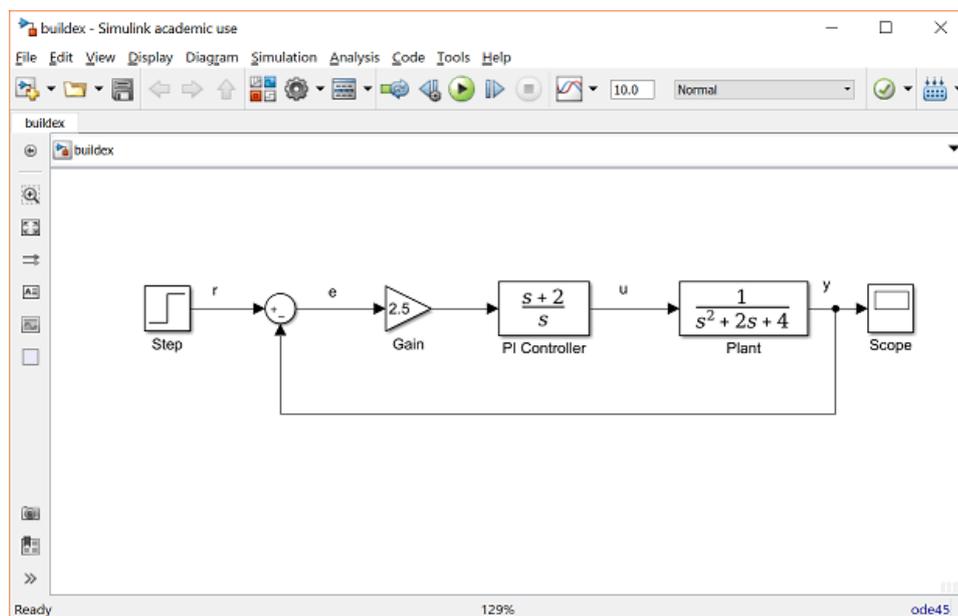
Gambar 2.9 Tampilan *software* MATLAB R2017a.

Pada penelitian ini *toolbox* yang akan digunakan yaitu *Simulink* dan *PID tuner*. *Simulink* merupakan salah satu *toolbox* dari MATLAB yang berfungsi sebagai

pemrograman grafis dan membuat simulasi sistem yang dinamik. *Simulink* dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan juga analisis dari sebuah sistem yang dinamis dengan antarmuka pengguna grafis. Analisis sistem yang dapat dilakukan oleh *Simulink* bisa berupa sistem linier dan juga sistem non-linier.



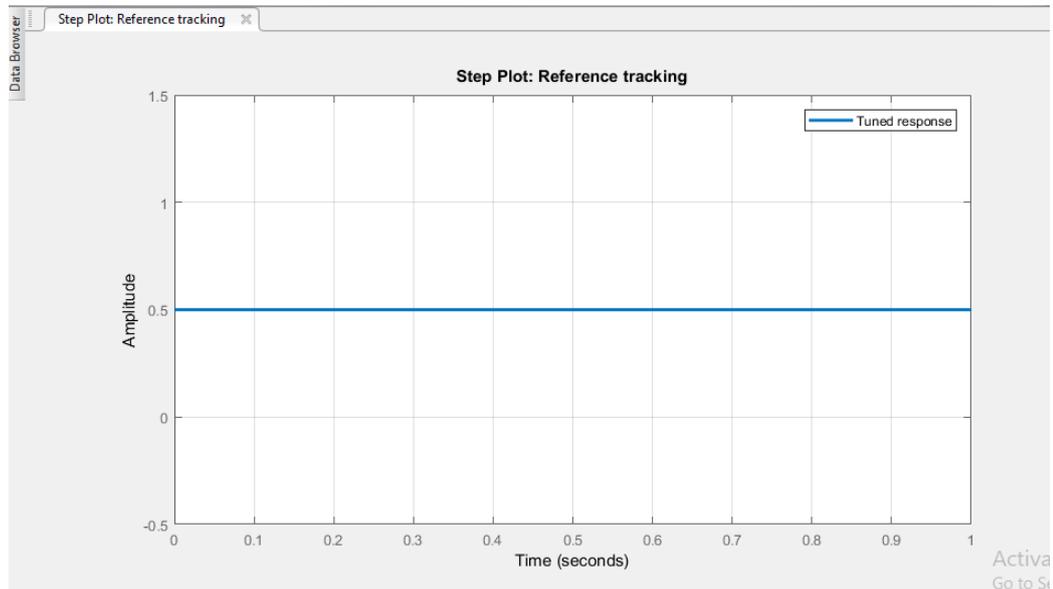
Gambar 2.10 Tampilan awal *toolbox Simulink*.



