

DESAIN PI *TUNING* MENGGUNAKAN LOGIKA *FUZZY* UNTUK MENGENDALIKAN KECEPATAN PADA MOTOR *BRUSHLESS* DC

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



UIN SUSKA RIAU

Oleh :

NADIA ASPA

11755202005

**PRODI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU

PEKANBARU

2021

LEMBAR PERSETUJUAN

DESAIN PI TUNING MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY UNTUK MENGENDALIKAN KECEPATAN PADA MOTOR *BRUSHLESS* DC

TUGAS AKHIR

oleh:

NADIA ASPA

11755202005

Telah diperiksa dan disetujui sebagai laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
di Pekanbaru, pada tanggal 22 Desember 2021

Ketua Program Studi
Teknik Elektro

Pembimbing


Digitally
signed by
Zulfatri Aini
Tanggal:
2022.01.11
08:00:13
WIB

Dr. Zulfatri Aini, ST, MT
NIP. 19721021 200604 2 001


Halim Mudia, ST., MT
NIK. 130517053

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang memungut dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



LEMBAR PENGESAHAN

DASAR PI *TUNING* MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY UNTUK MENGENDALIKAN KECEPATAN PADA MOTOR *BRUSHLESS* DC

TUGAS AKHIR

oleh:

NADIA ASPA

11755202005

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 22 Desember 2021

Pekanbaru, 22 Desember 2021

Mengesahkan,

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Dr. Hortono, M.Pd

NIP. 19640301 199203 1 003

Digitally
signed by
Zulfatri Aini
Tanggal:
2022.01.11
07:59:48
WIB

Dr. Zulfatri Aini, ST, MT

NIP. 19721021 200604 2 001

DEWAN PENGUJI :

Ketua : Arif Marsal, Lc., M., M.A

Sekretaris : Halim Mudia, ST.,MT

Anggota I : Ahmad Faizal, ST.,MT

Anggota II : Jufrizel, ST.,MT

Ahmad Faizal
2022.01.04
12:02:09
+07'00'

© Hak Cipta milik UIN Suska Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan di perkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim I

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa di dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh saya maupun orang lain untuk keperluan lain, dan sepanjang yang saya ketahui saya juga tidak memuat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang telah dilampirkan dalam referensi dan dalam daftar pustaka.

Saya bersedia menerima sanksi jika pernyataan ini tidak sesuai dengan yang sebenarnya.

Pekanbaru, 26 November 2021

Yang membuat pernyataan,

NADIA ASPA
NIM. 11755202005

UIN SUSKA RIAU

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PERSEMBAHAN

Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang

Barang siapa yang menghendaki kehidupan dunia, maka wajib baginya berilmu, dan barang siapa yang menghendaki kehidupan akhirat, maka wajib baginya berilmu, dan barang siapa yang menghendaki keduanya, maka wajib baginya berilmu.

(HR. Tirmidzi)

Terima Kasih Ya Allah...

Sembah sujud serta syukurku kepada-Mu ya Allah, zat yang Maha Pengasih namun tak pernah pilih kasih dan Maha Penyayang yang kasih sayang-Nya tak terbilang. Engkau zat yang Maha membolak-balikkan hati, teguhkanlah hati ini di atas agama-Mu ya Allah. Lantunan sholawat beriring salam penggugah hati dan jiwa, menjadi persembahan penuh kerinduan pada sosok panutan umat, pembangun peradaban manusia yang beradab Nabi Besar Muhammad SAW.

Niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat.

(QS: Al-Mujadilah 11)

Ku persembahkan karya ini untuk Ayahanda tercinta, sosok pejuang dalam hidupku yang tak pernah mengenal kata lelah apalagi mengeluh serta Ibunda tersayang, malaikat tanpa sayap dalam hidupku yang tak kenal waktu siang dan malam selalu menjaga dan melindungi hingga aku bisa sampai seperti sekarang ini, Adik-adik tercinta, seluruh keluarga serta sahabat dan seluruh keluarga besar teknik elektro UIN SUSKA RIAU yang doanya senantiasa mengiringi setiap derap langkahku dalam meniti kesuksesan.

Dan katakanlah: "Ya Tuhan-ku, masukkan aku ketempat masuk yang benar dan keluarkanlah (pula) aku ketempat keluar yang benar dan berilah aku disisi-Mu kekuasaan yang dapat menolongku."

(QS: Al-Isra 80)

/ **Nadia Aspa** |
| **17 Agustus 2021** |

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DESAIN *PI TUNING* MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY UNTUK MENGENDALIKAN KECEPATAN PADA MOTOR *BRUSHLESS DC*

NADIA ASPA

NIM:11755202005

Tanggal Sidang : 22 Desember 2021

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

JL. Soebrantas NO.155 Pekanbaru

ABSTRAK

Motor *brushless DC* merupakan salah satu jenis dari motor DC konvensional yang memiliki keunggulan kecepatan torsi yang baik, efisiensi yang tinggi, dan kecepatan yang tinggi karena tidak memiliki *brush*. Pada faktanya, kecepatan putaran motor *brushless DC* mengalami penurunan akibat dari pembebanan yang bervariasi sehingga menyebabkan putarannya menjadi lambat dan kecepatannya tidak konstan. Dengan menggunakan pengendali *PI tuning-logika fuzzy* pada motor *brushless DC* dapat dikendalikan sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan. Dari hasil penelitian terlihat bahwa pengendali *PI Tuning-logika fuzzy* dapat mengikuti hasil keluaran *PI tuning*, dimana didapatkan nilai-nilai parameternya adalah $E_{ss}=0.00003$ V, $t_r=0.036258$ detik, $t_s=0.049060$ detik, $t_d=0.008425$ detik.

Kata Kunci : Kecepatan, Motor brushless DC, *PI Tuning-Logika Fuzzy*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

PI TUNING DESIGN USING FUZZY LOGIC TO CONTROL SPEED ON A DC BRUSHLESS MOTOR

NADIA ASPA

STUDENT NUMBER: 11755202005

Date of Final Exam : 22 December 2021

*Department of Electrical Engineering
Faculty of Science and Technology
Syarif Kasim State Islamic University of Riau
Soebrantas Street , Number. 155 Pekanbaru*

ABSTRACT

Brushless DC motor is one type of conventional DC motor which has the advantages of good torque speed, high efficiency, and high speed because it does not have a brush. In fact, the rotational speed of the brushless DC motor has decreased due to varying loadings, causing the rotation to be slow and the speed not constant. By using a PI controller, fuzzy logic tuning on a brushless DC motor can be controlled according to the desired setpoint. From the results of the study, it can be seen that the PI Tuning-fuzzy logic controller can follow the PI tuning output, where the parameter values obtained are $E_{ss}=0.00003$ V, $t_r=0.036258$ seconds, $t_s=0.049060$ seconds, $t_d=0.008425$ seconds.

Key Word: *DC brushless motor, PI tuning-fuzzy logic, Speed*

UIN SUSKA RIAU

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, yang telah mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam juga penulis haturkan kepada baginda Rasulullah SAW, sebagai seorang sosok pemimpin dan suri tauladan bagi seluruh umat di dunia yang patut di contoh dan di teladani bagi kita semua. Atas ridho Allah SWT penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “Desain PI *Tuning* Menggunakan Logika Fuzzy Untuk Mengendalikan Kecepatan Pada Motor *Brushless DC*”.

Melalui proses bimbingan dan pengarahan yang disumbangkan oleh orang-orang yang berpengetahuan, dorongan, motivasi, dan juga do'a orang-orang yang ada disekeliling penulis sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Sudah menjadi ketentuan bagi setiap Mahasiswa yang ingin menyelesaikan studinya pada perguruan tinggi UIN SUSKA Riau harus membuat karya ilmiah berupa Tugas Akhir guna mencapai gelar sarjana.

Oleh sebab itu sudah sewajarnya penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Ayah, Ibu, dan Abang tercinta yang telah memberikan semangat, dukungan moril maupun materil dan doa kepada penulis serta keluarga besar penulis yang selalu mendoakan penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Hairunnas, M.Ag Rektor UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya.
3. Bapak Dr. Hartono, M.Pd selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh Pembantu Dekan, Staf dan jajarannya.
4. Ibu Dr. Zulfatri Aini, ST, MT selaku ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.
5. Bapak Sutoyo, S.T., M.T selaku sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

6. Bapak Halim Mudia, S.T., M.T selaku dosen pembimbing dan dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan penulis dari semester 1 hingga semester 9 ini.
7. Bapak Aulia Ullah, S.T., M.Eng selaku dosen pengampu mata kuliah Tugas Akhir 1 yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.
8. Bapak Arif Marsal, Lc., M.A selaku ketua sidang yang telah bersedia meluangkan waktu demi terselenggaranya sidang saya.
9. Bapak Ahmad Faizal, ST., MT dan Bapak Jufrizel, ST., MT selaku dosen penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.
10. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan curahan ilmu kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Juliesty Huswina Nasution, Swastika Pusparani, Ulfa Faadhilah, Rayhan Pratama Asri, Alfian Fatiwa selaku teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini dan telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
12. Sahabat (Erryni Chantika Permata, Mutiara Purnama Sari, dan Siti Ramlah) yang telah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Semoga bantuan yang telah diberikan baik moril maupun materil mendapat balasan pahala dari Allah SWT, dan sebuah harapan dari penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca semua pada umumnya.

Semua kekurangan hanya datang dari penulis dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT, hal ini yang membuat penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan kemampuan, pengalaman, dan pengetahuan penulis. Untuk itu penulis mengharap kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat positif dan membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Pekanbaru, 20 Februari 2021

Penulis,

Nadia Aspa

NIM. 11755202002

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------|
| LEMBAR PERSETUJUAN | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | ii |
| LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL | iii |
| LEMBAR PERNYATAAN..... | iv |
| LEMBAR PERSEMBAHAN | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| ABSTRACT..... | vii |
| KATA PENGANTAR | viii |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL..... | xv |
| DAFTAR RUMUS..... | xvi |
| DAFTAR LAMBANG..... | xvii |
| DAFTAR SINGKATAN | xviii |
| BAB I | |
| 1.1 Latar Belakang | I-1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | I-4 |
| 1.3 Tujuan Penelitian..... | I-5 |
| 1.4 Batasan Masalah..... | I-5 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | I-5 |
| BAB II | |
| 2.1 Penelitian Terkait | II-1 |
| 2.2 Landasan Teori..... | II-3 |
| 2.2.1 Motor <i>Brushless</i> DC..... | II-3 |

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

| | | |
|-------|--|-------|
| 2.2.2 | Kontruksi Motor <i>Brushless</i> DC | II-4 |
| 2.3 | Prinsip Kerja Motor <i>Brushless</i> DC | II-8 |
| 2.4 | Model Matematika Motor <i>Brushless</i> DC Type Maxon EC flat ϕ 45 mm | II-8 |
| 2.3 | Sistem Kendali | II-14 |
| 2.4 | Pengendali Proportional Integral (PI)..... | II-15 |
| 2.5 | Kontrol Logika <i>Fuzzy</i> | II-16 |
| 2.5.1 | Himpunan Fuzzy | II-17 |
| 2.5.2 | Fuzzifikasi | II-18 |
| 2.5.3 | Aturan Fuzzy | II-20 |
| 2.5.4 | Sistem Inferensi Fuzzy Mamdani..... | II-21 |
| 2.5.5 | Defuzzifikasi | II-22 |
| 2.6 | Pengendali PI <i>Tuning</i> -Logika <i>Fuzzy</i> | II-23 |
| 2.7 | Identifikasi Respon Transien..... | II-23 |
| 2.8 | Program Matlab..... | II-25 |

BAB III METODE PENELITIAN

| | | |
|-----|--|--------|
| 3.1 | Flow Chart Metode Penelitian..... | III-1 |
| 3.2 | Tahapan Penelitian | III-2 |
| 3.3 | Pengumpulan Data | III-4 |
| 3.4 | Pemodelan Motor <i>Brushless</i> DC Type Maxon EC flat ϕ 45 mm..... | III-4 |
| 3.5 | Simulasi dan Verifikasi Plant Motor <i>Brushless</i> DC..... | III-6 |
| 3.6 | Skenario Penelitian..... | III-6 |
| 3.7 | Perancangan Pengendali PI <i>Tuning</i> Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> | III-7 |
| 3.8 | Perancangan Pengendali PI <i>Tuning</i> Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> dengan Beban.... | III-12 |
| 3.9 | Hasil Data Penelitian yang Akan Diamati..... | III-13 |

BAB IV HASIL DAN ANALISA

| | | |
|-----|---|------|
| 4.1 | Gambaran Umum Pengujian | IV-1 |
| 4.2 | Analisa Sistem Kecepatan Motor <i>Brushless</i> DC secara Open Loop..... | IV-1 |
| 4.3 | Analisa sistem kecepatan motor brushless DC dengan PI <i>Tuning</i> | IV-4 |

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

4.3 Analisa sistem kecepatan motor *brushless* DC dengan pengendali PI *tuning*-logika fuzzy IV-6

4.4 Analisa sistem kecepatan motor brushless DC menggunakan pengendali PI tuning-logika fuzzy dengan beban IV-9

BAB V PENUTUP

5.1 KESIMPULAN V-1

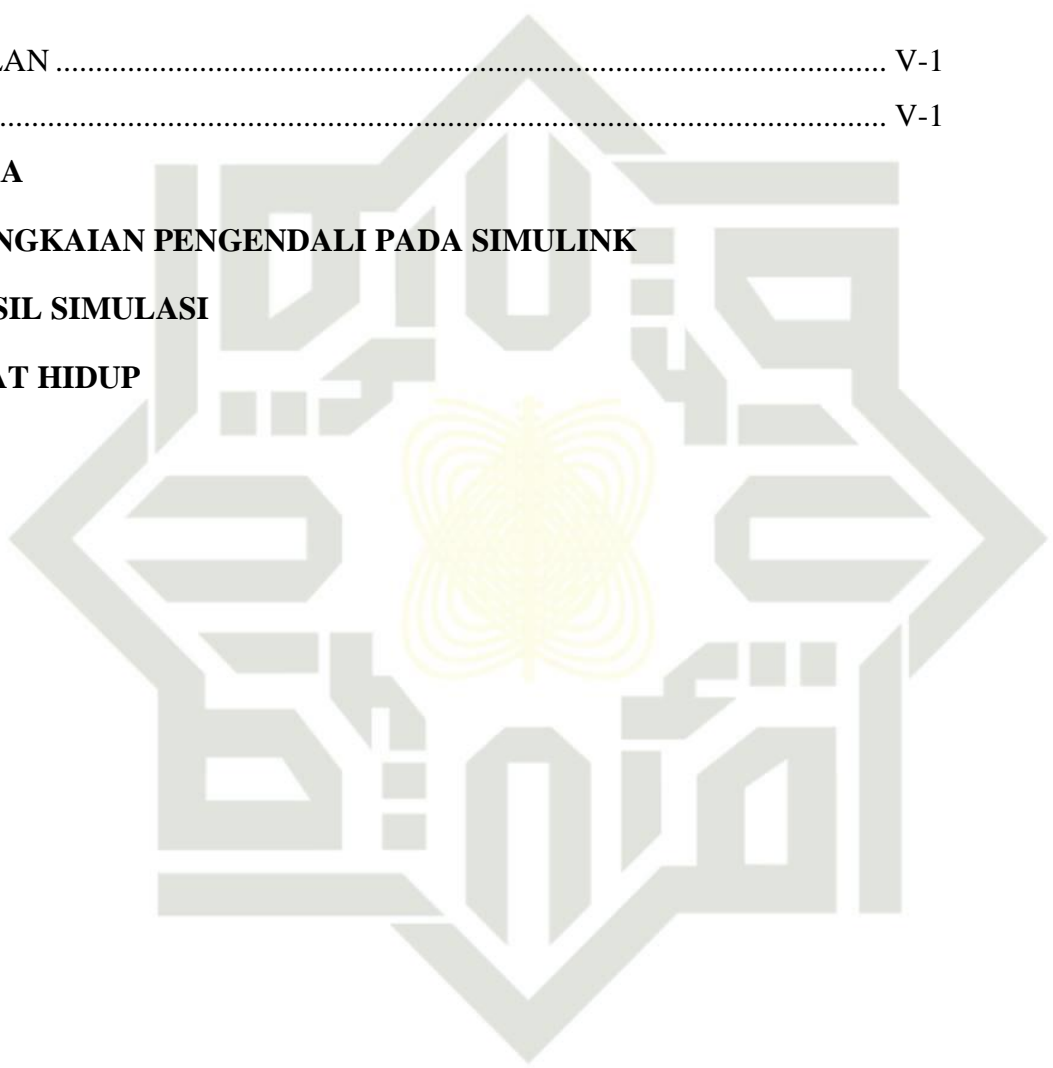
5.2 SARAN V-1

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A RANGKAIAN PENGENDALI PADA SIMULINK

LAMPIRAN B HASIL SIMULASI

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



UIN SUSKA RIAU

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|--|---------|
| Gambar 2. 1 Sensor <i>hall</i> dan <i>Enconder</i> pada motor <i>Brushless</i> DC [18]..... | II-4 |
| Gambar 2. 2 Motor <i>Brushless</i> DC Sederhana [18]..... | II-5 |
| Gambar 2. 3 Motor <i>Brushless</i> DC | II-5 |
| Gambar 2. 4 Rotor Motor <i>Brushless</i> DC | II-6 |
| Gambar 2. 5 Stator Motor <i>Brushless</i> DC..... | II-6 |
| Gambar 2. 6 <i>Sensor Hall</i> Motor <i>Brushless</i> DC | II-7 |
| Gambar 2. 7 <i>Controller</i> Motor <i>Brushless</i> DC | II-8 |
| Gambar 2. 8 Rangkaian motor listrik sederhana [11]..... | II-9 |
| Gambar 2. 9 Diagram Simetris motor DC [11]..... | II-9 |
| Gambar 2. 10 Diagram simetris motor <i>brushless</i> DC [11]..... | 12 |
| Gambar 2. 11 Blok Diagram Pengendali PI [19]..... | II-16 |
| Gambar 2. 12 Tahap perancangan sistem <i>Fuzzy</i> [24]..... | II-17 |
| Gambar 2. 13 Representasi Linear Naik [24]..... | II-19 |
| Gambar 2. 14 Representasi Linear Turun [24]..... | II-19 |
| Gambar 2. 15 Representasi Segitiga [24]..... | II-20 |
| Gambar 2. 16 Representasi Trapesium [24]..... | II-20 |
| Gambar 2. 17 Diagram Pengendali <i>Auto-Tuning Fuzzy-PI</i> [27] | II-23 |
| Gambar 2. 18 Spesifikasi Respon <i>Transien</i> [20]..... | II-24 |
| Gambar 2. 19 Matlab R2015b | II-25 |
| Gambar 2. 20 Tampilan Model <i>Simulink</i> pada Matlab..... | II-26 |
| Gambar 2. 21 Kotak Dialog <i>Simulink Libray</i> | II-26 |
| Gambar 3. 1 <i>flowchart</i> penelitian | III-2 |
| Gambar 3. 2 Blok <i>Simulink</i> Digram <i>Open Loop</i> Motor <i>Brushless</i> DC | III-6 |
| Gambar 3. 3 Respon <i>Open Loop</i> Motor <i>Brushless</i> DC <i>Open Loop</i> (Tanpa Pengendali)..... | III-6 |
| Gambar 3. 4 Rangkaian <i>Simulink</i> <i>PI Tuning</i> | III-7 |
| Gambar 3. 5 Tampilan blok <i>PI Tuning Controller</i> | III-8 |
| Gambar 3. 6 Tampilan Grafik <i>Tuning PI</i> | III-8 |

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

© Hak ciptam Hikmah UIN Suska Riau State Islamic University of Sultan Syarif Kasim I

