

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC*
KONTROLER BERBASIS *INTERNET OF THINGS***

(Skripsi)

Oleh

HARI AGUS SIMARMATA

NPM. 1915031073



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2024

ABSTRAK

RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC KONTROLER BERBASIS INTERNET OF THINGS

Oleh

HARI AGUS SIMARMATA

Salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan adalah motor BLDC. Pada penelitian ini akan dibuat sebuah sistem pengendali *closed loop* kecepatan motor BLDC menggunakan Logika Fuzzy berbasis *Internet of Things* dengan *Blynk* sebagai *interface* antara perangkat lunak dan perangkat keras. Sistem kendali pada penelitian ini menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai mikrokontroler, rangkaian sensor kecepatan, *power supply* 12 volt, rangkaian *gate driver*, rangkaian *inverter* 3 fasa, NodeMCU ESP8266 sebagai mikrokontroler yang terhubung dengan jaringan internet serta motor BLDC 980 kV yang dihubungkan dengan beban berupa generator DC. Sistem kendali logika Fuzzy memiliki input berupa *setpoint*, *error* dan output berupa *delay*. Logika Fuzzy menggunakan metode Mamdani *MAX-MIN* dan memiliki 42 *rule*. Dari hasil penelitian didapatkan kesimpulan pada saat pengujian sistem dengan kontrol logika fuzzy tanpa beban saat *setpoint* 500 rpm, 700 rpm dan 1000 rpm didapatkan rata-rata *rise time* 1,41 detik, *settling time* 2,57 detik, serta *overshoot* 11,6%. Kemudian didapatkan juga kesimpulan pada saat pengujian sistem fuzzy menggunakan beban, kontrol fuzzy mampu menaikkan kecepatan menuju *setpoint* pada saat sistem diberi gangguan. Sistem pengendalian kecepatan motor BLDC berbasis *Internet of Thing* dapat dilakukan di mana saja dan kapan saja selama perangkat NodeMCU ESP8266 dan *smartphone* terkoneksi dengan jaringan internet.

Kata kunci: Motor BLDC, Mikrokontroler, Logika Fuzzy, Internet of Things

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR SPEED CONTROL SYSTEM USING FUZZY LOGIC CONTROLLER BASED ON INTERNET OF THINGS

By

HARI AGUS SIMARMATA

One of the most commonly used types of electric motors is the BLDC motor. In this research, a closed-loop speed control system for a BLDC motor will be developed using Fuzzy Logic based on the Internet of Things with Blynk as the interface between software and hardware. The control system in this research uses the Arduino Mega 2560 as the microcontroller, a speed sensor circuit, a 12-volt power supply, a gate driver circuit, a 3-phase inverter circuit, NodeMCU ESP 8266 as the microcontroller connected to the internet network, and a 980 kV BLDC motor connected to a DC generator load. The Fuzzy logic control system has inputs such as setpoint, error, and output in the form of delay. Fuzzy Logic uses the Mamdani MAX-MIN method and consists of 42 rules. From the research results, it is concluded that during the system testing with fuzzy logic control without load at setpoints of 500 rpm, 700 rpm, and 1000 rpm, the average rise time is 1.41 seconds, settling time is 2.57 seconds, and overshoot is 11.6%. Furthermore, it is also concluded that during the testing of the fuzzy system with a load, fuzzy control is able to increase the speed towards the setpoint when the system is disturbed. The speed control system for a BLDC motor based on the Internet of Things can be performed anywhere and anytime as long as the NodeMCU ESP 8266 device and smartphone are connected to the internet network.

Keywords: BLDC Motor, Microcontroller, Fuzzy Logic, Internet of Things

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC
KONTROLER BERBASIS *INTERNET OF THINGS***

Oleh

HARI AGUS SIMARMATA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi

**RANCANG BANGUN SISTEM
PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
BRUSHLESS DIRECT CURRENT
MENGUNAKAN FUZZY LOGIC
KONTROLER BERBASIS INTERNET OF
THINGS**

Nama Mahasiswa

Hari Agus Simarmata

Nomor Pokok Mahasiswa

1915031073

Program Studi

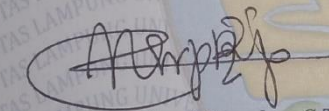
Teknik Elektro

Fakultas

Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Dr. Eng. Charles R Harahap.S.T.,M.T.
NIP. 196912111999031001

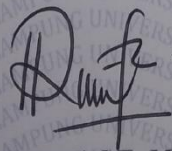


Dr. Eng. F. X. Arinto S., S.T., M.T.
NIP. 196912191999031002

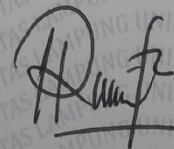
2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro



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

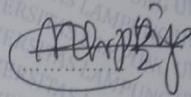


Herlinawati, S.T., M.T.
NIP 197103141999032001

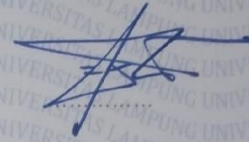
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

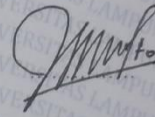
Ketua : Dr. Eng. Charles R Harahap, S.T., M.T.



Sekretaris : Dr. Eng. F. X. Arinto S., S.T., M.T.



Penguji : Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M. Sc.)