Gambar 2.11 Tampilan pemodelan simulasi sistem pada *Simulink*.

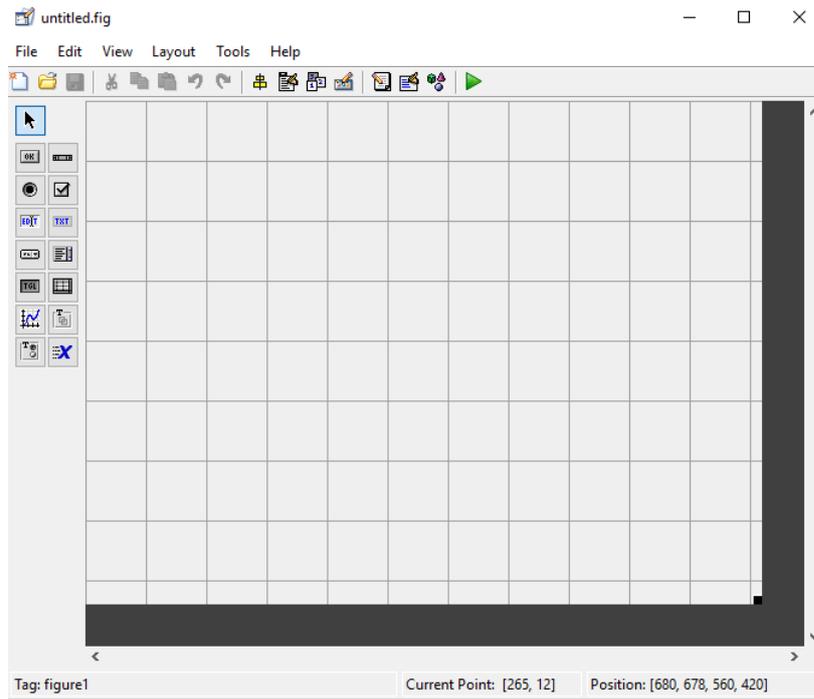
PID *tuner* merupakan salah satu *toolbox controller* yang ada pada MATLAB yang memiliki fungsi sebagai tuning otomatis yang kemudian dapat dilihat hasil tanggapan dari sistem yang kendalikan. Pada PID *tuner* terdapat komponen yang dapat digunakan untuk mengatur kecepatan dan ketajaman dari tanggapan sistem

sesuai yang diinginkan yang kemudian dapat diketahui parameter-parameter PID yang dihasilkan.



Gambar 2.12 Tampilan PID *tuner*.

GUI atau *Graphical User Interface* merupakan salah satu *toolbox* yang ada pada MATLAB yang berfungsi untuk menampilkan objek yang menyampaikan informasi dan mewakili tindakan. GUI dalam MATLAB dirangkum dalam sebuah aplikasi *guide (Graphical User Interface Builder)*. Pada GUI terdapat komponen-komponen seperti tombol, kotak, teks, panel, slider, *pop-up menu*, grafik.



Gambar 2.13 Tampilan GUIDE.

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian dilakukan di Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik, Laboratorium Terpadu Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung. Penelitian ini dimulai dari bulan Februari 2023 sampai dengan bulan Juli 2023.

#### 3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

Tabel 3.1 Alat dan bahan

Nama alat dan Bahan	Justifikasi Penggunaan
Komputer, AMD Ryzen 3 3200U <i>with Radeon Vega Mobile Gfx</i> , RAM 8GB 64-bit	Sebagai tempat menyusun algoritma program serta menjalankan simulasi model sistem kendali <i>adaptive</i> PID pada motor BLDC.
<i>Software</i> MATLAB R2017a	Mensimulasikan model sistem kendali <i>adaptive</i> PID pada motor BLDC dari persamaan matematika dan juga melalui <i>toolbox Simulink</i> .