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

| | |
|--|--------|
| Gambar 3. 7 Fungsi Keanggotaan <i>Error</i> | III-9 |
| Gambar 3. 8 Fungsi keanggotaan <i>Derror</i> | III-9 |
| Gambar 3. 9 Fungsi Keanggotaan <i>Output 1</i> | III-10 |
| Gambar 3. 10 Fungsi Keanggotaan <i>Output 2</i> | III-10 |
| Gambar 3. 11 Rangkaian <i>Simulink</i> Sistem Pengendali <i>PI Tuning</i> Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> | III-12 |
| Gambar 3. 12 Rangkaian <i>Simulink</i> <i>PI Tuning</i> Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> dengan Beban | III-12 |
| Gambar 4. 1 Rangkaian Motor <i>Brushless</i> DC dengan <i>Open Loop</i> | IV-1 |
| Gambar 4. 2 Grafik Keluaran Motor <i>Brushless</i> DC dengan <i>Open Loop</i> | IV-2 |
| Gambar 4. 3 Hasil Keluaran Sistem Motor <i>Brushless</i> DC dengan <i>PI Tuning</i> | IV-4 |
| Gambar 4. 4 Rangkaian motor <i>brushless</i> DC menggunakan pengendali <i>PI tuning-logika</i> ... | IV-6 |
| Gambar 4. 5 Respon keluaran motor <i>brushless</i> DC menggunakan pengendali <i>PI tuning-logika fuzzy</i> | IV-7 |
| Gambar 4. 6 Hasil Keluaran Sistem Motor <i>Brushless</i> DC Menggunakan <i>PI Tuning-Logika Fuzzy</i> dengan Beban 10% | IV-9 |
| Gambar 4. 7 Hasil Keluaran Sistem Motor <i>Brushless</i> DC Menggunakan <i>PI Tuning-Logika Fuzzy</i> dengan Beban 5% | IV-10 |

DAFTAR TABEL

| | | Halaman |
|-----------|---|----------------|
| Tabel 2.1 | Tanggapan Pengendali PI Terhadap Perubahan Parameter [22] | II-16 |
| Tabel 3.1 | Parameter Motor <i>Brushless</i> DC [11]..... | III-4 |
| Tabel 3.2 | <i>Rule Base Fuzzy</i> | III-11 |
| Tabel 4.1 | Respon waktu sistem secara <i>Open Loop</i> | IV-3 |
| Tabel 4.2 | Respon waktu sistem dengan menggunakan pengendali PI <i>tuning-logika fuzzy</i> . | IV-6 |
| Tabel 4.3 | Respon waktu sistem dengan menggunakan pengendali PI <i>tuning-logika fuzzy</i> . | IV-9 |

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim I

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR RUMUS

| | Halaman |
|---|----------------|
| Rumus 2.1 Medan Magnet..... | II-8 |
| Rumus 2.2 Kecepatan Sinkron Motor | II-8 |
| Rumus 2.3 Model Matematika Motor Brushless DC | II-13 |
| Rumus 2.5 Representasi Linear naik | II-16 |
| Rumus 2.6 Representasi Linear Turun | II-110 |
| Rumus 2.7 Representasi Segitiga | II-18 |
| Rumus 2.8 Representasi Trapesium | II-18 |
| Rumus 2.9 Metode <i>Max (Maximum)</i> | II-19 |
| Rumus 2.10 Metode <i>Additive (Sum)</i> | II-19 |
| Rumus 2.11 Metode <i>Probalistik (Probor)</i> | II-20 |
| Rumus 3.1 Model Matematis Motor BLDC | III-6 |

DAFTAR LAMBANG

| | |
|----------------------------------|---------------------------|
| © Hak cipta milik UIN Suska Riau | |
| | Jumlah lilitan |
| | Arus |
| | Panjang lilitan dan |
| | Permeabilitas |
| | Frekuensi arus input |
| | Jumlah pole rotor |
| | Sumber tegangan DC |
| | Putaran elektrik |
| | Gesekan konstan |
| | = Rotor inersia |
| | = Kecepatan sudut |
| | = Beban mekanik |
| | = <i>Back</i> EMF konstan |
| | = Putaran konstan |

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR SINGKATAN

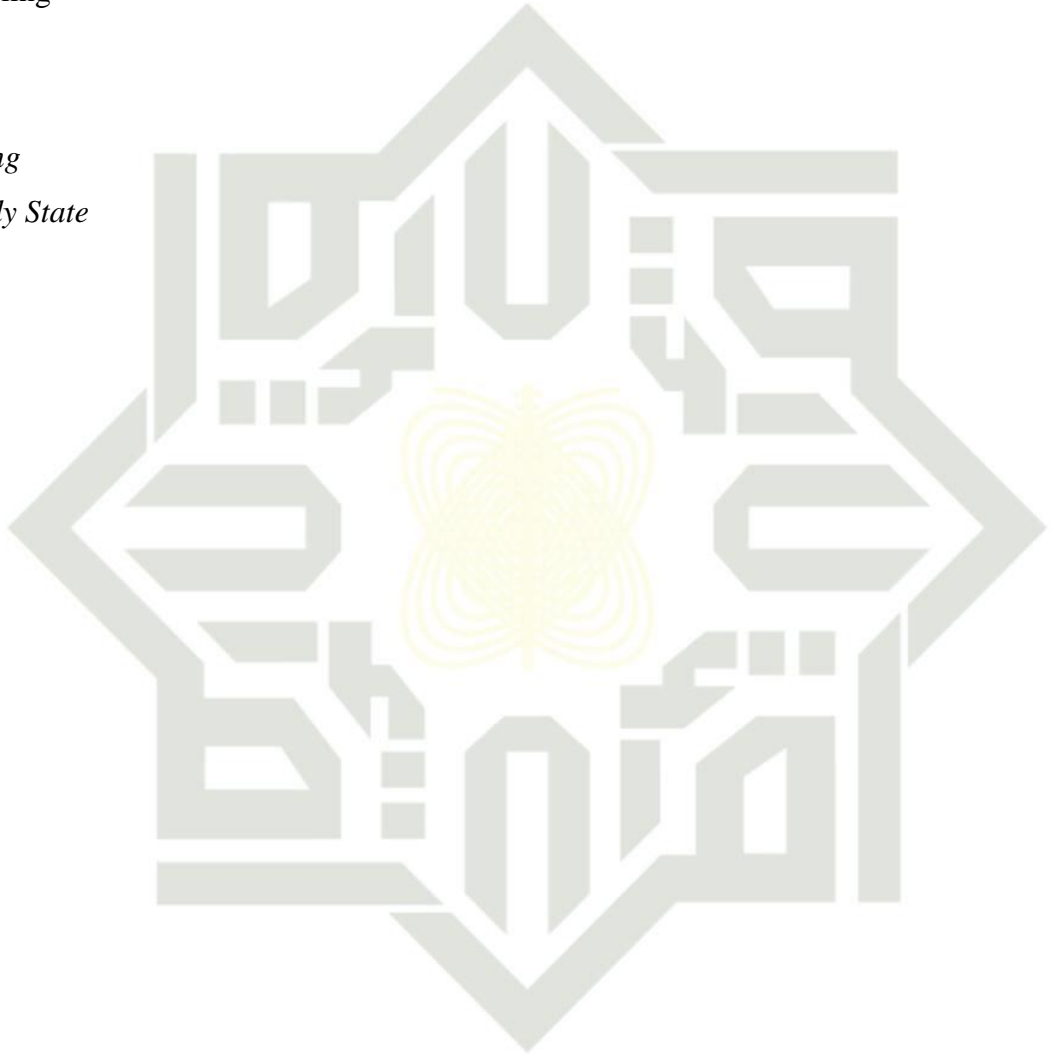
| | |
|----------|---------------------------------|
| LDC | <i>Brushless Direct Current</i> |
| PI | <i>Propotional Integral</i> |
| T_s | <i>Time Sampling</i> |
| T_d | <i>Time Delay</i> |
| t_r | <i>Rise Time</i> |
| t_s | <i>Time Settling</i> |
| E_{ss} | <i>Error Steady State</i> |

© Hak cipta dimiliki UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim I

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



UIN SUSKA RIAU

BAB I

PENDAHULUAN

1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di era modern ini sangat berperan penting bagi kehidupan manusia dalam melakukan berbagai aktifitas agar lebih efektif dan efisien. Salah satu contoh bidang yang sangat diperhatikan perkembangannya yaitu bidang industri. Dimana perkembangan teknologi di dalam dunia industri akan memberikan dampak kemajuan dalam pertumbuhan ekonomi hal ini dikarenakan industri memegang peranan penting dalam pengolahan sumber daya sehingga dapat digunakan untuk kebutuhan masyarakat. Hal ini terbukti dalam analisa perkembangan industri pada kuartal pertama tahun 2020 yang dikeluarkan oleh Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, dimana tercatat bahwa sektor industri masih memberikan kontribusi terbesar pada struktur Produk Domestik Bruto (PDB) nasional hingga mencapai 19.98% [1].

Pada proses pengolahan sumber daya di dalam dunia industri, terutama industri manufaktur dibutuhkan beberapa peralatan pokok yang mendukung terjadinya proses produksi seperti motor, generator, boiler, *heat exchanger* dan peralatan elektronik lainnya, salah satu peralatan yang paling banyak digunakan adalah motor. Dalam dunia industri, motor disebut sebagai “kuda kerja” nya industri karena sekitar 70% beban listrik dihasilkan oleh motor-motor yang berada pada suatu industri [2], salah satunya yaitu motor arus searah (motor DC) yang merupakan salah satu jenis motor listrik yang pertama digunakan dalam perindustrian. Namun motor DC masih terdapat kekurangan seperti sikatnya yang mudah aus dan menyebabkan percikan api pada saat motor beroperasi sehingga meningkatkan biaya perawatan pada motor. Oleh karena itu peranan penggunaan motor DC dibidang industri perlahan digantikan oleh motor *brushless* DC.

Motor *Brushless* DC (BLDC) merupakan motor arus searah tanpa sikat dimana medan magnetnya dihasilkan oleh stator dan rotor yang mempunyai frekuensi sama, dan merupakan pengembangan dari motor DC. Dibandingkan dengan motor DC, motor *brushless* DC memiliki beberapa keunggulan seperti karakteristik kecepatan terhadap torsi yang lebih baik, lebih efisien dan lebih handal, umur operasi yang panjang karena tidak menggunakan sikat,

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Operasi senyap, rentang kecepatan yang luas serta biaya operasi yang rendah[3][4]. Karena keunggulan tersebut, banyak digunakan dibidang industri seperti pada industri perkapalan, industri otomotif, industri kesehatan, dan instrumentasi[5].

Pada motor *brushless* DC terdapat parameter yang harus dikendalikan yaitu posisi dan kecepatan. Dimana pengaturan kecepatan menjadi langkah penting dalam penggunaannya karena motor *brushless* DC mempunyai rentang kecepatan yang lebar[6]. Performa yang diharapkan pada motor *brushless* DC yaitu dapat bekerja dengan kecepatan konstan meskipun terdapat penambahan beban yang bervariasi. Tetapi dari hasil studi literatur, kecepatan putaran motor *brushless* DC mengalami penurunan akibat dari pembebanan yang bervariasi sehingga menyebabkan putarannya menjadi lambat dan kecepatannya tidak konstan[7][8]. Pada pengujian sistem kecepatan motor *brushless* DC secara *open loop* atau tanpa pengendali didapatkan hasil respon sistem yang stabil tetapi sistem melewati nilai *set point* yang diberikan. Maka dari itu diperlukan pengendalian pada kecepatan putaran dari motor *brushless* DC agar respon sistem mencapai *set point* dan meskipun sedang beroperasi dalam berbagai beban.

Beberapa penelitian yang membahas kecepatan tentang motor brushless DC telah dilakukan diantaranya penelitian mengenai sistem pengaturan kecepatan motor brushless DC menggunakan pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR)[9]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *time delay* 0.481 detik, *rise time* 2.043 detik, *settling time* 2.776 detik, *error steady state* tanpa beban sebesar 5.14%, dan saat diberikan beban nilai *error steady state* yang didapatkan sebesar 8.45%[9]. Dari hasil simulasi yang didapat, kerja dari kecepatan motor *brushless* DC tidak maksimal dikarenakan ketika diberikan beban *error steady state* nya semakin tinggi yang dapat mempengaruhi kecepatan putaran dari motor *brushless* DC.

Penelitian lainnya yaitu rancang bangun pengendalian kecepatan motor *brushless* DC tipe AN12/10T 1400 KV menggunakan kontroler PID berbasis labview[9]. Hasil penelitian setelah ditambahkan pengendali PID mampu mencapai nilai *set point* dan mengurangi *error steady state* pada respon sistem riil menjadi 4.3% tanpa beban dan 3.7% dengan menggunakan beban piringan besi[9]. Dari hasil simulasi yang didapat, pengendali yang dirancang untuk mengendalikan kecepatan motor *brushless* DC mampu memperbaiki respon sistem setelah di beri pengendali, namun *error steady state* yang dihasilkan masih tinggi, sehingga performa dari kecepatan motor *brushless* DC belum maksimal.

Penelitian lainnya yaitu sistem kendali kecepatan motor *brushless* DC menggunakan metode algoritma *hybrid* PID-*fuzzy*[10]. Pengujian perubahan set point dan perubahan beban, dihasilkan tanggapan sistem kendali PID konvensional dengan nilai rata-rata yaitu waktu kenaikan (t_r) 0.025 detik, waktu penetapan (t_s) 0.1625 detik, *overshoot* sebesar 15.98%. Sedangkan kendali *hybrid* PID-*fuzzy* dihasilkan nilai rata-rata waktu kenaikan (t_r) 0.0025 detik, waktu penetapan (t_s) 0.057 detik, *overshoot* sebesar 5.42%[10]. Pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sistem kendali dengan menggunakan PID-logika *fuzzy* dapat memperbaiki kinerja dari PID konvensional, namun *overshoot* yang dihasilkan masih besar.

Dari beberapa penelitian diatas dan hasil pengujian secara *open loop* motor *brushless* DC melebihi *set point* yang diinginkan[11]. Studi pustaka mengenai beberapa pengendali belum menunjukkan hasil yang bagus, karena masih terdapat *error steady state* dan *overshoot*. Maka dari itu, dibutuhkan pengendali yang mampu mengatasi masalah tersebut. Pengendali PI tuning-logika *fuzzy* dipilih untuk mengatasi masalah pada pengendalian kecepatan pada motor *brushless* DC. PI tuning-logika *fuzzy* merupakan pengontrol yang mengambil struktur pengontrol PI konvensional sebagai basisnya, dimana parameter pengontrol PI pertama kali disetel dengan metode penyetelan konvensional, misalnya metode loop tertutup *Ziegler-Nichols*[12], dan kemudian diatur secara otomatis oleh pengontrol *fuzzy*. Pemilihan pengontrolan PI didasarkan dalam penerapannya yang memiliki efek tersendiri pada sistem motor *brushless* DC, yaitu *propotional* (P) yang memiliki fungsi untuk mempercepat respon *output*. *Integral* (I) digunakan untuk mengatasi *error steady state*. Selain itu di industri hampir 80% kontroler PID yang terpasang menggunakan kontrol PI dalam operasinya, hal ini disebabkan karena permasalahan yang terjadi dapat diatasi secara maksimal[12].

Pada pengontrolan *Propotional-Integral* (PI) konvensional, penalaan pada kondisi tertentu tanpa memperhitungkan perubahan pembebanan yang terjadi pada motor *brushless* DC dan gangguan atau beban yang muncul mendapatkan hasil kontrol yang sudah bagus dan teruji. Tetapi jika terjadi perubahan pembebanan, maka perlu diadakan *setting* ulang untuk membuat kontrol PI menghasilkan unjuk kerja yang baik[10]. Seiring dengan perkembangan sistem berbasis pengetahuan, penalaan parameter PI dapat ditentukan dengan menganalisis *output* suatu sistem, dan hasil analisis tersebut dibentuk dalam sejumlah aturan. Dengan mengkombinasikan sejumlah aturan, pengaturan ini menjadi sebuah kontrol logika *fuzzy* sebagai salah satu sistem berbasis pengetahuan, sehingga parameter PI dapat ditala secara

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

otomatis. Dengan penggabungan aksi kontroler PI dan kontrol logika *fuzzy* untuk menala parameter PI diharapkan dapat menghasilkan respon *transient* yang bagus.

Beberapa penelitian yang sudah dilakukan menggunakan pengendali PI *tuning*-logika *fuzzy* dengan plant yang berbeda. Penelitian untuk mengendalikan ketinggian air dan temperatur uap pada steam drum boiler. Hasil penelitian pada pengendalian ketinggian air dapat mengurangi *overshoot* sebesar 3.4% dan mengurangi error sebesar 55.8%, sedangkan pada sistem temperatur uap mempercepat *rise time* 0.6 menit, *settling time* 7.6 menit, dan menghilangkan *overshoot*[12]. Pada penelitian tersebut pengendali *self tuning fuzzy* PI mampu mengadaptasi gangguan yang terjadi secara tiba-tiba pada sistem dan dapat bekerja dengan variasi penurunan *set point* pada sistem.

Penelitian lainnya menggunakan *self tuning* PI dengan logika fuzzy untuk kendali motor servo pada sistem *tracking* bola. Dari data parameter respon sistem didapat hasil bahwa pengendali *self tuning* PI dengan metode *fuzzy* lebih baik dibandingkan dengan kontroler PI, dibuktikan dengan hasil pengujian pada servo tilt didapatkan *rise time* 70 ms, *settling time* 155 ms, *overshoot* 22%, dan *error steady state* 1.4%, dibandingkan dengan kendali PI yang memiliki *overshoot* 22.7%[13]. Sedangkan pada servo pan diperoleh hasil *rise time* 125 ms, *settling time* 140 ms, *overshoot* 10.8%, dan *error steady state* 1.3%, dibandingkan dengan kendali PI yang memiliki *overshoot* 19.8%[13].

Pada penelitian ini peneliti melakukan perancangan menggunakan pengendali PI *tuning* logika *fuzzy*, metode *fuzzy* yang digunakan adalah mamdani, untuk penalaan nilai *input* yaitu *error* dan *delta error* dan *output* yaitu Kp dan Ki dengan menggunakan metode *heuristic*, dengan penggabungan aksi kontroler PI dan kontrol logika *fuzzy* untuk menala parameter PI diharapkan dapat menghasilkan respon *transient* yang bagus. Berdasarkan hal tersebut penulis tertarik untuk mengaplikasikan “Desain PI *Tuning* Menggunakan Logika *Fuzzy* untuk Mengendalikan Kecepatan Pada Motor *Brushless* DC” .

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy* pada pengendalian kecepatan motor *brushless* DC untuk mengurangi *error steady state*?

1. Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
2. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2. Bagaimana merancang PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy* pada pengendalian kecepatan motor *brushless* DC yang kokoh terhadap perubahan beban sinyal kendali?

Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy* pada pengendalian kecepatan motor *brushless* DC agar mampu mengikuti nilai *set point* yang diberikan.
2. Merancang PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy* pada pengendalian kecepatan motor *brushless* DC agar mampu kembali ke *set point* ketika diberikan beban sinyal kendali.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Pemodelan sistem motor *brushless* DC yang digunakan adalah tipe MAXON EC 4 FLAT 45 MM merujuk jurnal internasional yang berjudul *PID Control Of Brushless DC Motor And Robot Trajectory Planning And Simulation With I-4 Matlab/Simulink* [11] karena dalam jurnal ini telah memberikan persamaan motor BLDC secara keseluruhan dan asal persamaannya.
2. Menggunakan *software* MATLAB untuk melakukan simulasi
3. Desain hanya berupa simulasi tidak membahas tentang *hardware* dari *plant*.
4. Metode *fuzzy* yang digunakan yaitu metode *fuzzy* Mamdani.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Menghasilkan sebuah rancangan sistem kendali yang baik untuk mengendalikan kecepatan pada motor *brushless* DC.
2. Dapat dijadikan referensi untuk pengaplikasiannya pada proses industri dan memberikan kemudahan dalam penyelesaian permasalahan umum yang terjadi pada proses pengendalian kecepatan pada motor *brushless* DC.
3. Sebagai referensi tambahan untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

1. Penelitian Terkait

Pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan studi literatur untuk mendapatkan teori atau referensi yang relevan dengan kasus dan permasalahan yang akan diselesaikan, teori dan referensi tersebut bisa didapatkan dari berbagai sumber seperti jurnal, paper, buku dan sumber lainnya.

Ada beberapa penelitian terkait yang telah dilakukan untuk mengatasi masalah yang ada pada motor *brushless* DC, salah satunya penelitian mengenai pengendalian kecepatan motor *brushless* DC menggunakan kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Penggunaan kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) memiliki kesederhanaan dan kemudahan untuk mendapatkan suatu pengendalian karena hanya memerlukan nilai Q dan R yang akan menghasilkan parameter K (*gain feedback*) dan L (*setpoint tracking*). Pengujian pengendali LQR dilakukan sebanyak dua kali percobaan yaitu pengujian dengan *set point* tetap dan pengujian dengan beban. Berdasarkan pengujian terlihat bahwa pengendalian LQR dengan nilai Q=10 memiliki hasil yang lebih baik dengan *time delay* 0.481 detik, *rise time* 2.043 detik, *settling time* 2.776 detik, *error steady state* tanpa beban sebesar 5.14%, dan saat diberikan beban berupa gaya *magnetomotive* sebesar 500AT nilai *error steady state* yang didapatkan sebesar 8.45%[14]. Dari penelitian ini dapat disimpulkan nilai *error steady state* ketika diberikan beban semakin besar, oleh karena itu dibutuhkan sebuah pengendali yang dapat beradaptasi ketika diberikan beban.