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 1 Maret 2024

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Hari Agus Simarmata

Npm : 1915031073

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC KONTROLER BERBASIS INTERNET OF THINGS" merupakan asli penelitian saya. Pada skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak terdapat atau ditebitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, 21 Maret 2024



Hari Agus Simarmata

NPM. 1915031073

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Padang Panjang, pada tanggal 14 Agustus 1999. Penulis merupakan anak kedua dari enam bersaudara dari pasangan Bapak Pendi Simarmata dan Ibu Hermina Boru Purba. Penulis memulai Pendidikan di SD Fransiscus pada tahun 2005 hingga 2011, SMP Negeri 5 Kota Padang Panjang pada tahun 2011 hingga 2014, dan SMA Negeri 2 Kota Padang Panjang. Pada tahun 2019, penulis diterima di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Selama masa perkuliahan, penulis mengambil konsentrasi Teknik Tenaga Listrik (TTL) dan selama menjadi mahasiswa, penulis mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro sebagai anggota Divisi Sosial dan Kewirausahaan pada periode 2020 dan periode 2021. Penulis juga bergabung dalam keanggotaan asisten di Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik sebagai koordinator praktikum dan asisten praktikum pada mata kuliah Pengukuran Besaran Listrik dan Rangkaian Listrik selama tahun 2021 hingga 2023. Selain itu, penulis juga mengikuti Kegiatan Pengabdian Masyarakat ke SMA YP Unila dan melakukan proyek pengukuran pentanahan. Penulis juga pernah mengikuti program Magang MSIB sekaligus kegiatan kerja praktik di PT. Syntek Otomasi Indonesia pada divisi Operation and Maintance. Dan setelah itu, penulis melanjutkan kegiatan magang di PT Haleyora Power Sub Region 7 Lampung pada bidang pengoperasian dan pemeliharaan jaringan listrik.

PERSEMBAHAN

**Dame Abak Jahoba Na Mangentei Sasude Angkal Naeng Mangaramoti Roha
Dohot Pingkiranmu Bagas Kristus Jesus Amen**

Karya tulis ini ku persembahkan untuk:

Ayah dan Ibu Tercinta

Pendi Simarmata dan Hermina Boru Purba

Opung dan Namboru Tersayang

Nurmi Boru Manik

Nurita Boru Simarmata

Marheni Boru Simarmata

Astri Boru Simarmata

Terima kasih atas dukungan serta doa selama ini sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini

MOTTO

“Kuatkan dan teguhkanlah hatimu, janganlah takut dan janganlah gemetar karena mereka, sebab Tuhan, Allahmu, Dialah yang berjalan menyertai engkau; Ia tidak akan membiarkan engkau dan tidak akan meninggalkan engkau”

(Ulangan 31: 86)

“Dang adong naso tarpatupa ni Debata”

(N. N)

**“Haholongi Inangmi, Parsangapi Inangmi
Asa Martua Ho”**

(E. Tobing)

Selama aku punya seseorang yang melihat diriku yang sebenarnya, Aku lebih memilih jadi diriku sendiri”

(N. N)

SANWACANA

Puji syukur penulis sampaikan kehadiran Tuhan yang Maha Esa karena atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Brushless Direct Current menggunakan Fuzzy Logic Kontroler berbasis Internet of Things”. Selama menjalani pengerjaan tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
4. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung
5. Bapak Dr. Eng. Charles R Harahap, S.T., M.T. selaku pembimbing utama tugas akhir yang bersedia memberikan waktu, tenaga, serta pikiran dalam membimbing kepada penulis. Terima kasih atas ilmu, nasihat, saran, serta kritik selama proses penyusunan skripsi ini dan selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. F. X. Arinto S., S.T., M.T. selaku pembimbing pendamping tugas akhir yang bersedia meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran dalam membimbing kepada penulis. Terima kasih atas ilmu, nasihat, saran, serta kritik selama proses penyusunan skripsi ini dan selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung.

7. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto, M.T. selaku penguji utama dalam proses penyusunan skripsi ini. Terimakasih atas ilmu, nasihat, saran, serta kritik selama penulis menjadi mahasiswa Teknik Elektro.
8. Bapak Saiful Alam, S.T., M.T. selaku pembimbing akademi penulis yang telah memberikan bimbingan bagi penulis selama menjalani studi di Teknik Elektro Universitas Lampung.
9. Ibu Yetti Yuniati, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik yang turut berperan dalam memberikan motivasi, semangat, serta dukungan kepada penulis selama kuliah
10. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu, pengajaran, serta bimbingan selama penulis menjalani perkuliahan di Teknik Elektro Universitas Lampung.
11. Bapak Baiqodar, S.T. selaku PLP Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik yang telah membantu serta memberikan semangat selama perkuliahan.
12. Seluruh Staff Jurusan Teknik Elektro serta Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu penulis dalam segala urusan administrasi.
13. Orang tua yang penulis cintai, Bapak Pendi Simarmata dan Ibu Hermina Boru Purba atas segala dukungan, nasehat, serta doa sehingga memberikan kelancaran pada penulis dalam menyelesaikan perkuliahan dan pengerjaan skripsi ini.
14. Parulian Simarmata, Johannes Simarmata, Riski Simarmata, Novrida Simarmata, Jesika Simarmata selaku saudara kandung penulis yang selalu memberikan semangat, motivasi, bimbingan serta doa kepada penulis selama perkuliahan dan pengerjaan skripsi.
15. Keluarga di Bandar Lampung: Opung, para Namboru dan Amangboruku, bere-bereku, Abang serta Kakak yang bersedia memberikan tempat tinggal, uang, waktu, doa, saran serta masukan selama menjalani kegiatan perkuliahan.
16. Member UKM-PG: Ferry, Joseph, Iyan dan Leon yang selalu menemani kegiatan selama kuliah, tempat bercanda serta bercerita serta memberi dukungan kepada penulis melalui kegiatan rutin UKM.

17. Semua rekan-rekan asisten Lab PBL Angkatan 2018, 2019, 2020, dan 2021 yang saling membantu dan bekerja bersama penulis selama mejadi asisten lab PBL dan pengerjaan skripsi ini.
18. Teman-teman magang di PT. Syntek Otomasi Indonesia serta PT. Haleyora Power yang memberikan dukungan serta doa kepada penulis.
19. Teman-teman mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung Angkatan 2019 dan HIMATRO telah menemani penulis dan memberikan pengalaman berharga selama perkuliahan.
20. Semua pihak yang telah membantu selama pelaksanaan pengerjaan skripsi namun tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih banyak terdapat kekurangan serta kesalahan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak demi kemajuan beresama. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan membantu bagi semua pihak.