Pada penelitian ini, alat dan bahan yang digunakan terbagi menjadi 2 yaitu *hardware* yang berupa Laptop atau PC dan *software* yang berupa aplikasi MATLAB R2017a. MATLAB digunakan untuk mensimulasikan model sistem yang akan dirancang pada penelitian ini. Penggunaan alat dan bahan yang dipakai yaitu:

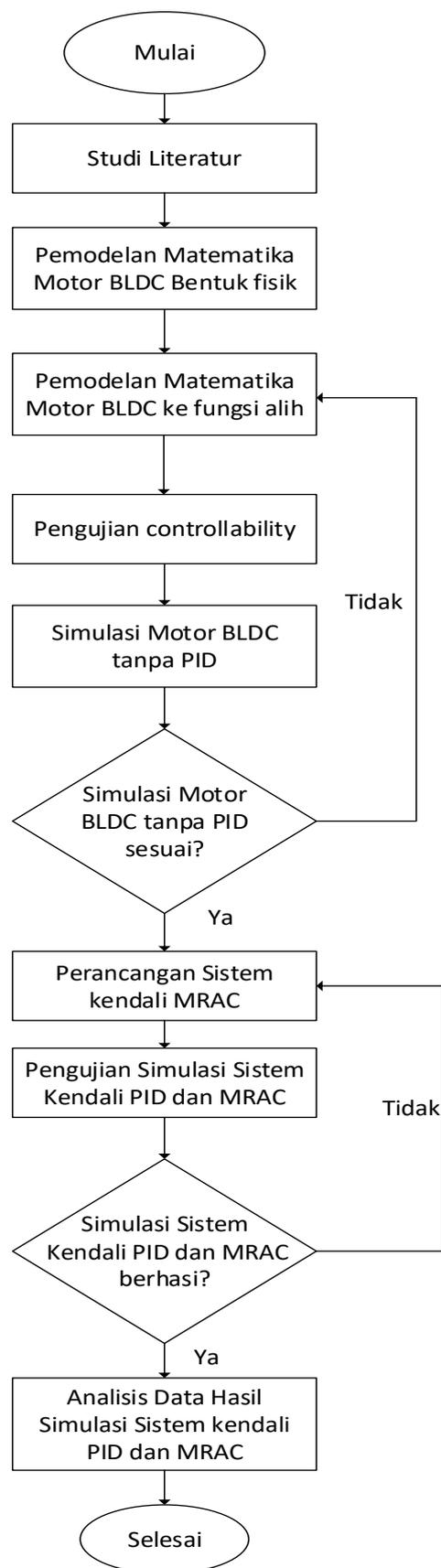
1. Listing program di *command windows* pada MATLAB digunakan untuk membuat program pemodelan matematika pada motor BLDC dan juga model referensi yang akan dibuat, serta digunakan untuk melakukan pengujian *controllability* pada sistem motor BLDC.
2. Penggunaan *toolbox Graphical User Interface (GUI)* digunakan untuk menampilkan hasil dari perancangan sistem kendali *adaptive* PID pada motor BLDC yang telah dirancang secara visual.
3. Penggunaan *toolbox Simulink* digunakan untuk merancang dan membuat model simulasi dari sistem motor BLDC sebelum ditambahkan *controller* dan juga sistem kendali *adaptive* PID pada motor BLDC. Pada *simulink* ini akan menampilkan bagaimana perancangan sistem simulasi kendali dan juga menjalankan simulasi tersebut yang kemudian akan ditampilkan hasilnya pada *scope*.
4. Penggunaan *toolbox PID tuner* digunakan untuk mensimulasikan sistem motor BLDC dengan kendali PID dengan cara *tuning* secara otomatis sehingga diperoleh nilai parameter-parameter  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang diharapkan dan kemudian hasil tersebut akan dijadikan karakteristik respon yang diharapkan dalam perancangan sistem ini.

### 3.3 Diagram Alir Perancangan Simulasi Sistem Kendali

Tahapan dan metode yang digunakan pada penelitian ini dideskripsikan melalui diagram alir pada Gambar 3.1. Adapun Tahapan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan studi literatur mengenai teori-teori yang mendasari penelitian yang akan dilakukan.
2. Menentukan parameter dari motor BLDC yang akan digunakan dan memodelkannya ke dalam bentuk persamaan matematika dan juga fungsi alihnya.
3. Simulasi sistem *open loop* dari pemodelan motor BLDC yang telah dibuat dengan menggunakan *simulink* MATLAB.