Selain menggunakan pengendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR), penelitian pengendalian kecepatan motor *brushless* DC juga dilakukan menggunakan kendali PID. Penelitian ini membahas pengaturan kecepatan motor *brushless* DC agar tetap konstan saat terjadi pemotongan dengan menggunakan kendali PID. Kontroler PID yang dirancang untuk mengendalikan respon kecepatan putar motor *brushless* DC, berhasil memperbaiki respon sistem mencapai nilai *setpoint* dan mengurangi *error steady state* pada respon sistem riil menjadi 4.3% (tanpa beban) dan 3.7% (Piringan Besi)[9]. Dari penelitian ini peneliti melakukan

set plant yang sama namun dengan metode pengendali berbeda untuk mendapatkan hasil perbandingan yang lebih baik dari penelitian ini.

Penelitian lainnya juga dilakukan menggunakan algoritma *hybrid PID-fuzzy* untuk mengendalikan kecepatan motor BLDC. Pengujian perubahan *set point* dan perubahan beban, dihasilkan tanggapan sistem kendali PID konvensional dengan nilai rata-rata yaitu waktu kenaikan (tr) 0.025 detik, waktu penetapan (ts) 0.1625 detik, *overshoot* sebesar 15.98%. Sedangkan kendali *hybrid PID-fuzzy* dihasilkan nilai rata-rata waktu kenaikan (tr) 0.0025 detik, waktu penetapan (ts) 0.057 detik, *overshoot* sebesar 5.42%[10]. Pada penelitian ini dapat ditarik kesimpulan sistem kendali dengan menggunakan PID-logika *fuzzy* dapat memperbaiki kinerja dari PID konvensional, namun *overshoot* yang dihasilkan masih besar.

Penelitian lainnya mengenai *self tuning fuzzy* PI untuk pengendalian ketinggian air dan temperatur uap pada steam *drum boiler*. Hasil penelitian pada pengendalian ketinggian air dapat mengurangi *overshoot* sebesar 3.4% dan mengurangi *error* sebesar 55.8%, sedangkan pada sistem temperatur uap mempercepat *rise time* 0.6 menit, *settling time* 7.6 menit, dan menghilangkan *overshoot*[12]. Dari hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sifat dari kontroler *self tuning fuzzy* PI mampu mengadaptasi parameter P dan I pada kontroler konvensional PI sehingga mampu bekerja secara optimal walaupun gangguan pada sistem ketinggian air dan temperatur uap. Kontroler *Self Tuning Fuzzy* PI juga mampu mengadaptasi gangguan yang terjadi secara tiba-tiba pada sistem dan dapat bekerja dengan variasi penurunan *set point* pada sistem.

Penelitian lainnya mengenai *self tuning fuzzy* PI dengan logika *fuzzy* untuk kendali motor servo pada sistem *tracking* bola. Pada penelitian ini dilakukan dua percobaan yaitu pada *servo tilt* dan *servo pan*. Dari data parameter respon sistem didapat hasil bahwa pengendali *self tuning* PI dengan metode *fuzzy* lebih baik dibandingkan dengan kontroler PI, dibuktikan dengan hasil pengujian pada servo tilt didapatkan *rise time* 70 ms, *settling time* 155 ms, *overshoot* 22%, dan *ess* 1.4%, dibandingkan dengan kendali PI yang memiliki *overshoot* 22.7%. Sedangkan pada servo pan diperoleh hasil *rise time* 125 ms, *settling time* 140 ms, *overshoot* 10.8%, dan *error steady state* 1.3%, dibandingkan dengan kendali PI yang memiliki *overshoot* 19.8%[15].

Dari beberapa penelitian tentang motor *brushless* DC yang telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya, terdapat beberapa sistem yang sudah dianalisa menggunakan beberapa

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

pengendali, tetapi masih terdapat *error steady state* dan respon sistem yang kurang baik. Dan dari studi literatur di atas, pengendali PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy* cukup baik dalam memperbaiki respon *transient* pada sistem. Dengan demikian, penulis ingin melakukan penelitian dengan menggabungkan kontroler PI dan kontrol logika *fuzzy* untuk menala parameter PI pada sistem motor *brushless* DC.

2 Landasan Teori

2.2.1 Motor *Brushless* DC

Motor *brushless* DC atau dapat disebut juga dengan motor *brushless* AC merupakan motor listrik synchronous AC 3 fasa. Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena motor *brushless* DC memiliki BEMF berbentuk *trapezoid*, sedangkan motor *brushless* AC memiliki BEMF berbentuk sinusoidal, walaupun demikian keduanya memiliki struktur yang sama [16]. Dibandingkan dengan motor DC, motor *brushless* DC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi karena tidak menggunakan brush. Perbandingan efisiensi antara motor *brushless* DC dengan motor induksi, motor *brushless* DC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi karena rotor terbuat dari magnet permanen. Meskipun memiliki kelebihan namun, pengendalian motor *brushless* untuk mengendalikan kecepatan dan torsi yang konstan memiliki kelemahan dikarenakan tidak adanya brush yang menunjang proses komutasi [17].

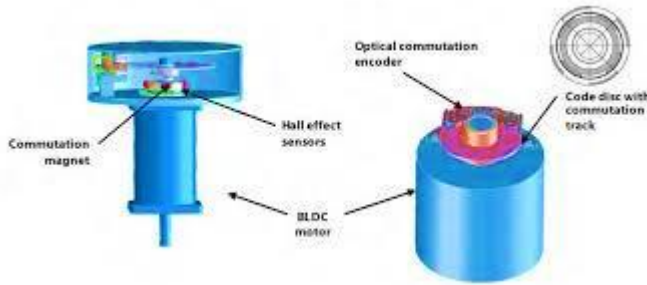
Oleh karena tidak adanya brush pada motor *brushless* DC, sehingga untuk menentukan timing komutasi yang tepat pada motor ini agar didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, maka diperlukan 3 buah sensor *Hall* atau *encoder*. Pada sensor *hall*, untuk menetapkan timing komutasi dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan 3 buah sensor *hall* untuk mendapatkan 6 kombinasi timing yang berbeda. Sedangkan pada *encoder*, timing komutasi ditentukan dengan cara menghitung jumlah pola yang ada pada *encoder*[18].

Penggunaan *encoder* pada motor *brushless* DC komersial lebih banyak digunakan karena *encoder* mampu menentukan *timing* komutasi lebih akurat dibandingkan dengan menggunakan sensor *hall*. Hal ini karena pada *encoder*, kode komutasi telah ditetapkan secara *fixed* berdasarkan banyak *pole* (kutub) dari motor dan kode inilah yang digunakan untuk menentukan *timing* komutasi. Namun penggunaan kode komutasi *encoder* untuk suatu motor tidak dapat digunakan untuk motor dengan jumlah *pole* yang berbeda. Hal ini berbeda dengan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Sensor *hall*, karena ketika terjadi perubahan *pole* rotor pada motor, posisi sensor *hall* dapat berubah dengan mudah. Hanya saja kelemahan dari sensor *hall* adalah apabila posisi sensor *hall* tidak tepat akan terjadi kesalahan dalam penentuan timing komutasi atau bahkan tidak didapatkan 6 kombinasi *timing* komutasi yang berbeda [18].



Gambar 2. 1 Sensor *hall* dan *Encoder* pada motor *Brushless* DC [18].

Berikut merupakan sumber arus listrik pada motor:

1. Listrik 1 Fasa

Listrik 1 fasa adalah instalasi listrik yang menggunakan dua kawat penghantar yaitu 1 kawat fasa dan 1 kawat 0 (netral). Pengertian sederhananya adalah listrik 1 fasa terdiri dari dua kabel yaitu 1 bertegangan dan 1 netral. Umumnya listrik 1 fasa bertegangan 220 volt.

2. Pengertian Listrik 3 Fasa

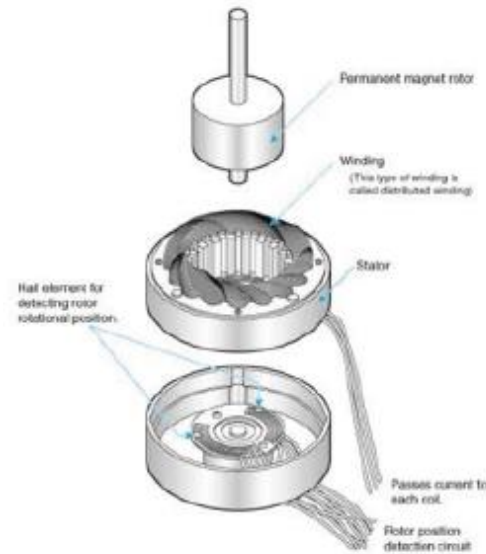
Listrik 3 fasa adalah instalasi listrik yang menggunakan tiga kawat fasa dan satu kawat 0 (netral) atau kawat ground. Menurut istilah listrik 3 fasa terdiri dari 3 kabel bertegangan listrik dan 1 kabel netral. Umumnya listrik 3 fasa bertegangan 380 volt yang banyak digunakan industri atau pabrik.

2.2.2 Kontruksi Motor *Brushless* DC

Pada motor BLDC terdapat 2 bagian yaitu rotor dan stator. Rotor merupakan komponen yang bergerak terbuat dari magnet permanen. Stator merupakan komponen yang tidak bergerak terbuat dari kumparan 3 *phasa*. Pada gambar dibawah ini menunjukkan struktur motor *brushless* DC yang terdiri dari magnet permanen, gulungan stator yang sama dengan yang terdapat pada motor *polyphase* AC, dan sensor *hall* [18].

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 2 Motor *Brushless* DC Sederhana [18].

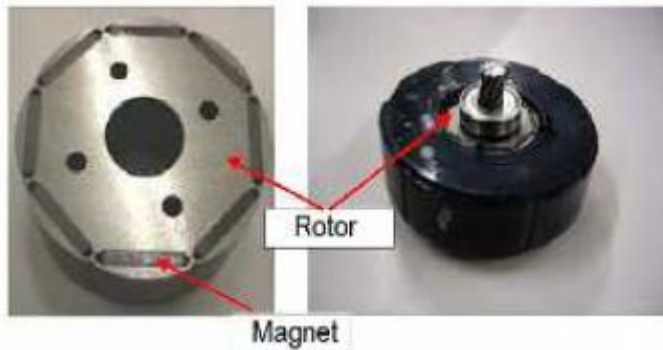


Gambar 2. 3 Motor *Brushless* DC

Berikut bagian dari motor konstruksi motor *Brushless* DC:

1. Rotor

Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor *brushless* DC bagian rotornya berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional yang hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara *brushless* yang terhubung pada dua buah motor hingga delapan pasang kutub magnet permanen berbentuk persegi panjang yang saling direkatkan menggunakan semacam *epoxy* dan tidak ada *brushless*-nya.



Gambar 2. 4 Rotor Motor *Brushless* DC

2. Stator

Stator adalah bagian pada motor yang diam atau statis dimana fungsinya adalah sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Pada motor *brushless* DC statornya terdiri dari 12 lilitan elektromagnet yang bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor *brushless* DC terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol sedangkan pada motor DC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen.



Gambar 2. 5 Stator Motor *Brushless* DC

Lilitan stator pada motor DC brushless terdiri dari dua jenis, yaitu lilitan stator jenis trapezoidal dan jenis sinusoidal. Yang menjadi dasar perbedaan kedua jenis lilitan stator tersebut terletak pada hubungan antara koil dan lilitan stator yang bertujuan untuk memberikan EMF (*Electro Motive Force*) balik yang berbeda. EMF balik sendiri adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh lilitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Ketika motor BLDC sudah dibuat, jumlah lilitan pada stator dan besarnya medan magnet yang dihasilkan nilainya sudah dibuat konstan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

sehingga yang mempengaruhi besarnya EMF balik adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor, semakin besar kecepatan sudut yang dihasilkan. Perubahan besarnya EMF balik ini mempengaruhi torsi motor BLDC, apabila kecepatan motor yang dihasilkan lebih besar dari tegangan potensial pada lilitan stator sehingga arus yang mengalir pada stator akan turun dan torsi pun akan ikut turun. Karena berbanding lurus dengan faktor-faktor lain yang mempengaruhi torsi maka kenaikan dan penurunan arus sangat berpengaruh pada besarnya torsi yang dihasilkan motor BLDC.

3. Sensor Hall

Tidak seperti motor DC *brushed* komutasi dari motor *brushless* DC diatur secara elektronik agar motor dapat berputar, stator harus di-energize secara berurutan dan teratur. Sensor hall inilah yang berperan dalam mendeteksi pada bagian rotor mana yang ter-energize oleh fluks magnet sehingga proses komutasi yang berbeda (enam step komutasi) dapat dilakukan oleh stator dengan tepat karena sensor hall ini dipasang menempel pada stator



Gambar 2. 6 Sensor Hall Motor Brushless DC

4. Controller

Controller dan *inverter* (perubah tegangan DC menjadi AC) *Controller* pada motor *brushless* DC berperan sangat penting dan dapat dikatakan sebagai penunjang utama operasi motor *brushless* DC karena motor *brushless* DC membutuhkan suatu *trigger* pulsa yang masuk ke bagian elektromagnetik (stator) motor *brushless* DC untuk memberikan pengaturan besarnya arus yang mengalir sehingga putaran motor dapat diatur secara akurat. *Inverter* pada motor *brushless* DC berperan untuk mengubah tegangan DC yang masuk *controller* menjadi tegangan AC karena jenis motor *brushless* DC biasanya memiliki multipole tiga *phase* maka dibutuhkan *inverter* tiga fasa tegangan DC menjadi AC agar dapat berputar.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 7 Controller Motor Brushless DC

2.2.3 Prinsip Kerja Motor Brushless DC

Motor brushless DC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat dari arus yang melewati kumparan pada stator maka timbul medan magnet (B) [11]:

$$B = \frac{\mu Ni}{2l} \quad (2.1)$$

Dimana:

- N = Jumlah lilitan
- i = Arus
- l = Panjang lilitan dan
- μ = Permeabilitas

Sarena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa *sinusoidal*, nilai medan magnet dan polaritas setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polaritas dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan [11]:

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (2.2)$$

Dimana:

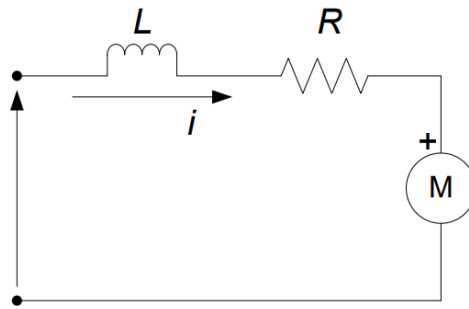
- f = Frekuensi arus input
- p = Jumlah pole rotor

2.2.4 Model Matematika Motor Brushless DC Type Maxon EC flat Ø 45 mm

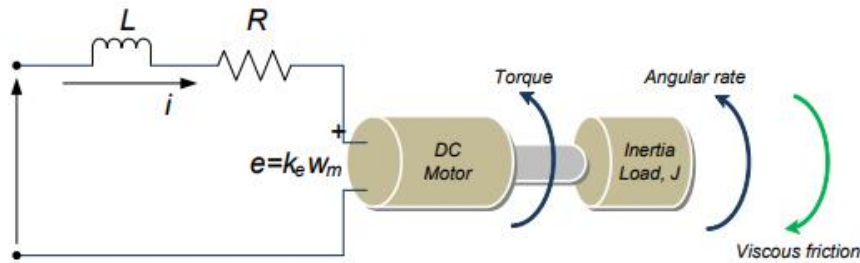
Modelan matematis motor Brushless DC tidak benar-benar berbeda dengan motor brushless DC konvensional. Untuk pemodelan motor brushless DC dapat dilihat pada gambar.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 8 Rangkaian motor listrik sederhana [11].



Gambar 2. 9 Diagram Simetris motor DC [11].

Dari gambar diatas dapat dibuat persamaan menggunakan hukum kirchoff, persamaan sebagai berikut:

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \tag{2.3}$$

Pada kedudukan tetap (kedudukan DC pada frekuensi 0) $V_s = Ri + e$

Selain itu untuk kedudukan tidak stabil, persamaan 2.3 diatur ulang untuk menyajikan back EMF, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 2.4 di bawah ini:

$$e = -Ri - L \frac{di}{dt} + V_s \tag{2.4}$$

Dimana:

V_s = Sumber tegangan DC

i = Arus dinamo

Mengingat sifat mekanik dari motor DC, berdasarkan hukum kedua newton tentang gerak, sifat mekanik relatif terhadap torsi pengaturan sistem pada gambar gambar 2.4 dan 2.5 akan menjadi hasil beban inersia, J adalah rotor inersia dan ω_m adalah kecepatan sudut, berikut ini adalah persamaan 2.5 dan 2.6 [11]:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = \sum T_i \tag{2.5}$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$= k_e \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} T_L \quad (2.6)$$

Dimana:

- k_e = Putaran elektrik
- k_f = Gesekan konstan
- J = Rotor inersia
- ω_m = Kecepatan sudut
- T_L = Beban mekanik

Putaran elektrik dan *back* EMF dirumuskan menjadi:

$$e = k_e \omega_m \quad (2.7)$$

$$T_e = k_t \omega_m \quad (2.8)$$

Dimana :

- k_e = *Back* EMF konstan
- k_t = Putaran konstan

Kemudian tulis kembali 2.4 dan 2.5, persamaan 2.9 dan 2.10 maka diperoleh:

$$\frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.9)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.10)$$

Menggunakan *transformasi laplace* untuk mengevaluasi dua persamaan 2.9 dan 2.10 dapat ditulis sebagai berikut (semua kondisi awal diasumsikan 0) [11]:

Untuk persamaan 2.9:

$$L \left\{ \frac{di}{dt} = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \right\} \quad (2.11)$$

Menjadi:

$$s i = -i \frac{R}{L} - \frac{k_e}{L} \omega_m + \frac{1}{L} V_s \quad (2.12)$$

Untuk persamaan 2.10:

$$L \left\{ \frac{d\omega_m}{dt} = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \right\} \quad (2.13)$$

Menjadi:

$$s \omega_m = i \frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \omega_m + \frac{1}{J} T_L \quad (2.14)$$

Tanpa beban (untuk $T_L = 0$) dari persamaan 2.14 menjadi:

$$\omega_m = i \left(\frac{k_t}{J} - \frac{k_f}{J} \right) \omega_m \quad (2.15)$$

Dari persamaan 2.15, i pada persamaan 2.12 diganti dengan menggunakan persamaan

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

$$\left(\frac{s\omega_m + \frac{k_f}{J}\omega_m}{\frac{k_t}{J}} \right) \left(s + \frac{R}{L} \right) = -\frac{K_e}{L}\omega_m + \frac{1}{L}V_s \quad (2.17)$$

Persamaan 2.17 menjadi:

$$\left\{ \left(\frac{S^2 J}{k_t} + \frac{sk_f}{k_t} + \frac{sRJ}{k_t L} + \frac{k_f R}{k_t L} \right) + \frac{K_e}{L} \right\} \omega_m = \frac{1}{L} V_s \quad (2.18)$$

Kemudian persamaan 2.18 di sederhanakan pada persamaan 2.19:

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

Maka, *transfer function* dapat di cari dengan menggunakan rasio dan kecepatan sudut,

ω_s untuk sumber tegangan V_s adalah [11]:

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

Fungsi alih tersebut disederhanakan menjadi:

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

Dengan mempertimbangkan asumsi berikut:

1. Gesekan konstan kecil, yaitu k_f mendekati 0, ini berarti:
2. $R J \gg k_f L$ dan
3. $K_e k_t \gg R k_f$

Dengan 0 diabaikan, penyederhanaan fungsi alih berubah menjadi [11]:

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

Jadi, dengan penataan ulang manipulasi matematis pada JL sebagai berikut, dari persamaan 2.22 dengan mengalikan pembilang kali penyebut [11]:

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Berdasarkan persamaan 2.23 maka diperoleh rumus sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\frac{RJ}{k_e k_t} \cdot L \cdot s^2 + \frac{RJ}{k_e k_t} \cdot s + 1} \quad (2.23)$$

dimana:

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s}$$

Berdasarkan persamaan 2.16 maka diperoleh rumus untuk *mechanical (time constant)*:

$$\tau_m = \frac{RJ}{k_e k_t} \quad (2.24)$$

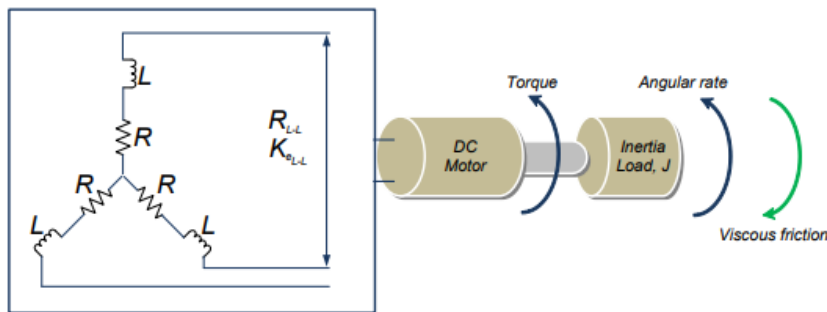
Electrical (time constant):

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (2.25)$$

Menggabungkan persamaan 2.24 dan 2.25 ke dalam persamaan 2.23:

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1} \quad (2.26)$$

Pada permodelan motor *brushless* DC tidak jauh berbeda dengan motor DC, hal yang membedakan permodelannya terletak pada *fase* yang mempengaruhi hasil keseluruhan model *brushless* DC. Fase khusus yang mempengaruhi resistif dan induktif dari susunan *brushless* DC. Misalnya pengaturan sederhana dengan simetris 3 *fase* dan koneksi internal yang bisa memberikan gambaran singkat tentang konsep fase keseluruhan [11].