Bandar Lampung, 8 Maret 2024

Penulis,

Hari Agus Simarmata

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	v
SURAT PERNYATAAN	vi
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Rumusan Masalah	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Hipotesis Penelitian	4
II.TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. MOTOR BLDC (<i>BRUSHLESS DIRECT CURRENT</i>)	6
2.2. Inverter	8
2.3. PWM	10
2.4. <i>GATE DRIVER</i>	11
2.5. <i>Microcontroller</i>	12
2.6. Logika <i>Fuzzy</i>	12
2.7. <i>Internet of Things</i>	15
III.METODE PENELITIAN	17
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	17
3.3 Diagram Blok Sistem <i>Hardware</i>	18
3.4 Diagram Blok Sistem <i>Software</i>	19
3.5 Alat dan Bahan	19
3.6 Perancangan Sistem.....	20

3.6.1.	Studi Literatur	20
3.6.2.	Spesifikasi Motor BLDC yang digunakan	20
3.6.3.	Perancangan Rangkaian Inverter.....	21
3.6.4.	Perancangan rangkaian <i>Gate Driver</i>	22
3.6.5.	Perancangan <i>Wiring</i> Arduino Mega 2560.....	22
3.6.6.	Perancangan <i>wiring</i> sensor kecepatan.....	23
3.6.7.	Perancangan <i>wiring</i> NodeMCU	25
3.6.8.	Perancangan pengendali Fuzzy	26
3.6.9.	Perancangan aplikasi Blynk	32
3.6.10.	Pemrograman Arduino dan NodeMCU	33
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1	Hasil Rancangan.....	34
4.1.1.	Hasil rancangan Arduino Mega	34
4.1.2.	Hasil rancangan rangkaian gate driver	35
4.1.3.	Hasil rancangan rangkaian Inverter	35
4.1.4.	Hasil Rancangan <i>Power Supply</i>	36
4.1.5.	Hasil rancangan sensor kecepatan.....	37
4.1.6.	Hasil rancangan sensor Arus	37
4.1.7.	Hasil rancangan NodeMCU	38
4.1.8.	Hasil rancangan rangkaian beban.....	38
4.1.9.	Hasil rancangan keseluruhan rangkaian.....	39
4.2.	Pengujian Hasil Rancangan.....	39
4.2.1.	Pengujian rangkaian inverter.....	39
4.2.2.	Pengujian sensor kecepatan.....	44
4.2.3.	Pengujian Sensor Arus	48
4.2.4.	Pengujian parameter kontrol Fuzzy	50
4.2.5.	Pengujian <i>software</i> Blynk	55
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1.	KESIMPULAN	57
5.2.	SARAN	57
	DAFTAR PUSTAKA	58
	LAMPIRAN.....	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Konstruksi Motor BLDC.....	6
Gambar 2. 2 Rangkain Inverter 3 fasa	8
Gambar 2. 3 Gelombang keluaran inverter 3 fasa.....	10
Gambar 2. 4 Gelombang PWM.....	10
Gambar 2. 5 Alur Sistem Fuzzy	13
Gambar 2. 6 Membership Function Kurva Linear	13
Gambar 2. 7 Membership Function kurva segitiga.....	14
Gambar 2. 8 Membership Function kurva trapesium	14
Gambar 2. 9 Skema Defuzzifikasi Mamdani	15
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian.....	17
Gambar 3. 2 Diagram perancangan perangkat keras (Hardware)	18
Gambar 3. 3 Diagram perancangan perangkat lunak (software).....	19
Gambar 3. 4 Motor BLDC yang digunakan,.....	20
Gambar 3. 5 Skema perancangan inverter 3 fasa	21
Gambar 3. 6 Rancangan Gate Driver	22
Gambar 3. 7 Perancangan wiring Arduino Mega.....	23
Gambar 3. 8 Perancangan wiring Arduino Mega dengan sensor kecepatan.....	24
Gambar 3. 9 Perancangan wiring Arduino Mega dan NodeMCU	25
Gambar 3. 10 Tampilan awal Fuzzy Logic Designer	26
Gambar 3. 11 Membership Function Setpoint	27
Gambar 3. 12 Membership Function Error	27
Gambar 3. 13 Membership Function Delay.....	28
Gambar 3. 14 Implementasi rules pada MATLAB	31
Gambar 3. 15 Tampilan implementasi dan simulasi rules MATLAB	31
Gambar 3. 16 Tampilan surface defuzzyfikasi pada matlab	32
Gambar 3. 17 Tampilan awal Blynk	32
Gambar 3. 18 Tampilan awal Arduino IDE.....	33
Gambar 4. 1 Tampilan Arduino Mega	34
Gambar 4. 2 Hasil Rancangan Gate Driver.....	35
Gambar 4. 3 Hasil Rancangan Inverter	36
Gambar 4. 4 Hasil Rancangan Power Supply	36
Gambar 4. 5 Rancangan Sensor Kecepatan LM393	37
Gambar 4. 6 Hasil Rancangan Sensor Arus ACS712	37
Gambar 4. 7 Hasil Rancangan NodeMCU	38
Gambar 4. 8 Hasil Rancangan Rangkaian Beban	38
Gambar 4. 9 Hasil Rancangan Keseluruhan Rangkaian	39
Gambar 4. 10 Grafik hubungan antara frekuensi dengan kecepatan	48
Gambar 4. 11 Grafik hubungan antara frekuensi dengan arus.....	50
Gambar 4. 12 Pengujian Blynk dengan setpoint (a). 500 RPM, (b). 700 RPM, (c). 1000 RPM, (d). 1000 RPM dengan beban	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Proses Pensaklaran inverter 3 fasa	9
Tabel 3. 1 Pin Arduino Mega untuk pensaklaran MOSFET	23
Tabel 3. 2 Pin Wiring Arduino mega untuk sensor kecepatan.....	25
Tabel 3. 3 Pin wiring Arduino Mega dan NodeMCU	26
Tabel 3. 4 Pin Wiring NodeMCU dengan modul ACS712.....	26
Tabel 3. 5 Rule Base Fuzzy Motor BLDC	28
Tabel 4. 1 Gelombang keluaran Inverter.....	40
Tabel 4. 2 Hasil pengukuran tegangan fasa inverter	43
Tabel 4. 3 Tegangan keluaran Inverter	44
Tabel 4. 4 Hasil pengukuran sensor kecepatan dengan Tachometer	45
Tabel 4. 5 Data hasil pembacaan sensor kecepatan	46
Tabel 4. 6 Perbandingan sensor kecepatan dengan Tachometer.....	47
Tabel 4. 7 Hasil pengukuran sensor Arus dan Multimeter.....	48
Tabel 4. 8 Perbandingan Sensor Arus dengan Multimeter	49
Tabel 4. 9 Grafik respon kecepatan motor BLDC tanpa Beban	51
Tabel 4. 10 Respon kecepatan motor BLDC menggunakan <i>Tools</i> Matlab.....	52
Tabel 4. 11 Respon kecepatan motor BLDC menggunakan perhitungan	52
Tabel 4. 12 Perbandingan antara simulasi <i>Tools</i> Matlab dengan perhitungan.....	53
Tabel 4. 13 Respon kecepatan motor saat berbeban	53