4. Pengujian *controllability* pada sistem motor BLDC yang akan dikendalikan.
5. Menentukan karakteristik respon motor BLDC yang diinginkan menggunakan *PID tuner*.
6. Menentukan model referensi MRAC untuk motor BLDC menggunakan aturan MIT sehingga diperoleh persamaan fungsi alihnya untuk melakukan pembaruan parameter sinyal berupa nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ .
7. Perancangan simulasi sistem kendali MRAC pada *Simulink* MATLAB berdasarkan model motor BLDC yang akan dikendalikan dan model referensi MRAC yang telah ditentukan.
8. Simulasi sistem kendali MRAC yang telah dibuat dengan melakukan beberapa pemilihan gain adaptasi untuk mendapatkan karakteristik respon yang paling baik dan dapat mengikuti model referensi yang dirancang.
9. Pengambilan data dan analisa tanggapan sistem yang dihasilkan oleh simulasi sistem.
10. Penyusunan laporan tugas akhir berdasarkan data hasil dan analisis data.



Gambar 3.1 Diagram alir perancangan dan simulasi sistem kontrol.

### 3.4 Parameter Motor BLDC

Pada penelitian ini motor BLDC yang digunakan adalah Motor BLDC dengan tipe *Maxon EC flat* Ø 45 mm, berikut adalah spesifikasi motor yang digunakan:

Tabel 3.2 Parameter Motor BLDC

Parameter Motor BLDC	Nilai	Satuan
<b>Nilai Tegangan nominal</b>		
<i>Nominal Voltage</i>	12.0	V
<i>No load Current</i>	150	mA
<i>Nominal Speed</i>	2850	Rpm
<i>No load Speed</i>	4371	Rpm
<i>Nominal Torque</i>	59.1	mNm
<i>Nominal Current</i>	2.13	A
<i>Stall Torque</i>	255	mNm
<i>Starting Current</i>	10.0	A
<i>Maximum Efficiency</i>	77	%
<b>Karakteristik</b>		
<i>Terminal resistance phase to phase (R)</i>	1.1	$\Omega$
<i>Terminal inductance phase to phase (L)</i>	0.50	mH
Putaran konstan ( $k_t$ )	25.5	mNm/A
Kecepatan konstan ( $k_e$ )	35.4	Rpm/V
Gradiasi kecepatan/putaran ( $k_0$ )	17.6	Rpm/Nm
<i>Mechanical time constant (<math>k_m</math>)</i>	16.2	mS
<i>Rotor Inertia (J)</i>	82.5	$gcm^2$
<i>Number of phasa</i>	3	

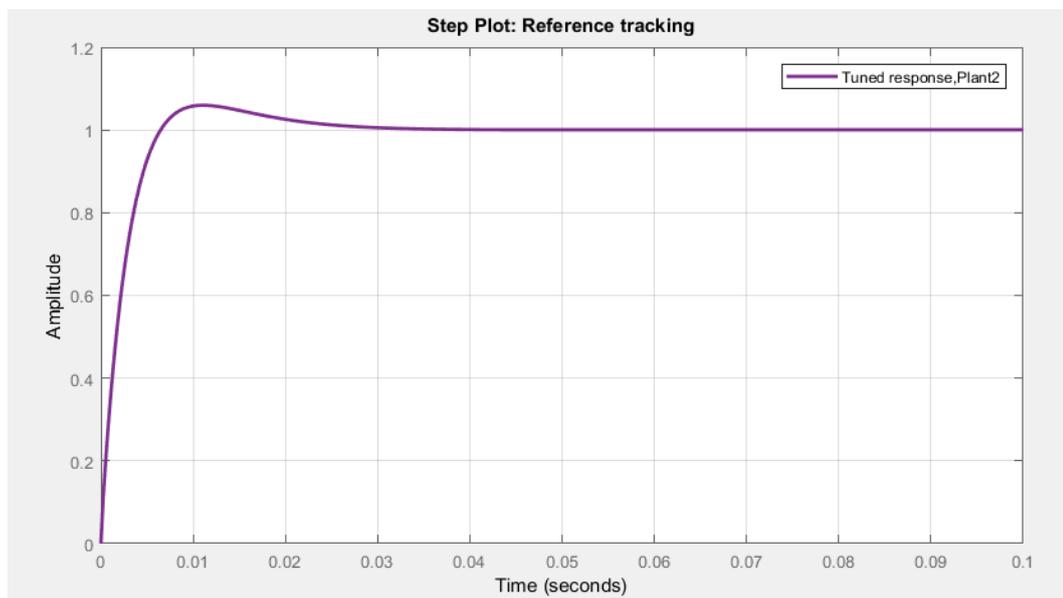
Pada penelitian ini, karakteristik utama dari Motor BLDC dengan tipe *Maxon EC flat* Ø 45 mm yang digunakan terdapat pada Tabel 3.2. Dari karakteristik tersebut maka perancangan simulasi sistem kendali *adaptive* PID ini bertujuan untuk memberikan sinyal keluaran yang memiliki respon tanggapan yang sesuai dengan sifat yang diinginkan. Adapun respon tanggapan yang diinginkan pada penelitian ini yaitu memiliki *settling time* dan *rise time* yang singkat dan *overshoot* yang kecil. Sehingga performa dari motor BLDC ini dapat lebih efektif lagi.