Gambar 2. 10 Diagram simetris motor *brushless* DC [11]

Dari persamaan 2.23 – 2.25, kita dapat melihat perbedaan pada motor DC dan motor brushless DC. Perbedaan ini akan mempengaruhi konstanta mekanik dan elektrik karena merupakan bagian yang sangat berperan penting dalam parameter pemodelan [11].

Untuk ketetapan *mechanical time constant* dengan susunan simetris, persamaan 2.24 menjadi [11]:

$$\tau_m = \frac{RJ}{k_e k_t} = \frac{J \sum R}{k_e k_t} \quad (2.27)$$

Electrical time constant:

$$\tau_e = \frac{L}{\sum R} \quad (2.28)$$

Oleh karena itu dengan adanya susunan sistematis dan *fase ke-3, mechanical* dan *electrical constant* diketahui menjadi [11]:

Mechanical constant:

$$\tau_m = \frac{J.3R}{k_e k_t} \quad (2.29)$$

Electrical constant:

$$\tau_e = \frac{L}{3.R} \quad (2.30)$$

Efek *phasa:*

$$\tau_m = \frac{3.R\phi J}{\left(\frac{k_e(L-L)}{\sqrt{3}}\right).k_t} \quad (2.31)$$

sehingga persamaan 2.31 berubah menjadi:

$$\tau_m = \frac{3.R\phi J}{k_e k_t} \quad (2.32)$$

Dimana k_e merupakan nilai dari fase EMF tegangan konstan:

$$k_e = \frac{k_e(L-L)}{\sqrt{3}} \quad (2.33)$$

Jika terdapat hubungan antara k_e dan k_t yaitu menggunakan tenaga elektrik (sisi kiri) dan tenaga mekanik (sisi kanan) maka [11]:

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

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

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta dan Milik UIN Suska Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\begin{aligned}
 &= k_e \times \frac{2\pi \times 1}{60 \times \sqrt{3}} \\
 &= k_e \times 0.0605
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

dimana:

$$\begin{aligned}
 k_e &= \left[\frac{V-secs}{rad} \right] : \text{Torsi elektrik} \\
 k_e &= \left[\frac{N-M}{A} \right] : \text{Torsi konstan}
 \end{aligned}$$

Kemudian adapun persamaan untuk motor *Brushless* DC dapat diperoleh dari persamaan 2.26 dengan mempertimbangkan pengaruh dari konstanta dan *fase* yang sesuai, maka [1]:

$$G(s) = \frac{1}{\tau_m \cdot \tau_e \cdot s^2 + \tau_m \cdot s + 1}
 \tag{2.35}$$

2.3 Sistem Kendali

Sistem kendali dapat diartikan sebagai memerintah, mengatur, dan mengarahkan baik secara aktif maupun dinamis. Perancangan sistem kendali disesuaikan pada keinginan siperancang baik yang akan diatur, diperintah ataupun diarahkan [19]. Sistem kendali merupakan hubungan berbagai komponen hidrolis, elektrik, mekanik bahkan parameter dan variabel sosial, biologi, keuangan dengan tujuan mendapatkan fungsi yang diinginkan secara efisien dan akurat. Pada saat ini kemajuan dalam teori dan aplikasi kendali otomatis telah banyak menawarkan kinerja optimal untuk suatu sistem dinamik, meningkatkan produktifitas, menyederhanakan operasi manual yang sering dilakukan berulang-ulang, maka banyak insinyur dan ilmuwan sekarang ini telah memiliki pemahaman yang baik tentang kendali otomatis [20].

Berikut istilah dasar dalam sistem kendali yaitu:

1. Variabel terkendali (*controlled variable*) dan variabel termanipulasi (*manipulated variable*). Variabel terkendali merupakan kuantitas ataupun kondisi yang diukur dan dikendalikan. Adapun variabel termanipulasi merupakan kuantitas atau kondisi yang diubah oleh kendali sehingga dapat mempengaruhi nilai variabel terkendali, yang biasanya merupakan keluaran sistem.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

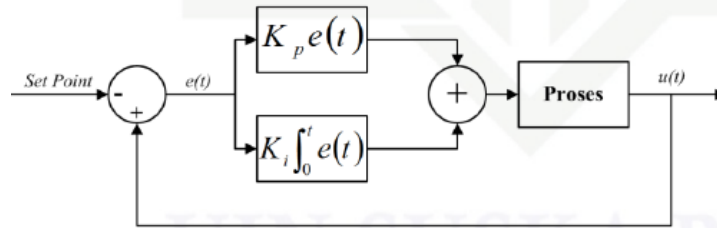
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2. *Plant*. Sebuah *plant* bisa berupa peralatan dan instrumen yang digunakan sebagai bagian dari sistem yang dikendalikan. Contoh *plant* misalkan peralatan mekanik, tungku bakar, reaktor kimia, pesawat luar angkasa dan sebagainya.
3. Proses. Lain hal dengan *plant*, proses adalah prosedur dan mekanisme yang dikendalikan persis seperti pada *plant*. Kendali sistem pemisahan cairan kimia, distilasi merupakan sistem kendali yang bekerja pada sebuah proses.
4. Sistem. Sistem merupakan semua komponen yang berhubungan dan memiliki tujuan tertentu, seperti efisiensi, otomasi dan optimasi yang membentuk sebuah sistem.
5. Gangguan (*disturbance*). Pada sistem riil, sering terdapat gangguan yang berpengaruh pada stabilitas dan kinerja sistem. Gangguan ini disebabkan oleh sistem itu sendiri (*internal disturbance*) ataupun gangguan dari luar sistem (*external disturbance*)
6. Kendali Umpan Balik (*feedback control*). Saat adanya gangguan, perbedaan antara keluaran dengan masukan acuan sulit diprediksi yang mengakibatkan tujuan pengoperasian sebuah sistem tidak tercapai. Dengan demikian, diperlukan umpan balik keluaran untuk dibandingkan dengan masukan acuan sehingga selisih perbedaan dapat dikendalikan, diminimalkan secara otomatis.

2.4 Pengendali Proportional Integral (PI)

Pengendali PI merupakan gabungan dari dua pengendali yaitu pengendali proporsional (*proportional controller*) dan pengendali integral (*integral controller*). Pengendali PI telah banyak digunakan dalam proses di industri karena permasalahan yang terjadi dapat diatasi secara maksimal hanya dengan pengendali PI. Penambahan pengendali P pada sistem, yaitu dapat menambah atau mengurangi tingkat kestabilan sistem, dapat menaikkan rise time dan settling time pada respon transient dan juga dapat mengurangi error steady state sistem yang mana apabila kita menginginkan mengurangi error maka kita harus menaikkan nilai K_p -nya sehingga nilai K_p -nya besar semakin tinggi nilai K_p maka semakin berkurang errornya tapi dengan menaikkan nilai K_p maka sistem menjadi tidak stabil[21]. Sedangkan pengendali I berfungsi untuk menghilangkan error steady state pada sistem sehingga respon sistem tidak mengalami osilasi. Kontroller ini tidak dapat berdiri sendiri sehingga harus dikombinasikan dengan kontrol proporsional. Dengan hanya menggunakan pengendali P sistem kadang tidak

Untuk mencapai nilai setpoint yang diinginkan maka dari itu dibantu dengan pengendali I. Blok Diagram pengendali PI dapat dilihat pada Gambar 2.7:



Gambar 2. 11 Blok Diagram Pengendali PI [19]

Dalam perancangan pengendali PI yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P dan I. Tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan. Efek dari perubahan parameter PI pada sistem kendali ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Tanggapan Pengendali PI Terhadap Perubahan Parameter [22]

| Tanggapan <i>Close Loop</i> | Waktu Naik | <i>Overshoot</i> | Waktu Turun | <i>Error Steady State</i> |
|----------------------------------|------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| <i>Proportional</i> (K_p) | Meningkat | Meningkat | Perubahan Kecil | Mengurangi |
| <i>Integral</i> (K_i) | Menurun | Meningkat | Meningkat | Hilang |

Untuk merancang pengendali PI, salah satu metode yang kebanyakan sering digunakan adalah metode *trial and error*. Hal ini disebabkan karena parameter K_p dan K_i tidak independen. Untuk mendapatkan aksi kendali yang baik diperlukan metode *trial and error* dengan kombinasi antara proporsional dan integral sampai ditemukan nilai K_p dan K_i seperti yang diinginkan [22].

2.5 Kontrol Logika Fuzzy

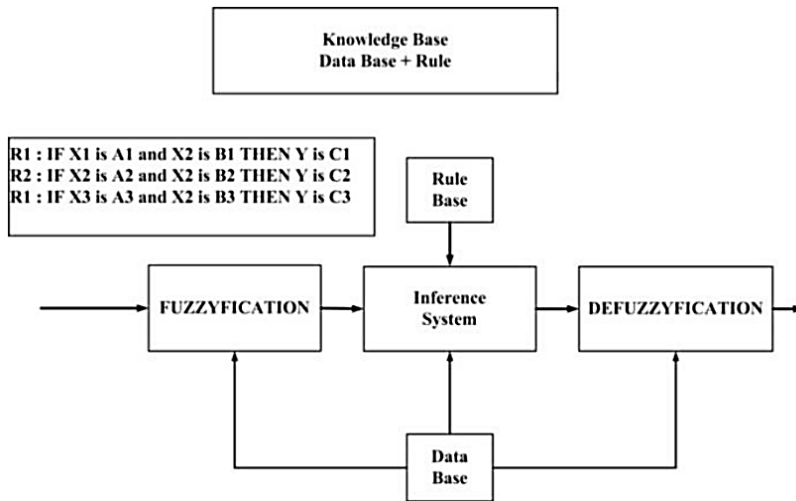
Logika atau disebut juga dengan dasar pemikiran. Logika klasik pada umumnya berkaitan dengan proposisi yang mempunyai dua kemungkinan yaitu bisa berlogika 1 (benar) atau berlogika 0. Proposisi adalah kalimat yang dinyatakan dalam suatu bahasa dan dapat diekspresikan [23]. *Fuzzy logic* adalah sebuah pemikiran yang tidak jelas atau samar. Istilah

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

fuzzy digunakan untuk membedakan satu himpunan dengan himpunan lainnya yang berdasarkan dengan derajat keanggotaan dengan batasan yang tidak begitu jelas. Sistem *fuzzy* adalah sistem yang menggunakan bentuk nilai *fuzzy* dan logika *fuzzy* dalam penerapannya. Dalam proses untuk membangun sebuah sistem *Fuzzy* maka sebuah sistem *fuzzy* memiliki bagian-bagian yaitu fuzzifikasi, mesin *interface*, *rule base fuzzy*, dan defuzzifikasi.



Gambar 2. 12 Tahap perancangan sistem *Fuzzy* [24].

Gambar 2.12 memperlihatkan sistem logika *fuzzy* secara umum pada bagian kiri dan sistem logika *fuzzy* secara spesifik pada bagian kanan. Dari gambar di atas, dapat disimpulkan bahwa *inference fuzzy* adalah metode yang menginterpretasi nilai pada vektor input berdasarkan beberapa kumpulan *rules*, dan menetapkan nilai pada vektor *output* [24].

2.5.1 Himpunan Fuzzy

Himpunan Fuzzy merupakan himpunan yang menyatakan keadaan dan kondisi dalam suatu sistem Fuzzy. himpunan Fuzzy dibuat berdasarkan pada pernyataan yang digunakan untuk memperlebar jangkauan fungsi dari karakteristik yang ditentukan hingga fungsi tersebut akan menyangkut bilangan real dengan range (0,1). Dalam himpunan Fuzzy nilai keanggotaannya diselalu berada di 0 atau 1 tapi juga terdapat nilai yang berada diantara nilai 0 dan 1 tersebut.

Himpunan fuzzy memiliki 2 atribut, yaitu:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Linguistik, yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti: MUDA, PAROBAYA, TUA.
2. Numeris, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel seperti: 40, 25, 50, dan sebagainya.

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem *fuzzy*, yaitu:

1. Variabel *Fuzzy*, Variabel *Fuzzy* adalah variabel yang akan dibahas dalam sistem *fuzzy* seperti : kecepatan, tegangan, dan temperatur
2. Himpunan *Fuzzy*, Himpunan *Fuzzy* merupakan himpunan yang menyatakan keadaan dan kondisi dalam suatu sistem *fuzzy*.
3. Semesta Pembicaraan, Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang dibolehkan dalam dalam sistem *fuzzy* dengan kata semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat bernilai positif maupun negatif
4. Domain, Domain himpunan *fuzzy* adalah keseluruhan nilai yang dibolehkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy* [29]. Seperti halnya semesta pembicaraan, domain juga bisa bernilai positif maupun negatif
5. Fungsi Keanggotaan (Membership Function), Fungsi Keanggotaan adalah kurva yang menunjukkan pemetaan pada titik-titik input yang telah ditentukan ke nilai keanggotaan yang mana telah ditentukan rangenya [29]. Fungsi keanggotaan bisa berupa segitiga, trapesium, dll.

2.5.2 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi yaitu suatu proses untuk mengubah suatu masukan dari bentuk tegas (*crisp*) menjadi *fuzzy* (variabel linguistik) yang biasanya disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan *fuzzy* dengan suatu fungsi keanggotaannya masing-masing. Fuzzifikasi merupakan pemetaan dari ruang *input* ke himpunan *fuzzy* yang didefinisikan pada semesta pembicaraan variabel *input* [3]. Berikut himpunan *fuzzy* yang sering digunakan pada proses fuzzifikasi sebagai berikut:

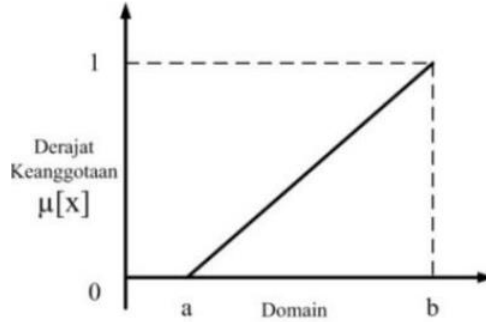
1. Representasi linear naik, pada himpunan ini kenaikan himpunan *fuzzy* dimulai nilai domain pada derajat keanggotaan terendah atau 0 bergerak naik ke kanan menuju ke nilai derajat keanggotaan yang lebih tinggi [25].

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

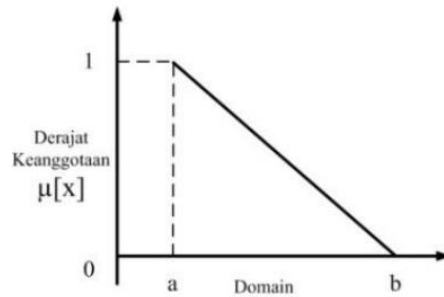
$$\mu_f(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{(x-a)}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1; & x \geq b \end{cases} \quad (2.36)$$



Gambar 2. 13 Representasi Linear Naik [24].

2. Representasi linear turun, pada himpunan ini dimulai dari nilai domain derajat keanggotaan yang tinggi dari kiri turun secara garis lurus menurun ke nilai domain derajat keanggotaan yang lebih rendah [25].

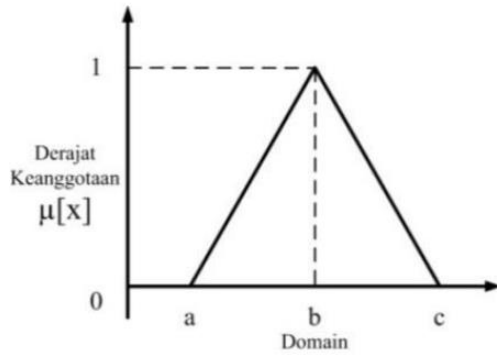
$$\mu_f(x) = \begin{cases} \frac{(b-x)}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0; & x \geq b \end{cases} \quad (2.37)$$



Gambar 2. 14 Representasi Linear Turun [24].

3. Representasi segitiga, representasi segitiga adalah penggabungan antara dua garis linear [25], kurva segitiga dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

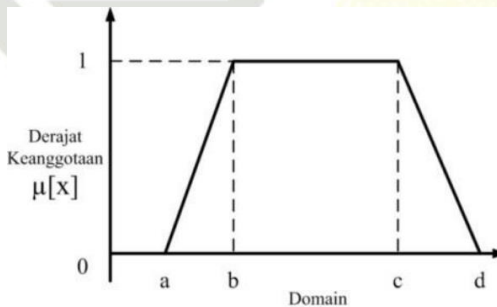
$$\mu_f(x) = \begin{cases} 0, & \text{for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{for } a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{for } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{for } x > c \end{cases} \quad (2.38)$$



Gambar 2. 15 Representasi Segitiga [24].

4. Representasi trapesium, hampir sama dengan kurva segitiga tapi yang membedakan di beberapa titik nilai keanggotaannya 1 [25].

$$u_f(x) = \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ for } x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, \text{ for } a \leq x < b \\ 1, \text{ for } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, \text{ for } c \leq x \leq d \\ 0, \text{ for } x > d \end{array} \right\} \quad (2.39)$$



Gambar 2. 16 Representasi Trapesium [24].

2.5.3 Aturan Fuzzy

Aturan kendali *fuzzy* dinyatakan dengan kumpulan aturan *if-then* yang mana anteseden dan konsekuennya berupa variabel linguistik. Kumpulan aturan kendali *fuzzy* tersebut merupakan relasi *input-output* dari sebuah sistem [23]. Berikut ini adalah empat metode dalam mendapatkan *rule base* sistem *fuzzy* :

1. Berdasarkan pengalaman para pakar dan pengetahuan kendali dari *engineer*, maksudnya berdasarkan pengoperasian manual dan metode kusioner.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2. Berdasarkan aksi operator kendali, metode ini dilakukan berdasarkan pengamatan manusia dalam pengendalian untuk menentukan input dan *output*-nya.
3. Berdasarkan model *fuzzy* dari sebuah sistem, maksudnya gambaran linguistik karakter yang dinamis dari suatu proses.
4. Berdasarkan pembelajaran, metode ini merujuk pada kemampuan untuk memodifikasi aturan *fuzzy* seperti *self-organizing*

2.5.4 Sistem Inferensi Fuzzy Mamdani

Sistem inferensi *fuzzy* (*Fuzzy Inference System / FIS*), yaitu kerangka komputasi yang didasarkan pada teori himpunan *fuzzy*, aturan *fuzzy* berbentuk *if-then*, dan penalaran *fuzzy*. Adapun langkah untuk membangun *fuzzy* mamdani adalah sebagai berikut:

1. Tentukan derajat kesepadanan antara himpunan *fuzzy* dan data masukan *fuzzy* untuk setiap variabel *input* dari setiap aturan *fuzzy*, hal ini sering dilakukan dengan menggunakan derajat kemiripan [26].
2. Hitung penyulutan untuk semua aturan yang dibuat mengacu pada derajat sepadanan yang telah dibuat dan penghubung (fungsi logika seperti *AND*, *OR*, dll) yang digunakan oleh variabel *input* dalam bagian premis dari aturan [26].
3. Lakukan implikasi *fuzzy* berdasarkan kuat penyulutan dan himpunan *fuzzy* yang telah terdefinisi untuk semua variabel *input* di bagian konsekuensi dari setiap aturan. Hasil dari ini kemudian digabungkan untuk menghasilkan *output* inferensi.