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan dan kemajuan teknologi berkembang sangat pesat saat ini dan berbagai inovasi baru mulai bermunculan, salah satu di antaranya di bidang pengendalian mesin-mesin listrik. Salah satu jenis mesin-mesin listrik adalah motor listrik. Semakin berkembangnya teknologi membuat mesin-mesin listrik mengalami perkembangan sering dengan kebutuhannya. Mesin listrik adalah salah satu komponen penting perannya dalam kehidupan sehari-hari, tanpa terkecuali di bidang transportasi kendaraan ramah lingkungan. Seiring semakin banyaknya pengontrolan kecepatan pada motor listrik, peran elektronika daya dalam hal pengendalian mengalami banyak kemajuan, salah satunya pengembangan komponen elektronika daya yaitu inverter. Inverter merupakan suatu perangkat elektronika daya yang memiliki kegunaan sebagai pengubah tegangan masukan berupa tegangan DC (*Direct Current*) menjadi tegangan keluaran berupa listrik AC (*Alternating Current*) dimana frekuensi keluarannya bisa diatur sesuai kebutuhan. Konversi listrik dilakukan dengan metode PWM dengan cara memodulasi gelombang keluaran menggunakan teknik penyaklaran. Dengan menggunakan metode PWM ini, besarnya frekuensi sumber dan tegangan keluaran bisa diatur sesuai dengan kebutuhan. [1] [2].

Salah satu jenis motor listrik yang cukup populer saat ini adalah motor BLDC (*Brushless Direct Current*). Motor BLDC termasuk ke dalam jenis motor AC sinkron, di mana pada motor ini membutuhkan listrik AC sebagai sumber masukannya. Berbeda dengan motor induksi, motor BLDC tetap disebut motor DC karena implementasinya sendiri, motor BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber utama yang kemudian diubah menjadi AC oleh inverter. Sesuai dengan namanya, sistem komutasi pada motor *brushless* tidak menggunakan brush dan komutator seperti pada motor DC konvensional lainnya, melainkan menggunakan rangkaian elektronika sebagai sistem komutasinya. Motor BLDC memiliki

berbagai keunggulan dibandingkan dengan motor DC lainnya yaitu, efisiensi tinggi, masa operasi lebih tinggi, perawatan yang sederhana, serta tingkat *noise* yang rendah karena putarannya yang halus.

Agar dapat digunakan, kecepatan motor BLDC harus dapat dikendalikan. Untuk dapat memutar dan mengendalikan kecepatan motor BLDC, maka kita memerlukan alat tambahan sebagai pengganti sistem komutasinya yang tanpa sikat, yaitu menggunakan elektronika daya seperti inverter dan *microcontroller*. Rangkaian elektronika daya mengkonversi energi listrik dari suatu bentuk ke bentuk lainnya menggunakan peralatan elektronik. Pengendalian kecepatan motor menggunakan sistem *closed loop* di mana kecepatan motor akan diumpun balik menggunakan sensor kecepatan. Agar kecepatan motor stabil, maka perlu mendesain kontroler. Di dalam mendesain kontroler motor BLDC akan tidak efektif dan efisien jika menggunakan metode *trial & error*. Oleh karena itu digunakan sebuah metode kendali fuzzy dalam sistem pengendalian motor BLDC. *Fuzzy logic controller* (FLC) adalah salah satu metode kontrol modern yang telah terbukti mampu untuk mengatasi masalah – masalah pada sistem yang tidak linear, yaitu dengan melakukan penyesuaian aturan-aturan Fuzzy dari data masukan dan keluaran sehingga parameter kontrol dapat diperbarui untuk mendapatkan respons dinamik yang lebih baik [4].

Motor dapat dikendalikan dan dimonitoring dari jarak jauh. Monitoring atau pemantauan kecepatan motor BLDC secara berkelanjutan dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi *Internet of Things (IoT)*. *Internet of things* adalah suatu konsep di mana suatu benda atau objek ditanamkan teknologi-teknologi seperti sensor dan *software* dengan tujuan untuk berkomunikasi, mengendalikan, menghubungkan, dan bertukar data melalui perangkat lain selama masih terhubung ke internet. Dengan *IoT*, kecepatan motor BLDC dapat dipantau dan dikendalikan dari jarak yang jauh dengan menggunakan jaringan internet. [3]

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang membahas mengenai motor listrik. Penelitian sebelumnya membahas mengenai pengendalian kecepatan motor BLDC dengan frekuensi tinggi PWM menggunakan *microcontroller*, di mana pada penelitian ini membahas sistem pengendalian motor BLDC secara *open loop*.