### 3.4.1 Menentukan Pemodelan Matematika Motor BLDC

Parameter motor BLDC dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan dari parameter-parameter tersebut maka dapat dibuat pemodelan matematika sistem kecepatan pada motor BLDC dalam bentuk fisik dan juga fungsi alihnya mengikuti persamaan (2.40). Data-data yang diperlukan untuk memodelkan sistem tersebut yaitu resistansi dan induktansi dari motor ( $R$  dan  $L$ ), inersia dari rotor ( $J$ ), dan konstanta waktu mekanis ( $k_m$ ).

Sebelum menentukan model referensi dari sistem kendali MRAC-PID yang akan dibuat maka perlu dilakukan perhitungan dalam sistem kendali *closed loop* antara sistem kendali PID dengan *plant* ingin dikendalikan, agar karakteristik respon yang dihasilkan sesuai dengan karakteristik respon yang diinginkan.

Pada penelitian ini karakteristik respon yang diinginkan terlihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Respon Motor BLDC yang diharapkan.

Dari Gambar 3.2 dapat diketahui bahwa karakteristik respon yang diharapkan dari hasil penelitian ini memiliki nilai *rise time* sebesar 0.00439 detik, *settling time* 0.0218 detik, *Overshoot* sebesar 5.97%.

### 3.4.2 Merancang Sistem Kendali MRAC-PID

Setelah didapatkan karakteristik respon yang diharapkan maka yang selanjutnya yaitu merancang sistem kendali MRAC-PID yang akan digunakan. Adapun alur perancangan kendali MRAC sebagai berikut:

1. Membuat pemodelan matematika dari karakteristik motor BLDC dan memastikan bahwa sistem termasuk orde 1 ataupun orde 2.
2. Setelah membuat pemodelan matematika maka yang selanjutnya adalah membuat model referensi yang disesuaikan dengan parameter dari sistem kecepatan pada motor BLDC.
3. Langkah selanjutnya yaitu merancang pengendali MRAC menggunakan aturan MIT.
4. Setelah merancang pengendali MRAC, langkah selanjutnya yaitu menentukan nilai masing-masing  $\gamma$  untuk mendapatkan respon yang diinginkan dengan metode *heuristik*. Rancangan metode ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja dari *plant* yang akan dikendalikan.

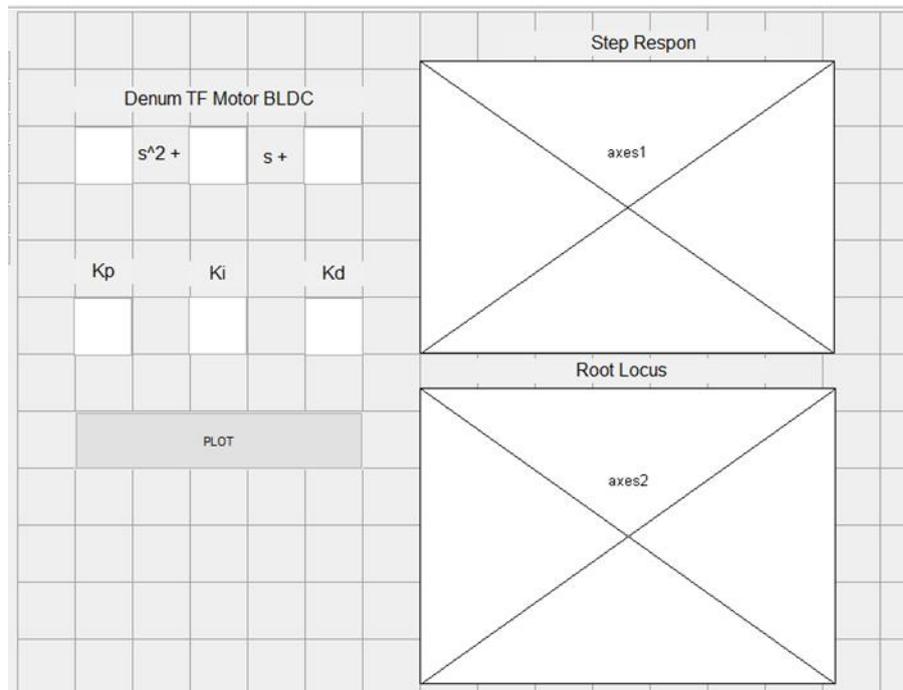
### 3.5 Merancang *Graphical User Interface* (GUI)