Ada tiga metode yang digunakan untuk interferensi sistem *fuzzy*:

1. Metode *Max* (*Maximum*)

Metode *Max* solusi himpunan *fuzzy* didapatkan dengan cara nilai tertinggi dari aturan *fuzzy*, kemudian nilai tertinggi tersebut digunakan kembali untuk memodifikasi daerah *fuzzy*, dan dilakukan aplikasi menggunakan operator *OR* ke *output* sistem, maka *output* akan berisi suatu himpunan *fuzzy* yang merefleksikan kontribusi setiap posisi [25].

$$u_{sf}(x) \leftarrow \max(u_{sf}(x), u_{sk}(x)) \quad (2.40)$$

2. Metode *Additive* (*Sum*)

Metode *sum* untuk mendapatkan himpunan *fuzzy* dengan melakukan *boundedsum* ke semua daerah *fuzzy* [25].

$$u_{sf}(x) \leftarrow \max(1, u_{sf}(x), u_{sf}(x)) \quad (2.41)$$

3. Metode *Probalistik OR* (Probor)

Metode Probor untuk mendapatkan nilai himpunan *fuzzy* dengan melakukan *product* ke semua daerah *fuzzy* [25].

$$u_{sf}(x) \leftarrow [u_{sf}(x) + u_{kf}(x)] - [u_{sf}(x)(u_{sf}(x))] \quad (2.42)$$

2.5.5 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah cara yang digunakan untuk mendapatkan nilai *crisp* (tegas) dari himpunan *Fuzzy*, defuzzifikasi merupakan penggambaran dari daerah aksi kendali *fuzzy* untuk meartikan semesta pembicaraan ke daerah *non fuzzy* [23]. Adapun metode untuk defuzzifikasi pada *Fuzzy* mamdani adalah sebagai berikut:

1. Metode *Centroid*

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode *centroid* dengan cara mengambil nilai pusat dari daerah *fuzzy*

$$z = \frac{\int z u(z) dz}{\int u(z) dz} \quad (2.43)$$

2. Metode *Bisector*

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode *bisector* dengan cara mengambil nilai pada domain *fuzzy* yang mempunyai nilai keanggotaan setengah dari jumlah keseluruhan nilai keanggotaan di daerah *fuzzy*.

$$s = \int_p^{Rn} u(z) dz \quad (2.44)$$

3. Metode *Min of Maximum* (MOM)

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode MOM dengan cara mengambil nilai rata-rata dari domain yang memiliki nilai keanggotaan *maximal*.

$$= \sum_{j=i}^m \frac{z_i}{m} \quad (2.45)$$

4. Metode *Smallest of Maximum* (SOM)

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode SOM dengan cara mengambil nilai rata-rata terendah dari domain yang memiliki nilai keanggotaan *maximal*.

5. Metode *Largest of Maximum* (LOM)

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

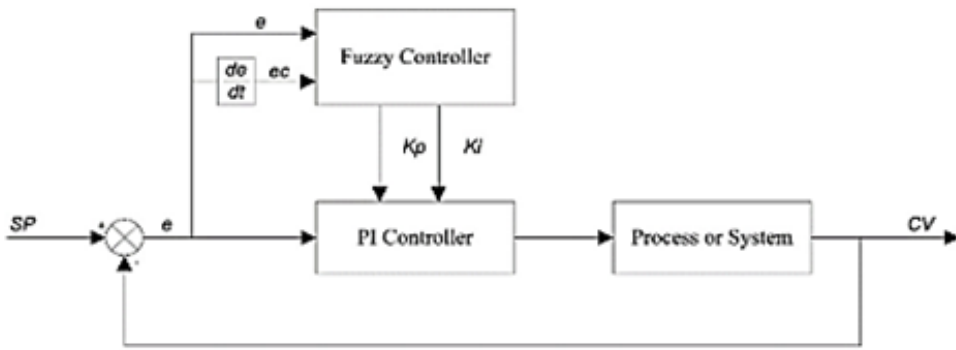
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Untuk mendapatkan nilai tegas pada metode LOM dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan *maximal*.

Pengendali PI Tuning-Logika Fuzzy

Pengontrol PI *tuning*-logika *fuzzy* adalah pengontrol yang mengambil struktur pengontrol PI konvensional sebagai basisnya, dimana parameter pengontrol PI pertama kali diatur dengan metode penyetelan konvensional, misalnya metode *loop* tertutup Ziegler-Nichols [27], dan kemudian secara otomatis diatur oleh pengontrol *fuzzy*. Struktur pengontrol *fuzzy* yang digunakan dalam pengontrol *fuzzy*-PI sama dengan pengontrol logika *fuzzy*, yang terdiri dari antarmuka *fuzzification*, basis pengetahuan, inferensi, dan antarmuka *defuzzification*. Setiap fungsi komponen dijelaskan secara rinci di pembahasan logika *fuzzy*. Diagram blok dari pengontrol *Fuzzy*-PI yang diusulkan ditampilkan pada gambar 2. 12 yang menunjukkan variabel *input* dan *output* dari setiap pengontrol. Untuk pengontrol *fuzzy*, variabel *input* adalah *error* (*e*) dan *error changing rate* (*ec* atau *de/dt*), sedangkan variabel *output* *Kp* dan *Ki*. Desain pengontrol diadaptasi dari Si dan Wang [28], yang mencakup set *fuzzy*, nilai linguistik, aturan *fuzzy*, dan persamaan untuk menghitung nilai baru *Kp* dan *Ki* di pengontrol PI.



Gambar 2. 17 Diagram Pengendali *Auto-Tuning Fuzzy*-PI [27]

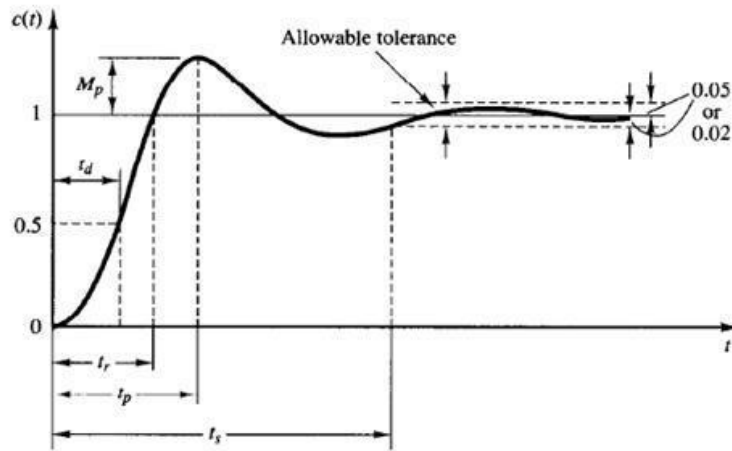
2.7 Identifikasi Respon Transien

Respon transien yang digunakan pada penelitian ini adalah respon transien orde dua, yang mempunyai fungsi alih dengan pangkat *s* tertinggi dua. Biasanya dinyatakan dengan rasio redaman ζ , frekuensi alami tak teredam ω_n . Identifikasi sistem yang mengacu pada

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

respons *transien* sistem dalam kondisi loop terbuka. Metode ini mengidentifikasi sistem berdasarkan pengamatan grafis terhadap masukan *step*[20]. Sistem yang digunakan pada pengaturan kecepatan pada motor *brushless* DC merupakan sistem orde 2 yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2. 18 Spesifikasi Respon *Transien*[20].

Berikut beberapa karakteristik respon *transient* yaitu[20]:

1. Waktu tunda/ *delay time* (t_d) adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai 50% dari nilai akhir dari tanggapan untuk pertama kali.
2. Waktu naik/ *rise time* (t_r) adalah waktu yang dibutuhkan untuk naik dari 10% – 90%, 5% – 95%, atau 0% – 100% dari nilai akhir dari tanggapan. Untuk kasus *underdamped*, biasanya digunakan kriteria 0%–100% dan untuk kasus *overdamped*, biasanya digunakan kriteria 10% – 90%.
3. Waktu puncak/ *peak time* (t_p) adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewat (*overshoot*) dari lewat yang pertama.
4. *Overshoot* maksimal (M_p) adalah nilai puncak maksimum dari respon diukur dari nilai akhir dari respon yang diukur dari harga satu (100%).
5. Waktu tunak/ *settling time* (t_s) adalah waktu yang dibutuhkan respon untuk mencapai nilai akhir dari respon dan tetap berada pada nilai tersebut dalam *range persentase* tertentu dari nilai akhir (biasanya 5% atau 2%).
6. Kesalahan tunak/ *error steady state* (e_{ss}) adalah kesalahan yang merupakan selisih antara keluaran yang sebenarnya dengan keluaran yang diharapkan.

$$e_{ss} = R_{ss} - C_{ss} \tag{2. 46}$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Dimana:

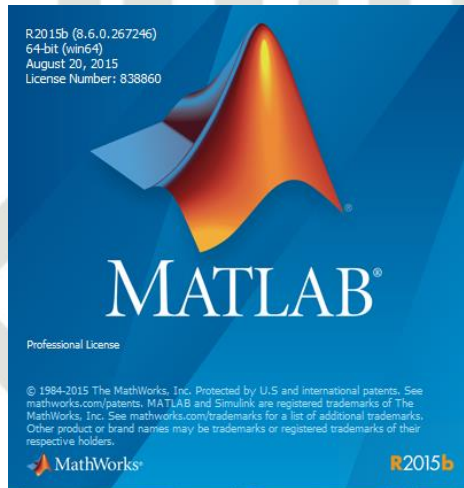
E_{ss} = *Error Steady State*

R_{ss} = *Masukan sistem pada steady state*

C_{ss} = *Keluaran sistem pada steady state*

Program Matlab

Matlab (*Matrix Laboratory*) merupakan suatu program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks [30].



Gambar 2. 19 Matlab R2015b

Matlab adalah merek *software* yang dikembangkan oleh Mathworks.Inc. *Software* ini menggunakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berdasarkan pada matriks dan digunakan untuk teknik komputasi numerik, menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matriks, optimasi, aproksimasi dan lain-lain. Matlab banyak digunakan di bidang matematika dan komputasi, pengembangan dan algoritma, Pemrograman Modeling, Simulasi, pembuatan *prototype*, analisa data, eksplorasi dan visualisasi, analisis numerik dan *statistic* dan pengembangan aplikasi teknik [30].

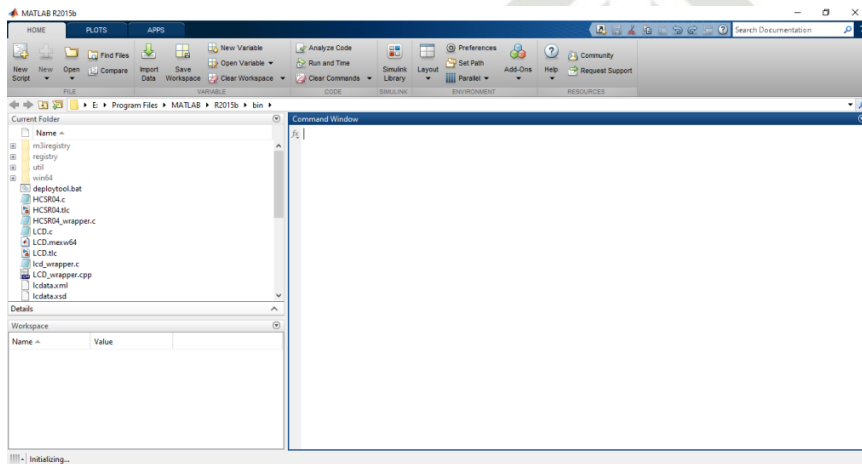
Pada perangkat lunak Matlab terdapat beberapa bagian penting yang digunakan dalam menjalankan program, yaitu:

1. *Command Window* digunakan untuk mengetik fungsi yang diinginkan.

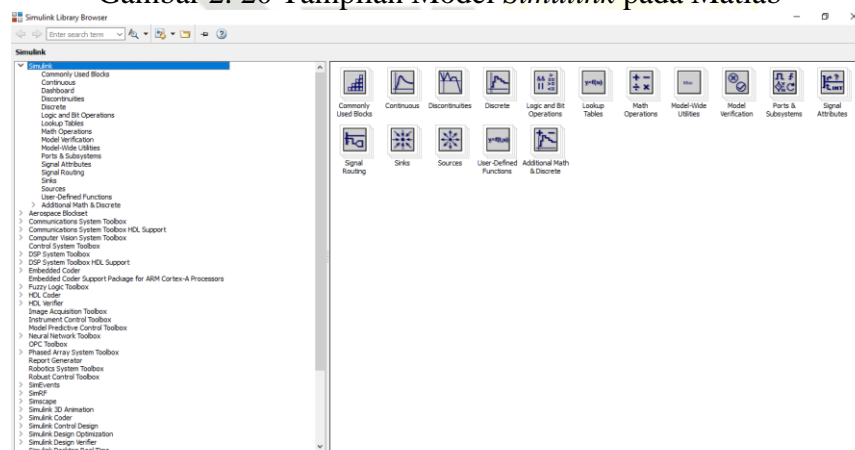
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
2. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2. *Current Directory* berfungsi untuk menampilkan isi dari direktori kerja saat menggunakan Matlab.
 3. *Command History* berfungsi yang telah digunakan sebelumnya dapat kembali.
 4. *Workspace* digunakan untuk membuat variabel yang ada dalam Matlab.
- Pada penelitian ini dilakukan pemrograman modeling dan simulasi untuk mendapatkan hasil penelitian yang diinginkan. fitur Matlab yang digunakan untuk simulasi ini disebut *Simulink*.



Gambar 2. 20 Tampilan Model *Simulink* pada Matlab

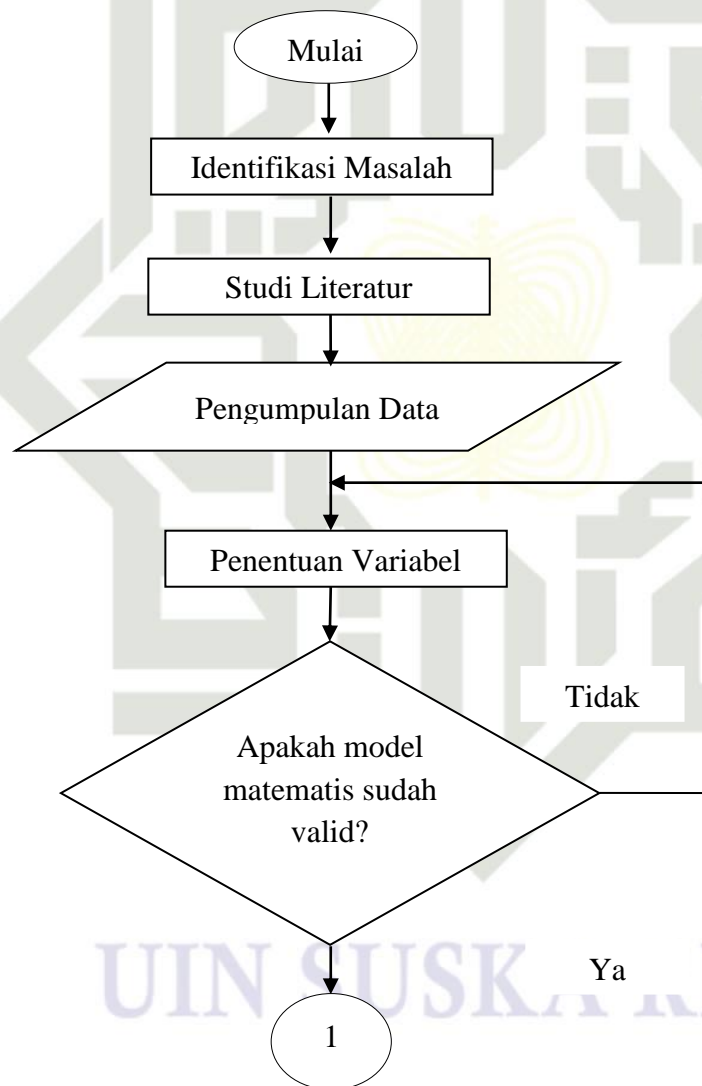


Gambar 2. 21 Kotak Dialog *Simulink Library*

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Flow Chart Metode Penelitian

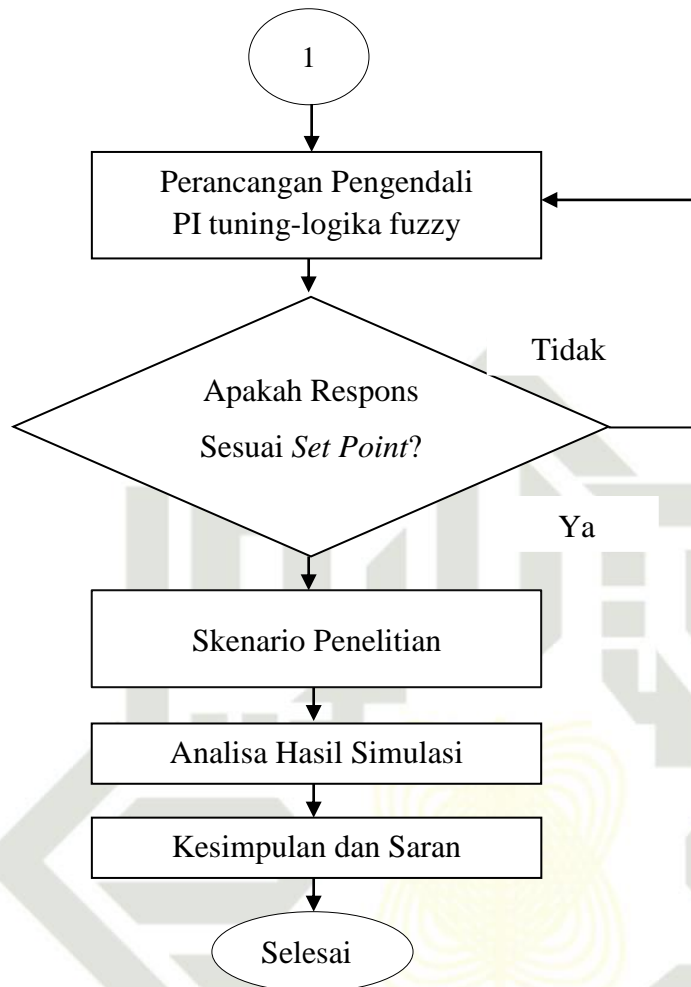
Pada penelitian tugas akhir ini ada beberapa tahapan yang penulis lakukan dalam proses perancangan pengendali PI *tuning*-logika *fuzzy* menggunakan simulasi Matlab. Adapun tahap penelitian ini dapat digambarkan melalui *flowchart* sebagai berikut:



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang



Gambar 3. 1 flowchart penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

Berdasarkan *flowchart* penelitian diatas, agar tujuan penelitian dapat tercapai, beberapa tahapan penelitian yang harus dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah

Sebelum melakukan penelitian, carilah masalah yang terdapat pada sistem motor *brushless* DC dengan me-review beberapa referensi yang berkaitan dengan motor *brushless* DC dan kendali.

2. Studi literatur

Setelah mendapatkan masalah apa yang akan di angkat menjadi Tugas Akhir ini, selanjutnya adalah mencari dan mempelajari referensi terkait dengan motor *Brushless* DC yang dibahas pada penelitian ini, baik berupa artikel penelitian yang telah dipublikasikan pada internet ataupun berupa jurnal dan tugas akhir.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Pengumpulan data

Tahap pengumpulan data dilakukan dengan mengumpulkan data sebelum membuat desain yang akan diperlukan untuk tahap selanjutnya. Data yang diperlukan pada penelitian ini adalah nilai parameter yaitu 1 volt dari rujukan penelitian ini supaya tidak melenceng dari nilai yang telah diteliti dari jurnal maupun skripsi yang sudah ada sebelumnya.

4. Penentuan Variabel

Setelah nilai masing-masing variabel pada tahap pengumpulan data didapatkan, kemudian variabel-variabel tersebut disubstitusikan ke dalam pemodelan matematis sistem pada persamaan (2.22) dalam bentuk *transfer function* berikut:

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

5. Pengujian *Plant* Motor *Brushless* DC

Pemodelan yang telah diperoleh perlu diuji dengan respons pada *plant* sebelum didesain pengendali. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah pemodelan sudah sesuai dengan referensi dan apakah formulasi yang digunakan sesuai untuk sistem kendali yang akan dibuat.