Penelitian ini berfokus pada pengendalian lebar pulsa frekuensi pada *duty cycle* PWM menggunakan *microcontroller* sebagai pembangkit gelombang pulsa PWM. Namun pada penelitian ini tidak terdapat suatu sistem yang dapat mengolah *output* dari keluaran kecepatan motor. Lalu pada penelitian ini tidak terdapat sistem monitoring secara *real time*.

Selanjutnya penelitian berjudul” Desain dan simulasi kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan metode *Fuzzy-PID controller* untuk aplikasi pada sepeda motor listrik.” Pada penelitian ini, penulis berhasil merancang dan mensimulasikan metode Fuzzy-PID sebagai *controller* pada motor BLDC dengan berbagai variasi perubahan beban. Penulis menyimpulkan bahwa kontrol dengan metode Fuzzy-PID mampu bekerja lebih baik daripada kontroler PID. Namun pada penelitian ini hanya mensimulasikan sistem kontroler.

Dengan penelitian tersebut, dapat menjadi latar belakang penulis dalam penelitian tentang pengendalian kecepatan pada motor BLDC dengan metode Fuzzy. Penelitian ini akan berfokus pada pengubahan sistem *open loop* pada penelitian sebelumnya yang akan diubah menjadi sistem *closed loop* sehingga output kecepatan motor BLDC dapat diolah kembali oleh sistem pengontrol agar dapat mencapai kecepatan *output* yang diinginkan. Selain itu penulis juga memiliki ide untuk menambahkan suatu sistem monitoring berbasis IoT. Sistem monitoring akan bekerja ketika motor berputar, di mana parameter yang dapat dipantau adalah kecepatan dan arus pada motor.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang sistem pengendalian dan pemantuan kecepatan motor BLDC berbasis IoT.
2. Menentukan nilai-nilai parameter kontroler *Fuzzy Logic*.
3. Melakukan pengendalian dan pemantauan kecepatan motor BLDC secara *real time* melalui aplikasi *Blynk*.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem pengendalian dan pemantuan kecepatan motor BLDC berbasis IoT?
2. Bagaimana menentukan desain kontrol *Fuzzy Logic* dalam sistem kendali motor BLDC?
3. Bagaimana melakukan pengendalian dan pemantauan kecepatan motor BLDC secara *real time* melalui aplikasi *Blynk*?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengendalikan kecepatan putar motor BLDC menggunakan inverter.
2. Menggunakan metode *Fuzzy* dalam penentuan parameter kontrol kecepatan.
3. Mengendalikan dan memantau parameter motor BLDC menggunakan *Internet of Things*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian adalah sebagai berikut:

1. Dapat mengendalikan kecepatan motor BLDC dari jarak jauh dengan sistem *Internet of Things (IoT)*.
2. Mendapatkan data real-time pengukuran tegangan, arus dan kecepatan motor BLDC dengan sistem *Internet of Things (IoT)*.
3. Mendapatkan nilai kontroler dengan metode *Fuzzy Logic*.

1.6 Hipotesis Penelitian

Kecepatan motor BLDC dapat dikendalikan dengan metode kontrol *Fuzzy Logic* berbasis sistem IoT. Untuk dapat memantau kinerja sistem motor BLDC dapat dipantau secara real-time melalui aplikasi. Hal ini dapat dijadikan referensi dalam pengendalian kecepatan motor BLDC.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada laporan ini terbagi menjadi beberapa bab sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang penelitian, tujuan penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, manfaat penelitian, hipotesis penelitian dan sistematika penulisan laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan mengenai penjelasan secara umum teori dasar yang digunakan sebagai referensi dalam penelitian.

III. METODE PENELITIAN

Bab ini berisikan tentang tahapan penelitian yang meliputi waktu, tempat, alat, bahan, spesifikasi alat, dan metode penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil dan pengolahan data serta analisa hasil penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisikan tentang kesimpulan dari penelitian dan saran untuk referensi dalam melanjutkan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. MOTOR BLDC (*BRUSHLESS DIRECT CURRENT*)

Secara umum, motor BLDC adalah motor listrik dengan jenis *synchronous*, dikarenakan kecepatan medan putar pada stator dan kecepatan putar rotor berputar pada frekuensi yang sinkron. Motor BLDC atau juga disebut *Brushless Direct Current* membutuhkan sumber masukan yaitu sumber AC 3 fasa dikarenakan motor BLDC memiliki 3 buah *coil* pada statornya. Rotor pada motor BLDC yang terdiri dari magnet permanen akan bertindak seperti magnet yang ditarik oleh perputaran medan magnet di stator. Akibatnya akan menghasilkan torsi dan motor akan berputar. Tegangan balik (*electro motive back*) akan tercipta ketika motor BLDC berputar. Tegangan ini bersumber dari terpotong-potongnya flux karena adanya perputaran rotor. Motor BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber utamanya yang kemudian diubah menjadi sumber AC oleh inverter. Pengaplikasian dari motor BLDC dapat dijumpai di mobil listrik, mesin cuci, drone dan lain-lain. Konstruksi dari motor BLDC terdiri dari rotor yang merupakan bagian yang berputar berupa medan magnet permanen yang kutubnya tetap dan stator yaitu bagian yang diam [4] [5].