Setelah melakukan perancangan sistem, maka sistem tersebut dapat dilihat secara visual menggunakan *toolbox* GUI. Adapun langkah-langkah dalam merancang GUI pada sistem *adaptive* PID yaitu:

1. Menentukan sistem *adaptive* yang telah dirancang menggunakan MRAC pada *Simulink* yang akan ditampilkan secara visual melalui GUI.
2. Menambahkan komponen-komponen yang ada pada GUI untuk membuat visualisasi sistem.
3. Memprogram sistem tersebut dalam GUI dan memasukkan nilai parameter-parameter ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) yang didapatkan dari hasil simulasi menggunakan *Simulink*.

- Menjalankan program dari GUI tersebut sehingga dapat dilihat visualisasi dari sistem *adaptive* yang telah disimulasikan menggunakan *Simulink*.

Pada penelitian ini, GUI dari sistem yang akan ditampilkan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Tampilan GUI Sistem Motor BLDC.

## BAB V

### PENUTUP

Adapun hasil dari penelitian ini dirangkum dan dirumuskan kesimpulan yang menerangkan tujuan dari penelitian ini. Kekurangan dan kendala yang dialami selama penelitian ini dapat dijadikan saran untuk penelitian selanjutnya.

#### 5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh berdasarkan hasil pengujian dan analisis adalah sebagai berikut:

1. Telah dilakukan pemodelan sistem kendali *adaptive* PID pada *plant* motor BLDC. Sistem kendali *Model Reference Adaptive Controller* (MRAC) dapat digunakan untuk menstabilkan sistem *plant* motor BLDC dengan nilai parameter masing-masing sebesar  $K_p = 0,4$  ;  $K_i = 50,75$   $K_d = 0,0000867$ . Berdasarkan hasil simulasi, sistem kendali MRAC telah berhasil memberikan peningkatan efisiensi berkisar antara 4,2% hingga 21,9% dalam 4 kondisi yang berbeda.
2. Dari hasil pengujian respon sistem, sistem kendali MRAC tanpa pembebanan dan gangguan memiliki pengaruh yang cukup baik terhadap kestabilan *plant* motor BLDC. Sistem dapat menghasilkan tingkat keberhasilan sebesar 98,9% dengan *error* sebesar 1,1%.
3. Hasil pengujian respon sistem dengan perubahan nilai *set point* menunjukkan bahwa sistem dapat bekerja dengan baik. Kendali MRAC dapat beradaptasi dengan tingkat *error* yang terjadi sebesar 1,15% dan tingkat keberhasilan sistem sebesar 98,85%.

4. Hasil pengujian respon sistem dengan pembebanan menunjukkan bahwa sistem kendali MRAC belum cukup baik dalam menjaga tingkat kestabilannya, dimana tingkat *error* yang terjadi pada sistem sebesar 18,8% dan tingkat keberhasilan sistem sebesar 81,2%.
5. Hasil pengujian respon sistem dengan pemberian gangguan menunjukkan bahwa sistem kendali MRAC dapat menjaga tingkat kestabilannya dengan tingkat *error* yang terjadi pada sistem sebesar 3,5% dan tingkat keberhasilan sistem sebesar 96,5%.

## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, terdapat beberapa hal yang disarankan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Dalam melakukan *tuning* PID dapat metode *tuning* PID yang lain seperti metode *ziegler Nichols*.
2. Sistem kendali dapat menggunakan metode lain, misalnya pengendali *Hybrid*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Anugrah, "Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Six Step Comunication Dengan Kontrol PID," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 7, no. 2, pp. 57-63, 2021.
- [2] P. N. Hardy dan dkk, "Desain dan Implementasi Kendali PID Adaptif Pada Kecepatan Motor DC," *e-proceeding of engineering*, vol. 2, no. 2, p. 2050, 2015.
- [3] F. J. Ananta dan Endryansyah, "Desain Sistem Pengendalian Kecepatan Motor DC Pada Trainer DIGIAC 1750 Menggunakan Kontroler LQR Berbasis Labview," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 3, pp. 489-497, 2019.
- [4] R. Kandiban dan R. Arulmozhiyal, "Speed Control of BLDC motor using Adaptive Fuzzy PID controller," *Procedia Engineering*, vol. 38, pp. 306-313, 2012.
- [5] D. A. Muchlis dan dkk, "Implementasi dan Analisis Kendali Kecepatan Motor BLDC 1 kW Menggunakan Algoritma PID," *Jurnal ELTEK*, vol. 17, no. 2, pp. 81-93, 2019.
- [6] D. Y. Agung dan dkk, "Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan Metode Logika Fuzzy," *Jurnal Teknologi Technoscintia*, vol. 8, no. 1, 2015.
- [7] S. Teddy dan dkk, "Desain dan Implementasi Kontrol PID Model Reference Adaptive Control untuk Automatic Safe Landing Pada Pesawat UAV Quadcopter," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 1, no. 1, pp. 78-83, 2012.
- [8] D. Rohmani dan dkk, "Sistem Karakterisasi dan Perencanaan Pengendali PID sebagai Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC untuk Kursi Roda Tricycle," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 11, no. 2, pp. 84-91, 2022.
- [9] A. Fauzi dan Harman, "Analisis Performansi Pengendali pada Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Metode Harriot Dengan Pengendali Hybrid SMC dan PID," dalam *Seminar Nasional Teknologi Informasi*, Pekanbaru, 20117.
- [10] A. Silvia dan dkk, "Perancangan dan Simulasi MRAC PID Control untuk Proses Pengendalian Temperatur Pada Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)," *Jurnal Teknik Pomits*, vol. 3, no. 1, pp. 128-133, 2014.

- [11] Nurdamayanti dan dkk, "Pengaturan Kecepatan Motor Brushless Direct Current (BLDC) Menggunakan Metode Field Oriented Control (FOC)," *Jurnal Edukasi Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 143-148, 2022.
- [12] E. Susanto, "Kendali Adaptif Model Reference Adaptive Controller (MRAC) Pada Servo DC Menggunakan Estimator Recursive Least Square (RLS) dan Optimasi Genetik," *Jurnal EECCis*, pp. 34-39, 2008.
- [13] M. Ali, "Pembelajaran Perancangan Sistem Kontrol PID dengan Software MATLAB," *Jurnal Edukasi@Elektro*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2004.
- [14] L. K. Didit dan dkk, "Analisa Gangguan Belitan Stator Pada Motor Brushless DC Menggunakan Matlab Simulink," *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 1-16, 2021.
- [15] W. Satrio dan dkk, "Simulasi Kinerja Motor BLDC untuk Merancang Sistem Kelistrikan Mobil Hemat Energi Menggunakan Simulink," *Jurnal Ilmu Komputer Agri-Informatika*, vol. 8, no. 1, pp. 31-41, 2021.
- [16] W. Tingting dan dkk, "Research on Stability Design of Differential Drive Fork-Type AGV Based on PID Control," *Jurnal MDPI*, vol. 9, pp. 1-18, 2020.
- [17] N. R. Hadi, "Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Pengendali Linear Quadratic Regulator (LQR)," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 209-217, 2019.
- [18] J. Rothe dan dkk, "A Modified Model Reference Adaptive Controller (M-MRAC) Using an Updated MIT-Rule for the Altitude of a UAV," *Jurnal MDPI*, vol. 9, pp. 1-15, 2020.
- [19] I. Hudati, "Kendali MRAC PID Pada Kecepatan Motor DC dengan Analisa Robustness," *Jurnal SIMETRIS*, vol. 13, no. 2, pp. 1-15, 2022.
- [20] R. Fatkhur dan M. A. N. Huda, "Implementasi dan Analisis Kendali Kecepatan Motor BLDC 1 kW Tanpa Beban Menggunakan Algoritma PID," *Jurnal Eltek*, vol. 17, no. 2, pp. 94-106, 2019.