6. Perancangan Pengendali

Penelitian ini menggunakan pengendali PI tuning-logika *fuzzy* untuk mengatasi *error steady state* dengan memasukkan data-data yang telah didapat pada permodelan matematis sebelumnya ke dalam simulasi Matlab

7. Skenario Penelitian

Skenario penelitian merupakan tahapan/ langkah secara umum tentang penelitian yang dilakukan seperti melakukan pengujian terhadap sistem atau *plant*.

8. Analisa Hasil Pengujian

Melakukan analisis hasil pengujian dan mengklarifikasi hasil tersebut terhadap tujuan yang telah ditetapkan. Apabila telah memenuhi tujuan berarti penelitian telah berhasil dan apabila belum memenuhi tujuan maka perlu dikaji lebih lanjut.

9. Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisa hasil dan sesuai dengan tujuan maka penelitian yang dilakukan berhasil dan dapat ditarik kesimpulan dari hasil penelitian. Serta memberikan saran-saran yang berguna untuk dijadikan referensi penelitian selanjutnya.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan cara mencari data apa saja yang dibutuhkan dari penelitian penelitian terkait yang bertujuan untuk menentukan *set point* yang akan digunakan. Berdasarkan penelitian terkait yang sudah dilakukan review, *set point* yang didapatkan adalah 1 volt.

3.4 Pemodelan Motor *Brushless DC Type Maxon EC flat Ø 45 mm*

Pada perancangan ini motor *Brushless DC* digunakan adalah *type Maxon EC flat Ø 45 mm*, berikut ini adalah spesifikasi motor yang digunakan:

Tabel 3.1 Parameter Motor *Brushless DC* [11].

| Data Motor Maxon | | | |
|------------------|----------------------------------|-----------------------|----------|
| No | Nilai Pada Tegangan Nominal | Nilai | Satuan |
| 1 | Tegangan nominal | 12.0 | V |
| 2 | Kecepatan tanpa beban | 4370 | Rpm |
| 3 | Kecepatan nominal | 2860 | Rpm |
| Characteristics | | Nilai | Satuan |
| 1 | Terminal resistansi fase ke fase | 1.20 | Ω |
| 2 | Terminal induksi fase ke fase | 0.56×10^{-3} | H |
| 3 | Putaran Konstan | 25.5 | mNm/A |
| 4 | Kecepatan Konstan | 37.4 | rpm/V |
| 5 | Gradasi kecepatan / putaran | 17.6 | rpm/mNm |
| 6 | <i>Mechanical time constant</i> | 17.1 | Ms |
| 7 | <i>Rotor inertia</i> | 92.5 | gcm^2 |
| 8 | Nomor fase | 3 | - |

Berdasarkan persamaan (2.26) setelah dimasukkan nilai-nilai parameter motor *brushless DC* pada tabel 3.1 ke dalam fungsi alih motor *brushless DC*, maka didapatkan fungsi alih motor *brushless DC type Maxon EC flat Ø 45 mm* sebagai berikut:

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

Jadi, untuk menentukan nilai dari K_e , τ_m , dan τ_e perlu dihitung untuk mendapatkan model motor. Untuk nilai τ_e dapat dicari menggunakan persamaan 2.30:

$$\tau_e = \frac{L}{\phi \cdot R}$$

©

$$\tau_e = \frac{0.56 \times 10^{-3}}{3 \times 1.20}$$

$$\tau_e = 155.56 \times 10^{-6}$$

Dari persamaan 2.29 τ_m dapat dihitung:

Dimana:

$$R = 1.2 \Omega$$

$$J = 92.5 \text{ gcm}^2 = 9.25 \times 10^{-6} \text{ kgm}^2$$

$$K_t = 25.5 \text{ mNm/A} = 25.5 \times 10^{-3} \text{ Nm/A}$$

Sehingga:

$$\tau_m = \frac{J \cdot 3R}{K_e K_t}$$

$$\tau_m = \frac{9.25 \times 10^{-6} \cdot 3 \cdot 1.2}{0.0763 \cdot 25.5 \times 10^{-3}}$$

$$\tau_m = 0.0171 \text{ S}$$

Dari persamaan 2.29 K_e dapat dihitung:

$$\tau_m = \frac{3 \cdot R \cdot J}{K_e K_t}$$

$$K_e = \frac{3 \cdot R \cdot J}{\tau_m K_t}$$

$$K_e = \frac{3.12 \cdot 9.25 \times 10^{-6}}{0.0171 \times 24.5 \times 10^{-3}}$$

$$K_e = 0.0763 \frac{\text{v} - \text{sec}}{\text{rad}}$$

Lalu didapat G(s) menjadi:

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

$$G(s) = \frac{13.11}{0.0171 \cdot 155.56 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0171 \cdot s + 1}$$

$$G(s) = \frac{13.11}{2.66 \times 10^{-6} \cdot s^2 + 0.0171 \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

Dari parameter K_s digunakan untuk mendapatkan *setpoint*

$$K_s = 37.4 \text{ Rpm/V}$$

Pegambilan *setpoint* 1 volt:

$$K_s = 37.4 \frac{\text{Rpm}}{\text{volt}}$$

$$1 \text{ Volt} = 37.4 \text{ Rpm}$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

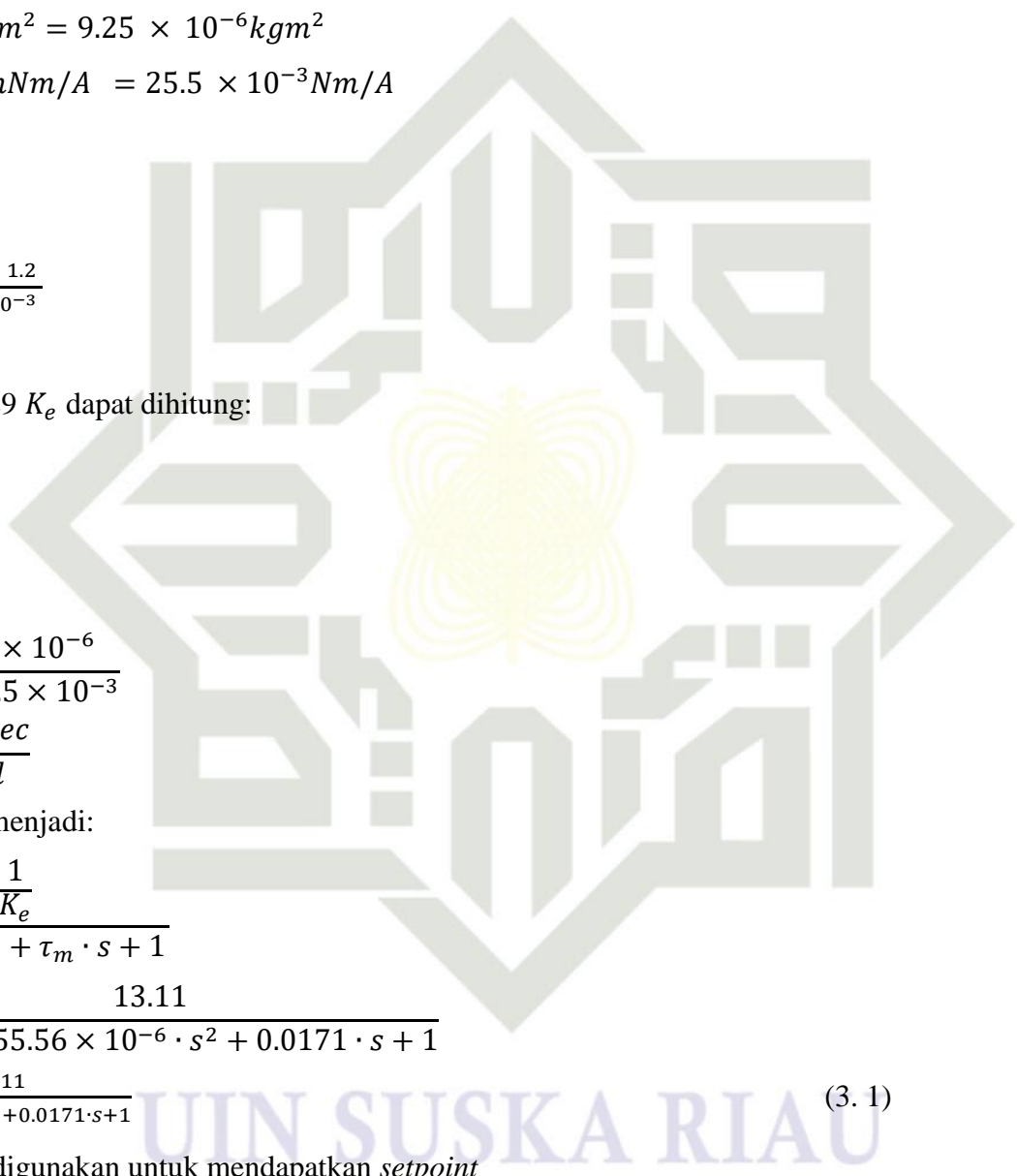
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

State Islamic University of Sumatra

Dr. H. Kasim Riau

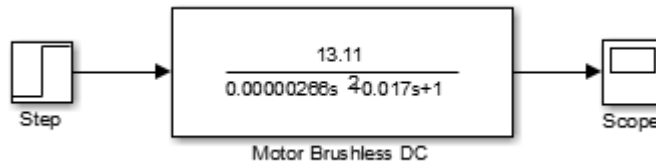


Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

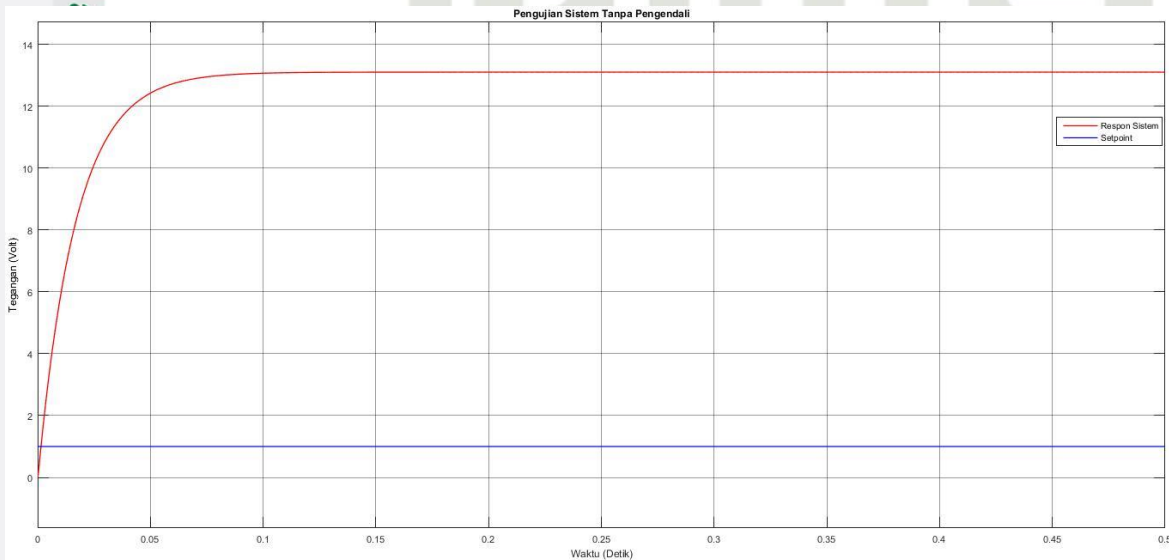
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3.5 Simulasi dan Verifikasi Plant Motor *Brushless* DC

Pengujian plant motor *Brushless* DC dilakukan menggunakan perangkat lunak *Simulink* Matlab dengan *time sampling* 0.05 detik dan *set point* 1 volt, blok diagram simulasi pengujian dilakukan secara *open loop* pada plant motor *Brushless* DC digambarkan seperti pada gambar 3.2 berikut ini:



Gambar 3. 2 Blok *Simulink* Digram *Open Loop* Motor *Brushless* DC



Gambar 3. 3 Respon *Open Loop* Motor *Brushless* DC *Open Loop* (Tanpa Pengendali)

Berdasarkan grafik hasil pengujian sistem tanpa pengendali diatas terlihat bahwa respons keluaran sistem sama dengan jurnal yang dirujuk[11]. Terlihat bahwa hasil respon sistem stabil, namun sistem tidak dapat mengikuti nilai *set point* yang diinginkan. Pada gambar 3.3 di atas menunjukkan nilai *set point* sebesar 1 volt, namun hasil respon keluaran sistem menunjukkan nilai melewati 13 volt dalam waktu kurang dari 0.1 detik untuk mencapai keadaan stabil dan memiliki *error steady state* sebesar 12.11 volt

3.6 Skenario Penelitian

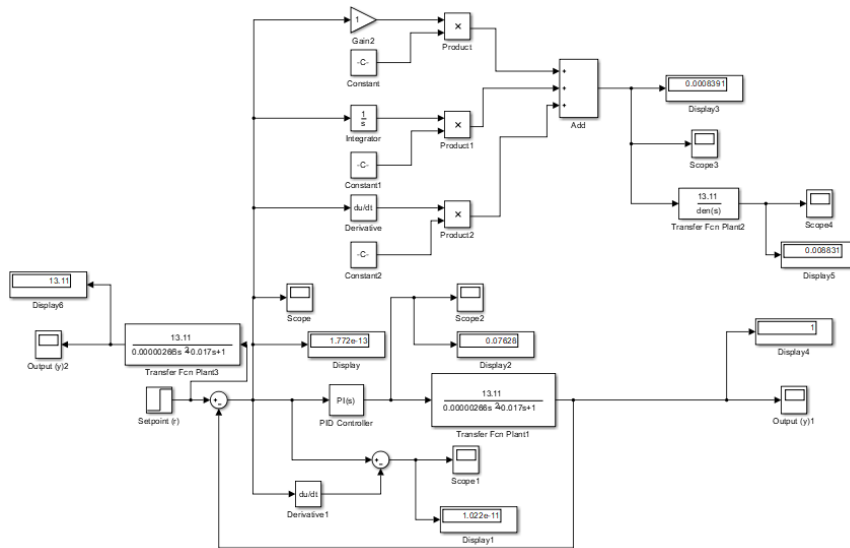
Pada skenario penelitian ini model sistem harus disimulasi dengan beberapa skenario (minimal 3 skenario), dimana masing-masing skenario menghasilkan minimal

suatu grafik. Penelitian ini menggunakan pengendali PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy* dengan memasukkan data-data yang telah didapat pada permodelan matematis sebelumnya ke dalam program Matlab, berdasarkan parameter penelitian terkait dengan nilai *set point* 1 volt. Adapun skenario penelitian yang akan dilakukan yaitu :

1. Simulasi sistem secara *open loop*
2. Simulasi menggunakan pengendali PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy*
3. Simulasi pengujian dengan menggunakan beban yang bervariasi

3.7 Perancangan Pengendali PI *Tuning* Menggunakan Logika *Fuzzy*

Pada perancangan PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy* ini, langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan nilai *input* dan *output* yang akan digunakan pada perancangan *fuzzy*. Nilai *input* berupa *error* dan *delta error*, sedangkan nilai *output* berupa K_p dan K_i yang didapat dengan PI *tuning*.



Gambar 3. 4 Rangkaian *Simulink* PI *Tuning*

Untuk mendapatkan nilai *input* dan *output fuzzy* dengan metode PI *tuning*, *double klik* pada blok *PI Controller* dan akan muncul tampilan seperti gambar 3. 5 berikut.



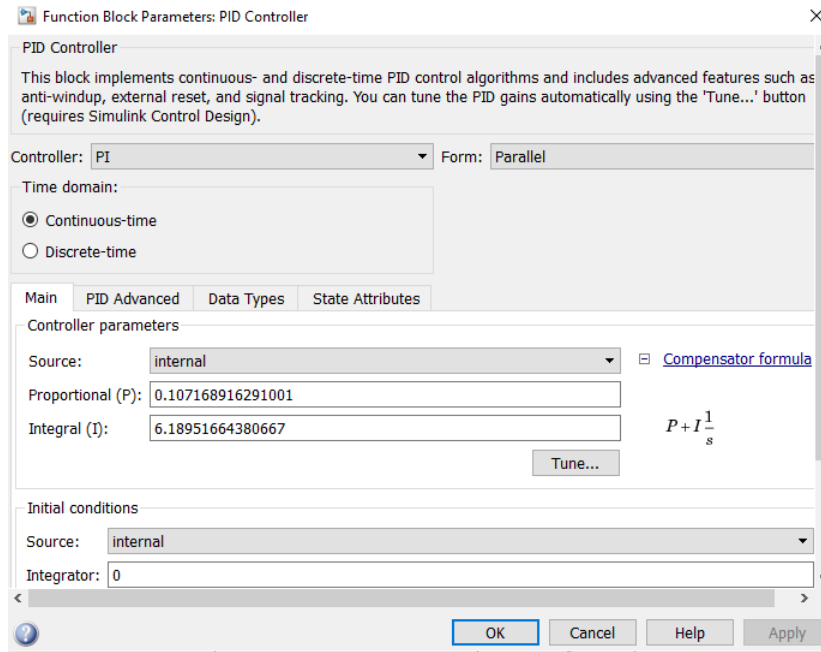
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

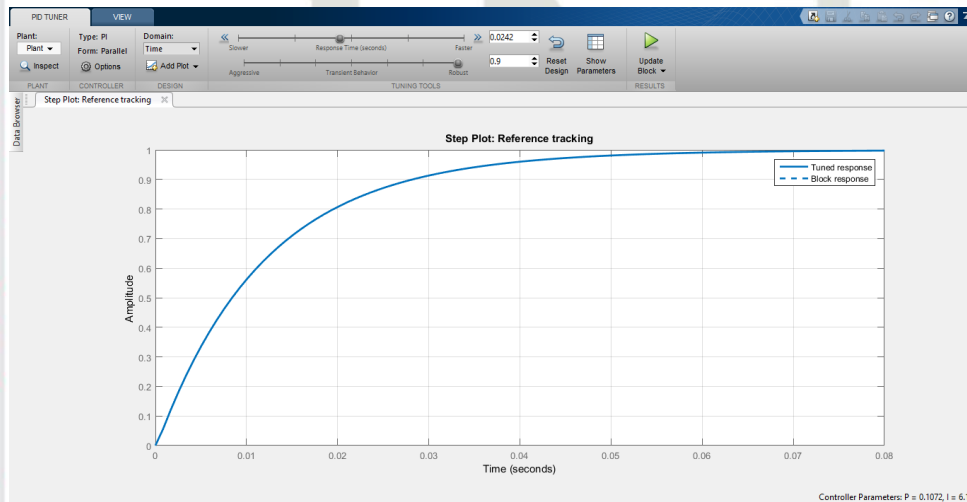
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3. 5 Tampilan blok PI Tuning Controller

Langkah selanjutnya adalah melakukan *tuning* dengan klik tombol *tune* yang ada pada tampilan blok *PI Controller* di atas. Kemudian geser tombol bulat yang ada pada garis *Slower* dan *Aggressive* hingga mendapatkan nilai P dan I yang menghasilkan grafik *scope* yang mencapai *set point*, respon sistem yang cepat dan stabil, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. 6 di bawah ini.