Gambar 2. 1 Konstruksi Motor BLDC

Pada gambar 2.1 ditampilkan konstruksi dari motor BLDC di mana motor memiliki 12 belitan stator dan 8 magnet permanen. Agar motor BLDC dapat berputar, harus mengetahui posisi rotor yang terletak didalam motor BLDC yang digunakan untuk mengontrol belitan pada stator dimana akan dialirkan tegangan sesuai polaritasnya agar rotor bisa ditarik ataupun ditolak sehingga dapat berputar. Pada motor BLDC terdapat sebuah sensor yang berfungsi mengetahui posisi rotor didalam motor. Sensor ini bernama *hall effect sensor*, dimana sensor ini dipasang di stator. Sensor ini berjumlah 3 buah dengan posisi antar sensor memiliki perbedaan sudut 120 derajat. Pada gambar terlihat sensor H1 pada posisi $\theta = 360^0$, H2 pada posisi $\theta = 60^0$, dan H3 pada posisi $\theta = 120^0$ terhadap stator. Sensor *hall effect* memberikan keluaran dengan logika 1 saat mendeteksi kutub magnet utara dan logika 0 saat mendeteksi kutub magnet selatan. Dengan menggunakan tiga sensor *hall effect*, dihasilkan 6 kombinasi yang berbeda yang menunjukkan timing perubahan komutasi. Penggunaan motor BLDC secara kinerja biasanya digunakan untuk performa dan efisiensi yang tinggi. Salah satu ciri motor yang memiliki efisiensi tinggi dapat menghasilkan peputaran yang halus dan kontrol akselerasi dan deselerasi yang mudah. [4]

Secara umum, motor BLDC bekerja dengan menggunakan prinsip gaya tarik menarik dan tolak menolak pada magnet yang berlawanan maupun kutub yang sama. Untuk dapat beroperasi, kumparan stator perlu disuplai listrik AC 3 fasa. Untuk sumber AC dapat menggunakan inverter sebagai pengubah keluaran DC. Cara kerjanya yaitu dengan prinsip sifat magnet. Ketika terdapat magnet dengan kutub yang berbeda akan tarik menarik dan ketika kutub dengan jenis sama akan bersifat tolak menolak. [6] Dengan mengacu pada prinsip magnet tersebut maka motor BLDC dapat diciptakan. Pada motor BLDC memiliki rotor yang tersusun dari magnet permanen. Akibatnya pada motor BLDC memiliki medan magnet permanen dan medan putar masukan dari sumber 3 fasa pada belitan stator. Dengan diberikannya sumber 3 fasa pada stator, maka medan magnet dan polaritas tiap stator akan berubah setiap fasenya. Dengan polaritas yang berubah-ubah, maka terciptalah medan putar magnet pada rotor dengan kecepatan sebesar:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

Di mana f merupakan frekuensi arus input dan p adalah jumlah *pole* pada rotor. Selanjutnya arus pada motor BLDC dipengaruhi oleh nilai tegangan dan frekuensi sesuai dengan rumus:

$$V = I \times Z \quad (2.2)$$

$$I = \frac{V}{Z} \quad (2.3)$$

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (2.4)$$

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (2.5)$$

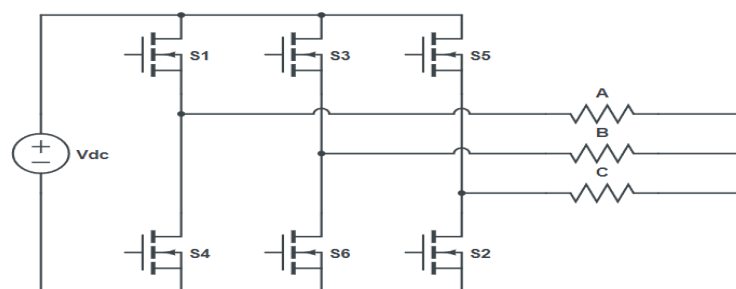
$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (2\pi f)^2}} \quad (2.6)$$

Berdasarkan rumus diatas, I merupakan arus, V adalah tegangan, R adalah hambatan, dan f yaitu frekuensi. Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai frekuensi motor, maka nilai arus yang mengalir pada motor BLDC akan semakin kecil.

2.2. Inverter

Inverter adalah rangkaian komponen elektronika yang disusun sedemikian rupa hingga membentuk suatu sistem kerja di mana fungsi utamanya mengkonversi atau mengubah tegangan masukan berupa listrik DC (*Direct Current*) menjadi keluaran listrik AC (*Alternating Current*) dengan frekuensi tertentu. Komponen utama yang terdapat didalam inverter adalah saklar (*switching*) yang bisa berupa SCR, Transistor, MOSFET hingga IGBT. Berdasarkan output yang dihasilkan, inverter dapat diklasifikasikan dalam dua jenis, yaitu inverter satu fasa dan inverter tiga fasa.

[7] [8]



Gambar 2. 2 Rangkain Inverter 3 fasa

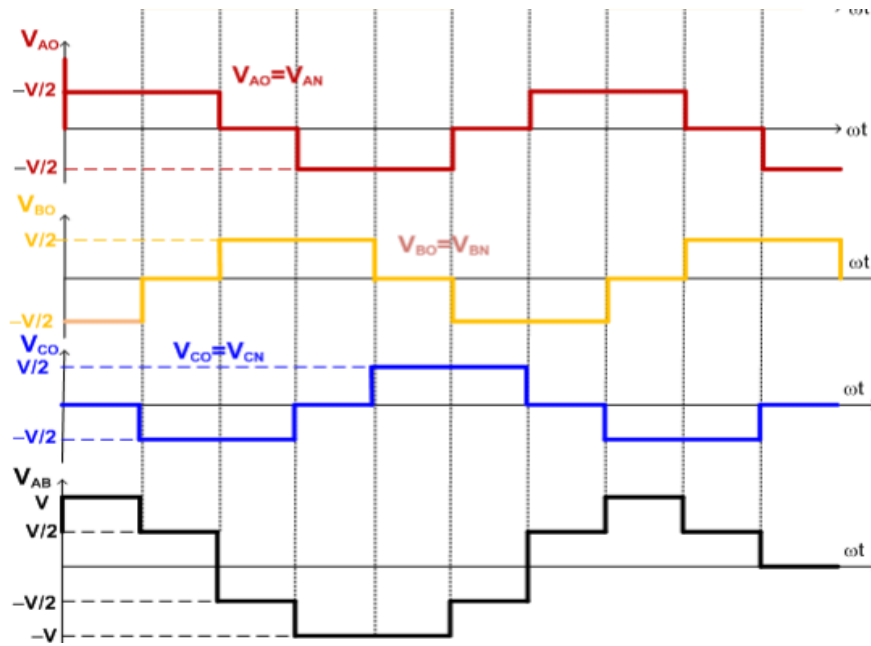
Urutan penyalaaan saklar pada inverter 3 fasa dapat mengikuti aturan sebagai berikut:

1. Saklar S1 dan S6 ON sedangkan S2, S3, S5 dan S4 OFF, sehingga arus mengalir melewati saklar 1 menuju fasa A, lalu ke fasa B kemudian mengalir melewati saklar 6 dan kembali ke sumber
2. Saklar S2 dan S1 ON sedangkan S3, S4, S5 dan S6 OFF, sehingga arus mengalir melewati saklar 1 menuju fasa A, lalu ke fasa C kemudian mengalir melewati saklar 2 dan kembali ke sumber
3. Saklar S2 dan S3 ON sedangkan S1, S4, S5 dan S6 OFF, sehingga arus mengalir melewati saklar 3 menuju fasa B, lalu ke fasa C kemudian mengalir melewati saklar 2 dan kembali ke sumber
4. Saklar S3 dan S4 ON sedangkan S1, S2, S5 dan S6 OFF, sehingga arus mengalir melewati saklar 3 menuju fasa B, lalu ke fasa A kemudian mengalir melewati saklar 4 dan kembali ke sumber
5. Saklar S4 dan S5 ON sedangkan S1, S2, S3 dan S6 OFF, sehingga arus mengalir melewati saklar 5 menuju fasa C, lalu ke fasa A kemudian mengalir melewati saklar 4 dan kembali ke sumber
6. Saklar S5 dan S6 ON sedangkan S1, S2, S3 dan S4 OFF, sehingga arus mengalir melewati saklar 5 menuju fasa C, lalu ke fasa B kemudian mengalir melewati saklar 6 dan kembali ke sumber

Skema pensaklaran serta tegangan keluaran inverter ditampilkan pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Proses Pensaklaran inverter 3 fasa

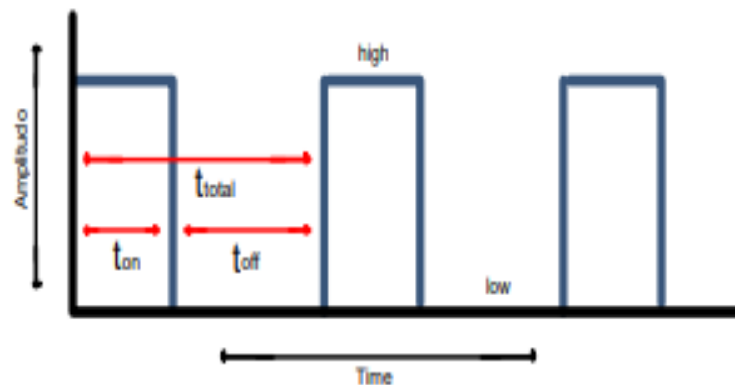
Interval	Rentang Sudut	Saklar ON	Tegangan Per Fasa			Tegangan Antarfasa		
			Va	Vb	Vc	Vab	Vbc	Vca
1	0-60	1,6	+V/2	-V/2	0	+V	-V/2	-V/2
2	60-120	1,2	+V/2	0	-V/2	+V/2	+V/2	-V
3	120-180	2,3	0	+V/2	-V/2	-V/2	+V	-V/2
4	180-240	3,4	-V/2	+V/2	0	-V	+V/2	+V/2
5	240-300	4,5	-V/2	0	+V/2	-V/2	-V/2	+V
6	300-360	5,6	0	-V/2	+V/2	+V/2	-V	+V/2



Gambar 2. 3 Gelombang keluaran inverter 3 fasa

2.3. PWM

PWM (*Pulse width Modulation*) adalah suatu metode modulasi sinyal, yaitu dengan membandingkan sinyal referensi dan sinyal *carrier* sehingga akan menghasilkan sinyal kotak dengan lebar pulsa yang berbeda. Lebar pulsa gelombang kotak dapat diatur dengan *duty cycle*. *Duty cycle* merupakan presentasi periode sinyal kotak *high* dengan periode sinyal *low*. Perbandingan *duty cycle* akan berbanding lurus dengan tegangan rata-rata yang dihasilkan. Sinyal PWM memiliki lebar pulsa yang beragam sesuai dengan pengaturan *duty cycle*. [9]



Gambar 2. 4 Gelombang PWM

Gambar 2.4 menjelaskan bagaimana bentuk umum dari sinyal PWM. Pada gambar terdapat beberapa variabel berupa t_{on} yaitu waktu tegangan berada pada posisi *high* (logika 1) dan t_{off} yaitu waktu ketika tegangan berada pada posisi *low* (logika 0). T_{total} adalah jumlah waktu on dan off dalam satu periode penuh, dapat dirumuskan:

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \quad (2.7)$$

Besarnya *duty cycle* dapat ditentukan dari t_{on} dan t_{off} , yaitu dengan membandingkan antara waktu ketika *on* dengan waktu total, sehingga *duty cycle* dapat dirumuskan:

$$Duty\ cycle: \frac{T_{on}}{T_{total}} \times 100\% \quad (2.8)$$

Untuk menentukan waktu kerja dari saklar, *duty cycle* berfungsi sebagai pulsa yang memberikan sudut penyalaan dan mengontrol dalam keadaan *high* atau *low*. Untuk membangkitkan sunyal PWM terdapat beberapa metode yaitu dengan komponen digital dan komponen analog. Untuk komponen analog menggunakan perangkat elektronika, lalu untuk komponen digital menggunakan rangkaian terpadu yang didalamnya tersusun beberapa processor seperti mikrokontroller dan digital *signal processor*. [10]

2.4. GATE DRIVER

Gate driver merupakan suatu rangkaian penguat tegangan yang mendapatkan tegangan input yang kecil dari sebuah kontroler dan menghasilkan tegangan output yang lebih besar, sehingga tegangan input dapat diteruskan ke rangkaian yang memiliki komponen utama seperti MOSFET, SCR atau IGBT. *Gate driver* dapat digunakan untuk rangkaian konversi daya seperti *rectifier*, inverter dan *boostconverter*. *Integrated Circuit (IC)* merupakan sebuah perangkat elektronika yang berfungsi sebagai gerbang logika untuk mengendalikan rangkaian elektronik. *IC* merupakan komponen utama pada *gate driver* sekaligus pengendali proses *switching* pada MOSFET.