Gambar 3. 6 Tampilan Grafik Tuning PI

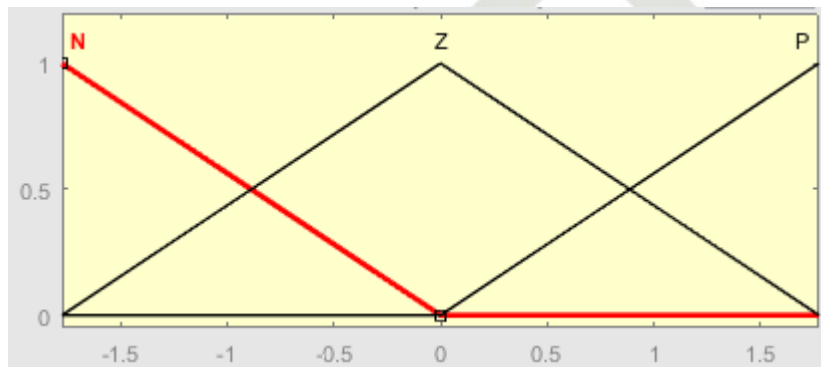
Setelah mendapatkan nilai K_p dan K_i sebagai *output fuzzy* dan nilai *error* dan *deriva* sebagai *input fuzzy* selanjutnya kita merancang *fuzzy* dengan metode mamdani. Metode *fuzzy* mamdani digunakan karena perancangannya yang sederhana dan mudah dipahami [31]. Adapun tahap perancangan pengendali *fuzzy* terdiri dari 3 tahapan, yaitu:

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

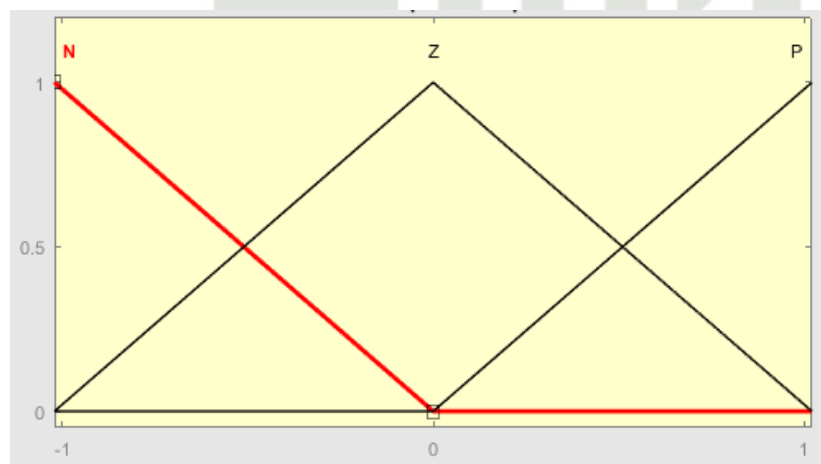
1. Fuzzifikasi

Perancangan fuzzifikasi dalam pemodelan ini, untuk nilai *range input error* dan *error* didapat dari rangkaian simulink kendali PI *tuning* seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.4, yaitu *error* dengan *range* $[-1.772 \times 10^{-13} \ 1.772 \times 10^{-13}]$ dan untuk *derror* dengan *range* $[-1.022 \times 10^{-11} \ 1.022 \times 10^{-11}]$. Selanjutnya untuk menentukan nilai *range output* 1 diambil dari nilai Kp dan nilai *range output* 2 diambil dari nilai Ki yang didapat dari hasil PI *tuning*. Untuk *output* 1 dengan *range* $[0 \ 0.214]$ dan *output* 2 dengan *range* $[0 \ 12.38]$, berikut adalah fuzzifikasi dari perancangan *fuzzy* pada penelitian ini:



Gambar 3. 7 Fungsi Keanggotaan *Error*

Gambar 3.7 diatas merupakan fungsi keanggotaan *error* yang mana penulis menggunakan 3 fungsi keanggotaan yaitu N (*Negative*), Z (*Zero*), dan P (*Positive*). Fungsi keanggotaan tersebut berbentuk segitiga, maka rentang himpunan fuzzy N (*Negative*) yaitu $[-3.543 \times 10^{-13} \ -1.772 \times 10^{-13} \ -2.524 \times 10^{-29}]$, Z (*Zero*) yaitu $[-1.772 \times 10^{-13} \ -2.524 \times 10^{-29} \ 1.772 \times 10^{-13}]$, dan P (*Positive*) yaitu $[-2.524 \times 10^{-29} \ 1.772 \times 10^{-13} \ 3.544 \times 10^{-13}]$.



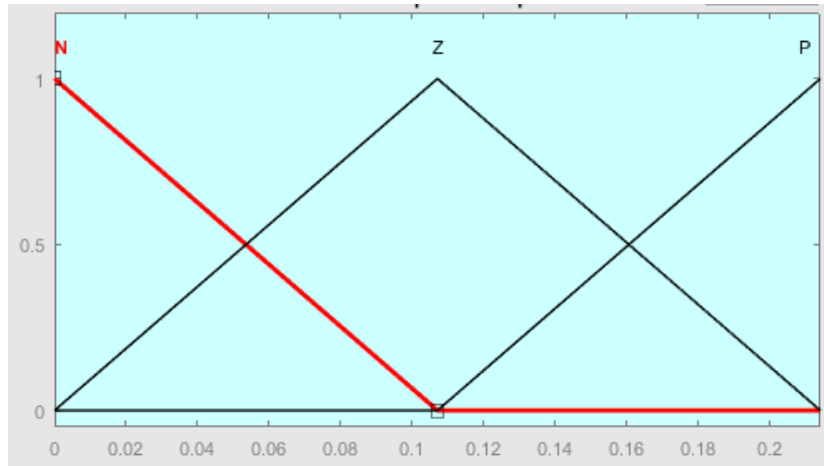
Gambar 3. 8 Fungsi keanggotaan *Derror*

Gambar 3.8 diatas merupakan fungsi keanggotaan *derror* yang mana penulis menggunakan 3 fungsi keanggotaan yaitu N (*Negative*), Z (*Zero*), dan P (*Positive*). Fungsi

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

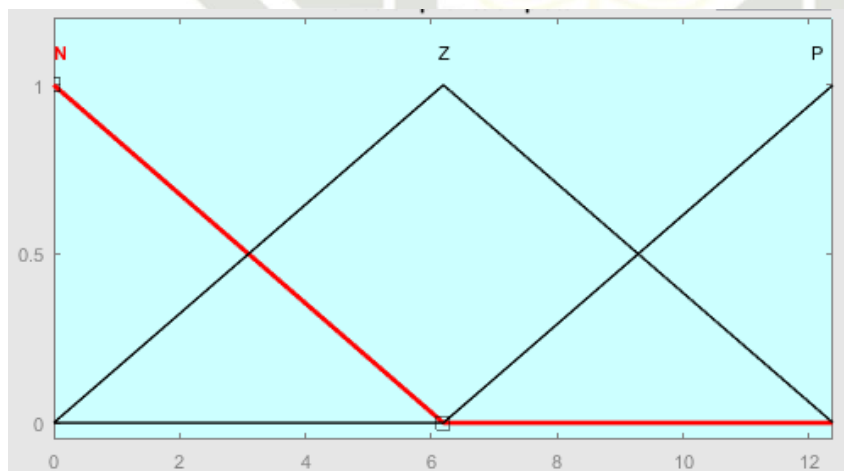
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

keanggotaan tersebut berbentuk segitiga, maka rentang himpunan fuzzy N (*Negative*) yaitu $[-2.043 \times 10^{-11} \ -1.022 \times 10^{-11} \ -1.616 \times 10^{-27}]$, Z (*Zero*) yaitu $[-1.022 \times 10^{-11} \ -1.616 \times 10^{-27} \ 1.022 \times 10^{-11}]$, dan P (*Positive*) yaitu $[-1.616 \times 10^{-27} \ 1.022 \times 10^{-11} \ 2.044 \times 10^{-11}]$.



Gambar 3. 9 Fungsi Keanggotaan Output 1

Gambar 3.9 diatas merupakan fungsi keanggotaan *output* 1 yang mana penulis menggunakan 3 fungsi keanggotaan yaitu N (*Negative*), Z (*Zero*), dan P (*Positive*). Fungsi keanggotaan tersebut berbentuk segitiga, maka rentang himpunan fuzzy N (*Negative*) yaitu $[-0.107 \ 0 \ 0.107]$, Z (*Zero*) yaitu $[0 \ 0.107 \ 0.214]$, dan P (*Positive*) yaitu $[0.107 \ 0.214 \ 0.428]$.



Gambar 3. 10 Fungsi Keanggotaan Output 2

Gambar 3.10 diatas merupakan fungsi keanggotaan *output* 2 yang mana penulis menggunakan 3 fungsi keanggotaan yaitu N (*Negative*), Z (*Zero*), dan P (*Positive*). Fungsi keanggotaan tersebut berbentuk segitiga, maka rentang himpunan fuzzy N (*Negative*) yaitu $[-6.189 \ 0 \ 6.189]$, Z (*Zero*) yaitu $[0 \ 6.191 \ 12.38]$, dan P (*Positive*) yaitu $[6.191 \ 12.38 \ 24.77]$.

Rule Base

Terdapat dua pendekatan yang dipakai dalam membuat *rule base*, yaitu pendekatan heuristik dan pendekatan deterministik. Pada penelitian ini penulis akan menggunakan pendekatan heuristik dimana, pendekatan ini lebih mudah dalam pengaplikasiannya. Pada pendekatan heuristik, *rule base* dirancang berdasarkan pengetahuan kualitatif dari respon *plant* secara *open loop*. Pada perancangan *plant* yang bertujuan untuk menghasilkan respon *plant* dengan nilai *error steady state* yang kecil. Adapun *rule base* yang dibuat adalah sebagai berikut:

1. *If (Error is N) and (Derror is N) then (Output1 is N) and (Output2 is N)*
2. *If (Error is N) and (Derror is Z) then (Output1 is N) and (Output2 is N)*
3. *If (Error is N) and (Derror is P) then (Output1 is Z) and (Output2 is Z)*
4. *If (Error is Z) and (Derror is N) then (Output1 is N) and (Output2 is N)*
5. *If (Error is Z) and (Derror is Z) then (Output1 is Z) and (Output2 is Z)*
6. *If (Error is Z) and (Derror is P) then (Output1 is P) and (Output2 is P)*
7. *If (Error is P) and (Derror is N) then (Output1 is Z) and (Output2 is Z)*
8. *If (Error is P) and (Derror is Z) then (Output1 is P) and (Output2 is P)*
9. *If (Error is P) and (Derror is P) then (Output1 is P) and (Output2 is P)*

Tabel 3. 2 Rule Base Fuzzy

| <i>Error</i> \ <i>Derror</i> | N (<i>Negative</i>) | Z (<i>Zero</i>) | P (<i>Positive</i>) |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N (<i>Negative</i>) | N (<i>Negative</i>) | N (<i>Negative</i>) | Z (<i>Zero</i>) |
| Z (<i>Zero</i>) | N (<i>Negative</i>) | Z (<i>Zero</i>) | P (<i>Positive</i>) |
| P (<i>Zero</i>) | Z (<i>Zero</i>) | P (<i>Positive</i>) | P (<i>Positive</i>) |

3. Defuzzifikasi

Metode *defuzzifikasi* yang digunakan pada penelitian ini adalah metode *centroid*, karena dari beberapa metode *defuzzifikasi* metode ini lebih cocok digunakan untuk *plant* kecepatan motor *brushless DC*.

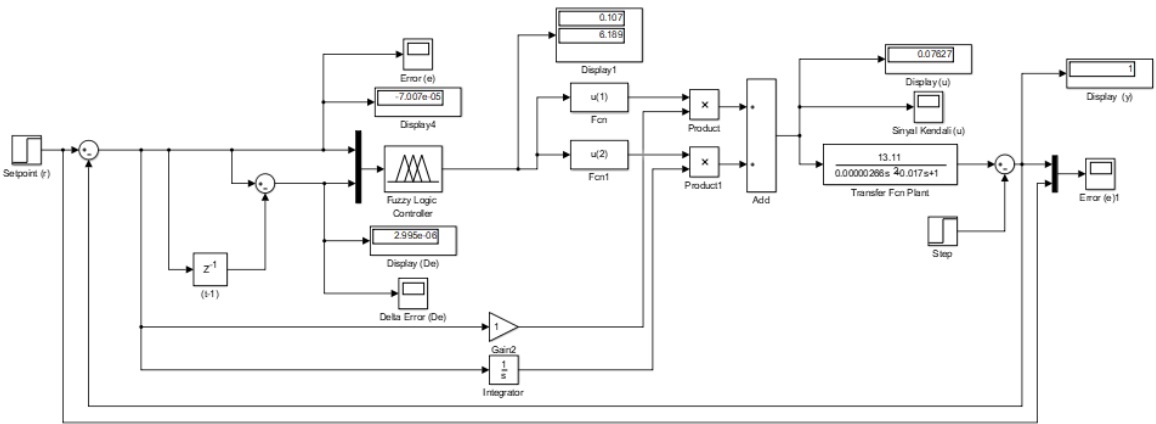
Setelah merancang pengendali logika *fuzzy* selanjutnya memasukkan *fuzzy* tersebut kedalam rangkaian *simulink* sistem pengendali *PI tuning* menggunakan logika *fuzzy*

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hak Cipta UINmuangri Unang-Uuang

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

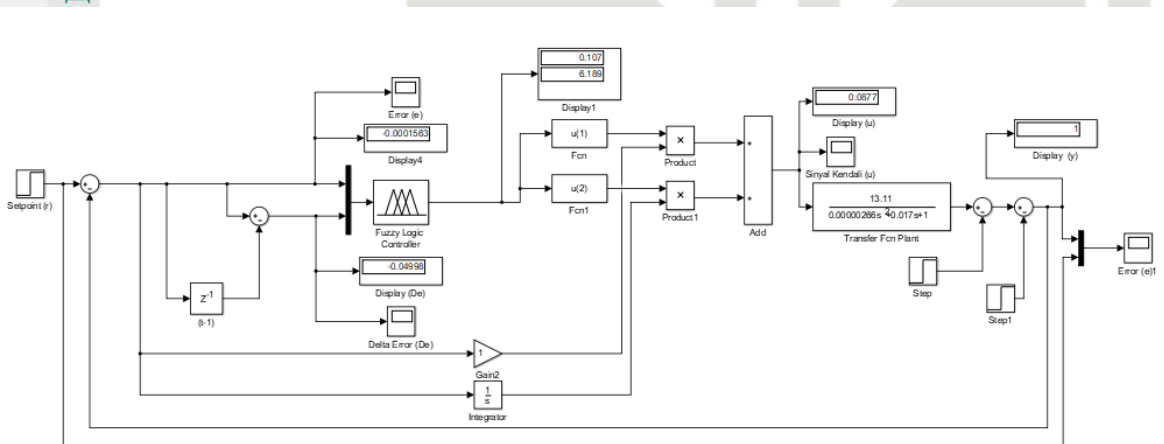


Gambar 3. 11 Rangkaian *Simulink* Sistem Pengendali *PI Tuning* Menggunakan Logika *Fuzzy*

Setelah merancang pengendali logika *fuzzy* selanjutnya memasukkan *fuzzy* tersebut kedalam rangkaian *simulink* sistem pengendali *PI tuning* menggunakan logika *fuzzy*, agar nantinya dapat dituning secara otomatis.

3.8 Peancangan Pengendali *PI Tuning* Menggunakan Logika *Fuzzy* dengan Beban

Untuk mengetahui performa pegendali *PI tuning* menggunakan logika *fuzzy* dalam mempertahankan kestabilan *output* atau tidak, maka dilakukan pengujian dimana beban pada motor tersebut diberikan bervariasi. Beban pertama yang diberikan sebesar 10% dari *set point*, sinyal akan diberikan pada detik ke 0.2 dan beban kedua diberikan sebesar 5% dari *set point*, sinyal akan diberikan pada detik 0.4. Berikut merupakan rangkaian *simulink* pengendali *PI tuning* menggunakan logika *fuzzy* saat diberikan beban yang bervariasi:



Gambar 3. 12 Rangkaian *Simulink* *PI Tuning* Menggunakan Logika *Fuzzy* dengan Beban

3.9 Hasil Data Penelitian yang Akan Diamati

Pada tahap ini data-data yang dibutuhkan untuk dianalisis berupa grafik hasil dari masing-masing pengujian pada sistem yaitu :

1. Respon *transient* dari hasil simulasi secara *open loop*
2. Respon *transient* dari hasil simulasi *PI tuning*
3. Respon *transient* dari hasil simulasi pengendali *PI tuning* menggunakan logika *fuzzy*
4. Respon *transient* dari hasil simulasi pengendali dengan beban

Adapun respon *transient* yang akan diambil pada penelitian diambil dari kinerja metode berdasarkan respon *transient* dan keadaan tunak (*error steady state*) setiap pengujian yang meliputi :

1. Waktu tunak atau *settling time* (t_s), adalah ukuran waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah masuk pada daerah stabil, biasanya antara 2%-5%.
2. Waktu naik atau *rise time* (t_r), adalah ukuran waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah naik dari 5% ke 95% atau 10% ke 90% dari nilai respon pada keadaan tunak (*steady state*).
3. Waktu tunda atau *delay time* (t_d), adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai $t=0$ sampai respon mencapai 50% dari nilainya pada keadaan tunak (*steady state*). Waktu tunda menyatakan besarnya faktor keterlambatan respon akibat proses *sampling*.
4. *Overshoot*, adalah nilai puncak maksimum dari kurva respon yang dilihat dari sistem. Nilai maksimum *overshoot* 100%. Jika nilai akhir *steady state* respon berbeda dari yang diinginkan, maka sistem tersebut terdapat *overshoot*.
5. Karakteristik respon keadaan tunak (*steady state*), sistem orde pertama diukur berdasarkan kesalahan pada keadaan tunak atau *error steady state*.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB V PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa respon sistem yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa pengendali PI *tuning*-logika *fuzzy* dapat membuat sistem mencapai *setpoint* yang diinginkan untuk pengendalian kecepatan pada sistem motor *brushless* DC. Pengendali juga dapat mempertahankan keadaan *steady state* agar sistem tetap stabil dengan melakukan pengujian beban sinyal kendali yang diberikan, dengan mengansumsikan nilai sebesar 10% dan 5% dari *set point*. Dari penelitian yang dilakukan pengendali tersebut juga mampu melakukan *tuning* otomatis dengan nilai K_p dan K_i yang benar, dengan berfungsinya PI *tuning*-logika *fuzzy* pada pengendali dapat memperbaiki respon transient dan *error steady state* yang dihasilkan. Sehingga permasalahan yang terjadi pada kecepatan dapat diselesaikan.

5.2 SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan pengendali PI *tuning* menggunakan logika *fuzzy* menunjukkan bahwa pengendali bisa mengikuti *set point* yang diberikan dan memiliki respon *transient* yang bagus. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan pengendali baru untuk mengatasi masalah yang terdapat di *open loop* yaitu memiliki *error steady state* yang besar.

UIN SUSKA RIAU

DAFTAR PUSTAKA

- © Hak cipta milik UIN Suska Riau
- State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau
- [1] Kemenperin.go.id, “*Lampaui 19 Persen Pada Kuartal I-2020, Industri Masih Berkontribusi Tinggi,*” 2020.
 - [2] U. N. Cendana, “*Motor-Motor Listrik,*” no. April, 2018.
 - [3] J. C. Gamazo-real, E. Vázquez-sánchez, and J. Gómez-gil, “*Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends,*” pp. 6901–6947, 2010, doi: 10.3390/s100706901.
 - [4] R. J. Masood, “*DDC Control Techniques for Three-Phase BLDC Motor Position Control,*” 2017, doi: 10.3390/a10040110.
 - [5] A. D. Yulianta, “*Pengendalian Kecepatan Motor Brushless Dc (Blcd) Menggunakan Metode Logika Fuzzy,*” vol. 8, no. 1, pp. 1–9, 2015.
 - [6] N. B. A. Karim, “*Simulation Of Speed Control Brushless Dc Motor Using Gaussian Fuzzy Logic Controller,*” 2014.
 - [7] F. Arifin, J. Pramudijanto, A. Fatoni, and A. P. B. V-, “*Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Metode Model Predictive Control (MPC),*” vol. 4, no. 2, 2015.
 - [8] H. Hibban, J. Pramudijanto, and N. Gamayanti, “*Desain Kontroler Fuzzy PID Gain Scheduling Untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC Tanpa Sikat,*” vol. 4, no. 2, pp. 2–5, 2015.
 - [9] F. Y. Pratama, “*Rancang Bangun Pengendalian Kecepatan Brushless Dc Motor Tipe A2212 / 10t 1400 Kv Menggunakan Kontroler Pid Berbasis Labview Fauzi Yuda Pratama Endryansyah Abstrak,*” pp. 157–166, 2017.
 - [10] R. Kristiyono, O. Wahyunggoro, and P. Nugroho, “*Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC menggunakan Algoritma Hybrid PID Fuzzy,*” pp. 116–124, 2015.
 - [11] O. J. Oguntoyinbo, “*Pid Control of Brushless Dc Motor and Robot Trajectory Planning and Simulation With,*” 2009.
 - [12] A. Pardomuan, A. Triwiyatno, and B. Setiyono, “*Perancangan Kontroler Self Tuning Fuzzy Pi Untuk Pengendalian Ketinggian Air Dan Temperatur Uap Pada Steam Drum Boiler,*” *Transient*, vol. 6, no. 1, pp. 45–52, 2017.
 - [13] R. A. Kurniawan and A. Zahra, “*Perancangan Kontroler Self – Tuning Pi Dengan Logika Fuzzy Sebagai Kendali Motor Servo Pada Sistem Tracking Bola.*”

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- © Hak cipta milik UIN Suska Riau
- State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau
- [14] N. R. Hadi Prasetya, “Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Brushless Dc Menggunakan Pengendali Linear Quadratic Regulator (Lqr) Nor Rochmad Hadi Prasetya Muhamad Syariffuddien Zuhrie Abstrak,” pp. 209–217, 2019.
- [15] R. Anggoro Kurniawan and dan Ajub Ajulian Zahra, “Perancangan Kontroler Self-Tuning Pi Dengan Logika Fuzzy Sebagai Kendali Motor Servo Pada Sistem Tracking Bola,” *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 536–542, 2018.
- [16] L. I. Priyadarshini, “Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor(BLDC) drives by using matlab-simulink,” pp. 178–183, 2017.
- [17] M. Azzumar, “Pemodelan dan Desain Kendali Sistem Aktuator Kendali Sirip Bebas Brushless DC Motor,” *Fak. Tek. Elektro, Univ. Indones.*, 2012.
- [18] E. M. Sartika, “Simulasi Karakteristik Motor BLDC UAV,” pp. 1–4, 2019.
- [19] K. O, *Modern Control Engineering*, vol. 39, no. 12. 2002.
- [20] K. Ogata, “Teknik Kontrol Automatik(Sistem Pengaturan),” p. 384, 1995.
- [21] Triyono, “Aplikasi Kontrol PID dengan Software Matlab,” vol. 4, 2015.
- [22] K. J. Åström and T. Hägglund, “PID controllers: theory, design, and tuning,” vol. 2. 1995.
- [23] D. A. R. Wati, *Sistem Kendali Cerdas*. 2011.
- [24] B. Y. dan K. Y. Agung Setiawan, “Logika Fuzzy Dengan Matlab,” *Jayapangus Press Bali, Indones.*, 2018.
- [25] S. Kusumadewi, *Analisis Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Toolbox Matlab*, Edisi Pert. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2002.
- [26] T. S. Widodo, *Sistem Neuro Fuzzy*, Edisi Pert. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2002.
- [27] A. Wahid, S. Anandita, M. F. Fadlian, and A. H. Mendrofa, “Improvement of linear distillation column control performance using fuzzy self-tuning PI controller,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2255, no. September, pp. 0–7, 2020, doi: 10.1063/5.0014060.
- [28] X. Si and J. Wang, “A vector-control system based on fuzzy self-tuning PID controller for PMSM,” *2010 Int. Conf. E-Product E-Service E-Entertainment, ICEEE2010*, no. 5, pp. 5–8, 2010, doi: 10.1109/ICEEE.2010.5661316.
- [29] W. Waluyo, A. Fitriansyah, and S. Syahril, “Analisis Penalaan Kontrol PID pada Simulasi Kendali Kecepatan Putaran Motor DC Berbeban menggunakan Metode Heuristik,” *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 1, no. 2, p. 79, 2013, doi: 10.26760/elkomika.v1i2.79.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

[30] C. Budi, “Penggunaan Software Matrix Laboratory (Matlab) Dalam Pembelajaran Aljabar Linier,” *Phenom. J. Pendidik. MIPA*, vol. 3, no. 1, p. 45, 2016, doi: 10.21580/phen.2013.3.1.174.

[31] D. A. R. Wati, *Sistem Kendali Cerdas*. Yogyakarta: Garaha Ilmu, 2011.



UIN SUSKA RIAU

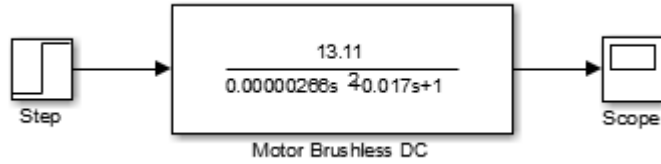
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

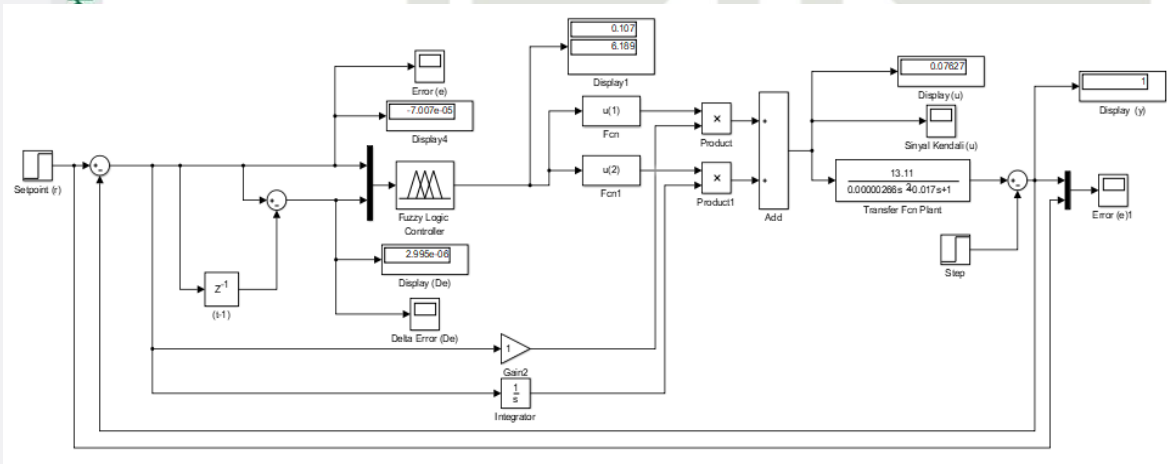
LAMPIRAN A

RANGKAIAN PENGENDALI PADA SIMULINK

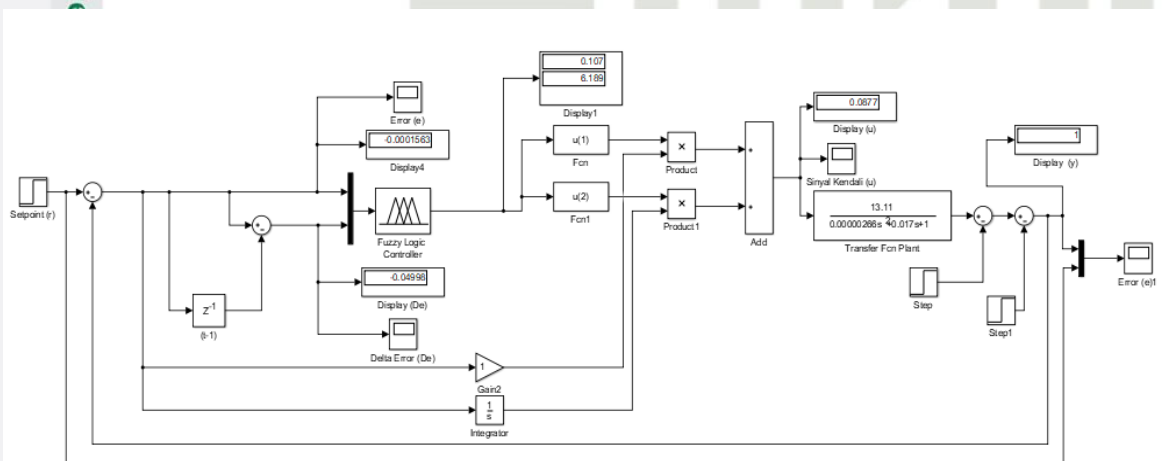
1. Rangkaian Motor *brushless* DC dengan *open loop*



2. Rangkaian motor *brushless* DC menggunakan pengendali PI *tuning-logika fuzzy*

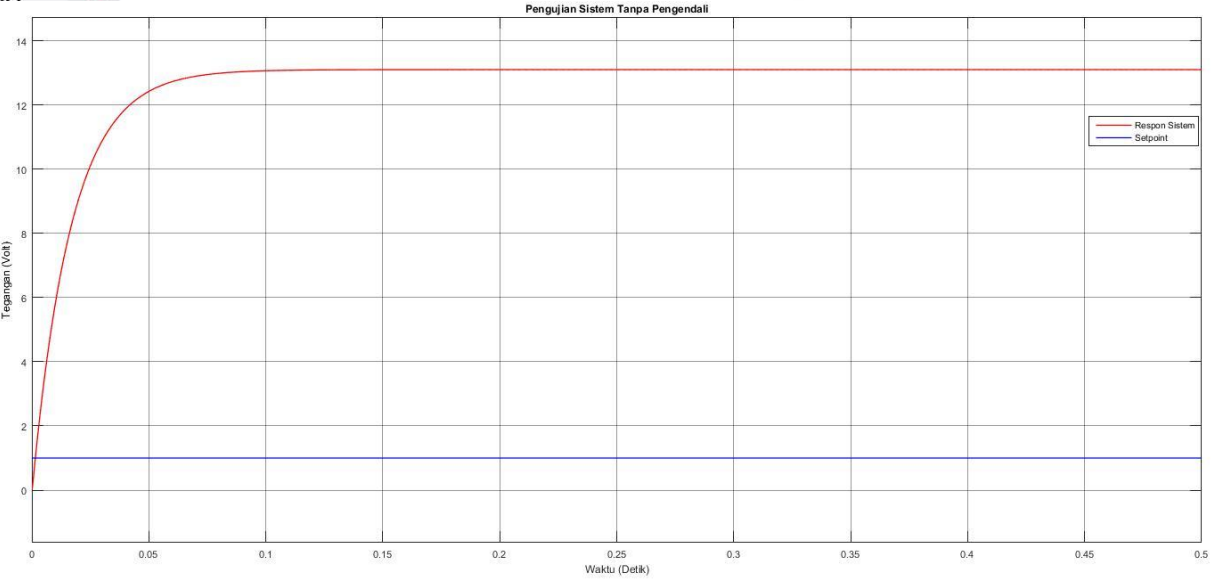


3. Rangkaian motor *brushless* DC menggunakan pengendali PI *tuning-logika fuzzy* dengan beban

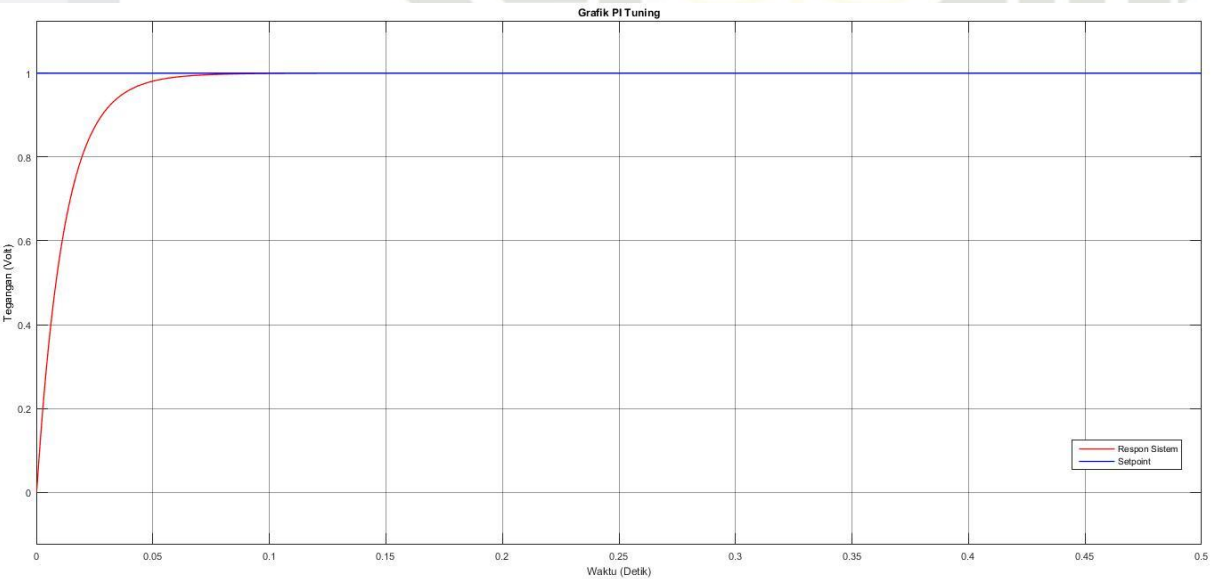


LAMPIRAN B HASIL SIMULASI

Hasil simulasi Motor *brushless* DC dengan *open loop*



2. Hasil simulasi motor *brushless* DC menggunakan *PI tuning*



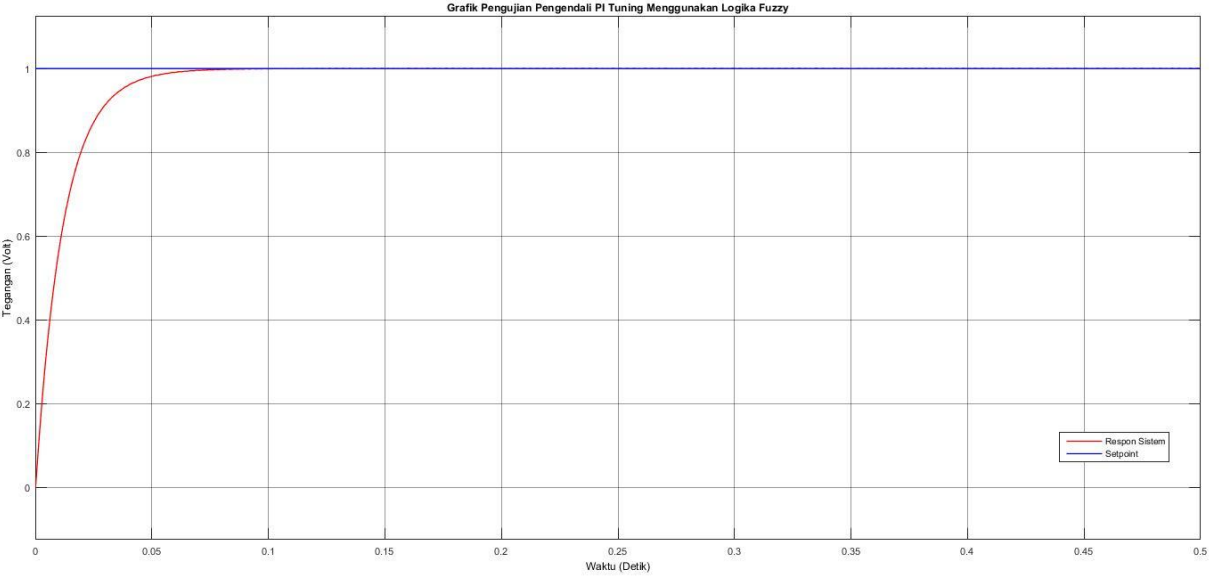
© Hak cipta milik

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

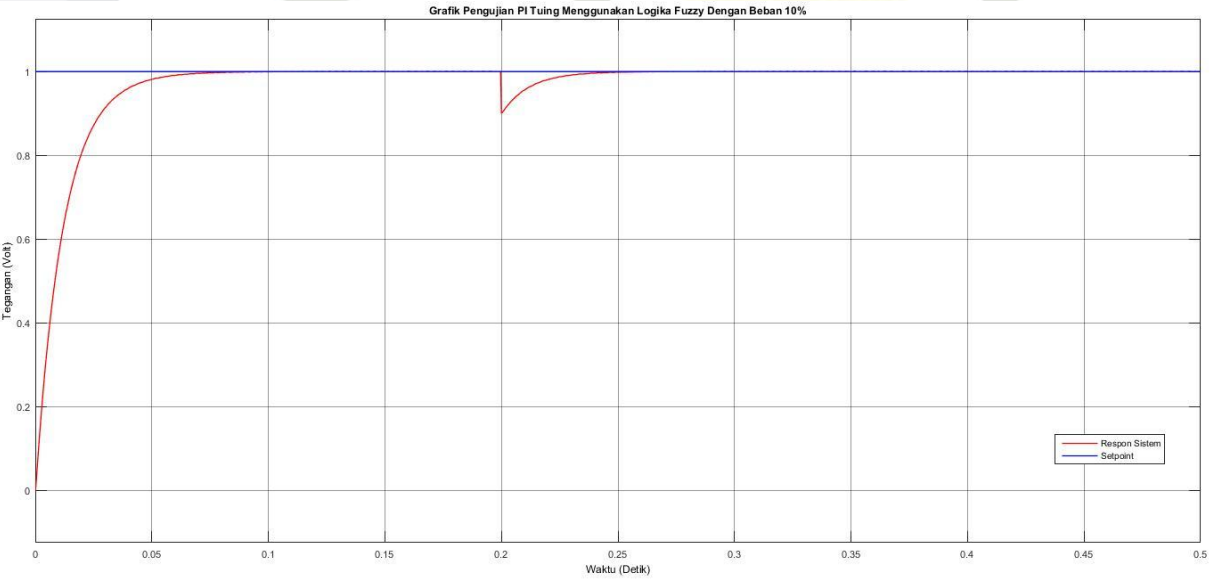
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Sultan Syarif Kasim I

Hasil simulasi motor *brushless* DC menggunakan pengendali PI *tuning*-logika *fuzzy*



4. Hasil simulasi motor *brushless* DC menggunakan pengendali PI *tuning*-logika *fuzzy* dengan beban 10%.

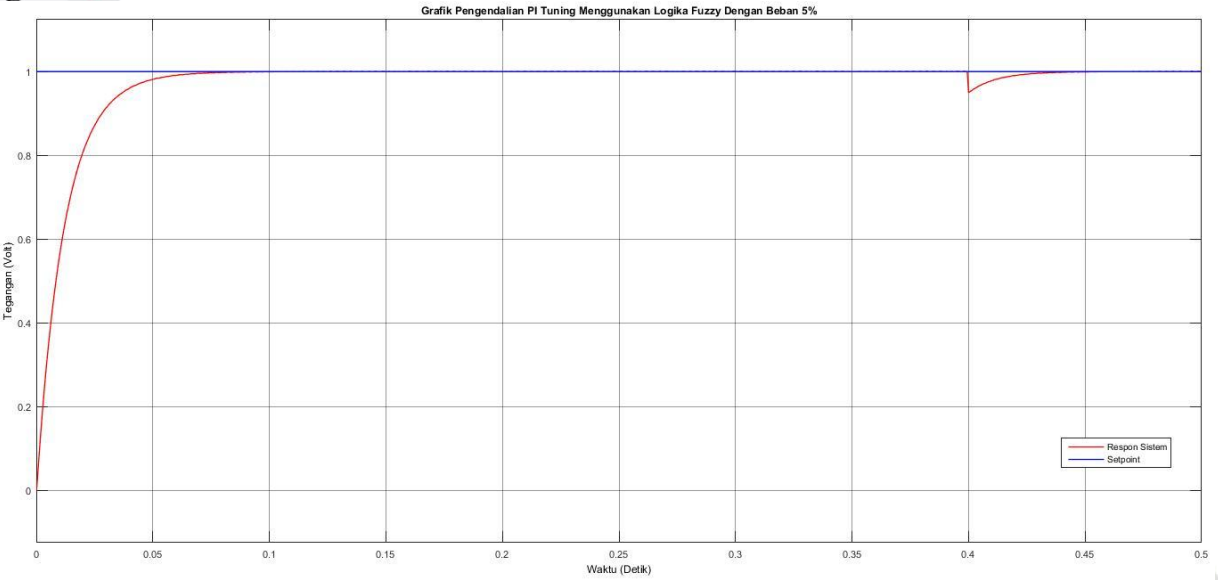


- Hak Cipta-Dili**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hasil simulasi motor *brushless* DC menggunakan pengendali PI *tuning*-logika *fuzzy* dengan beban 5%.

Hak Cipta Dilindungi

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nadia Aspa, lahir di Dalam Koto 5 Agustus 1999 merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Pardi dan Asna Elnita yang beralamat di Anak Air Duku, Jorong Cacang Randah, Kecamatan Tanjung Mutiara, Kabupaten Agam, Sumatera Barat.

Email : 11755202005@students.uin-suska.ac.id

HP : 08982198461

Pengalaman pendidikan yang dilalui dari SD Negeri 30 Cacang Randah 2006-2012, kemudian melanjutkan di SMP Negeri 2

Tanjung Mutiara pada tahun 2012-2015, Setelah itu dilanjutkan dengan pendidikan SMA Negeri 5 Bukittinggi pada tahun 2015-2017. Setelah lulus SMA penulis melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, dengan mengambil bidang kajian Elektronika dan Instrumentasi pada tahun 2017. Penulis menyelesaikan masa studi selama 4 setengah tahun dan lulus pada tahun 2021 dengan penelitian Tugas Akhir berjudul “**Desain PI Tuning Menggunakan Logika Fuzzy Untuk Mengendalikan Kecepatan Pada Motor Brushless DC**”.