2.5. *Microcontroller*

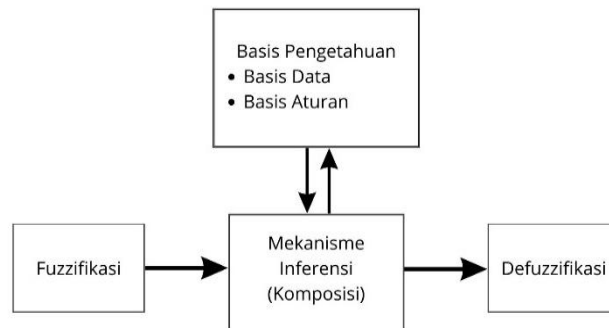
Microcontroller adalah sebuah sistem komputer yang dirangkai dalam sebuah chip IC. Fungsi dari *microcontroller* adalah sebagai pengendali yang mengatur jalannya kerja dari suatu rangkaian elektronik. Di dalam suatu rangkaian *microcontroller* terdapat CPU, *memory*, *timer*, saluran komunikasi serial dan *parallel*, *port I/O*, *ADC* dan lain-lain. Sehingga kita hanya perlu menanamkan kode pemrograman kedalam ROM *microcontroller*. *Microcontroller* merupakan sistem komputer yang mempunyai satu atau beberapa tugas yang sangat spesifik, berbeda dengan PC (*Personal Computer*) yang memiliki beragam fungsi. Kemudian perbedaan lainnya yaitu perbandingan RAM dan ROM yang sangat berbeda antara PC dan *microcontroller*. Sejak tahun 1996, *microcontroller* sudah mengalami perkembangan yang cukup pesat dengan beragam macam tipe *microcontroller* dengan AVR (*Advanced Versatile RISC*) yang merupakan *processor* pada rangkaian elektronika. Atmega 2560 merupakan salah satu jenis *microcontroller*, dan salah satu tipe nya yaitu Arduino Atmega 2560 [6].

2.6. Logika *Fuzzy*

Konsep logika *Fuzzy* pertama kali dikenalkan pada tahun 1965 oleh L.A. Zadeh dari universitas California Berkeley dalam makalah seminarnya yang berjudul “*Fuzzy Set*”. Pada konsep logika *Fuzzy* harga kebenaran diberikan dalam variabel bahasa (linguistik) dengan menyertakan sifat kekaburan (*fuzziness*) pada proposisinya. Harga kebenaran dan derajat kekaburan pada variabel linguistik dapat dinyatakan dengan tolak ukur, misalnya agak, cukup, sangat, dan sebagainya. Sehingga dalam logika *Fuzzy* memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1. Ini yang membedakan antara logika *Fuzzy* dan logika *Boolean* yang nilai keanggotaannya hanya 0 dan 1 [6].

Sistem kontrol *Fuzzy* merupakan pemetaan dari masukan menjadi keluaran *Fuzzy*. Secara umum sistem kontrol *Fuzzy* terdiri dari empat bagian dasar yaitu fuzifikasi, aturan basis (*Rule Base*), inferensi *Fuzzy*, dan defuzifikasi. Proses pada sistem kontrol *Fuzzy* dimulai dari nilai masukkan *Fuzzy* diubah menjadi himpunan *Fuzzy* melalui proses fuzifikasi. Selanjutnya himpunan *Fuzzy* masuk ke mekanisme inferensi *Fuzzy* untuk menentukan kesimpulan *Fuzzy* dengan mengacu pada *rule*

base. Proses akhir masuk ke proses defuzzifikasi untuk diubah menjadi keluaran Fuzzy.

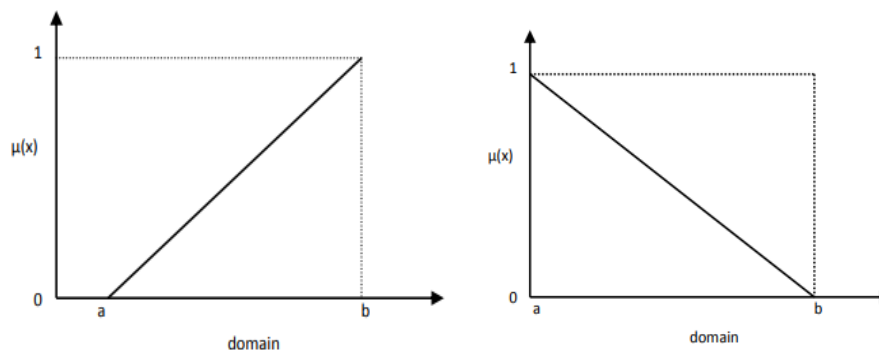


Gambar 2. 5 Alur Sistem Fuzzy

Didalam mengaplikasikan logika fuzzy, terlebih dahulu harus menentukan fungsi keanggotaan (*membership function*). Fungsi keanggotaan adalah kurva representasi yang menunjukkan pemetaan point-point input data kedalam nilai keanggotaannya. Didalam Logika Fuzzy MAMDANI terdapat beberapa jenis kurva derajat keanggotaan yaitu sebagai berikut:

1. Kurva Linear

Pada dasarnya kurva linear merupakan kurva yang digambarkan kedalam bentuk paling sederhana yaitu garis lurus. Didalam logika fuzzy terdapat dua jenis kurva linear yaitu kurva linear naik dan kurva linear turun.

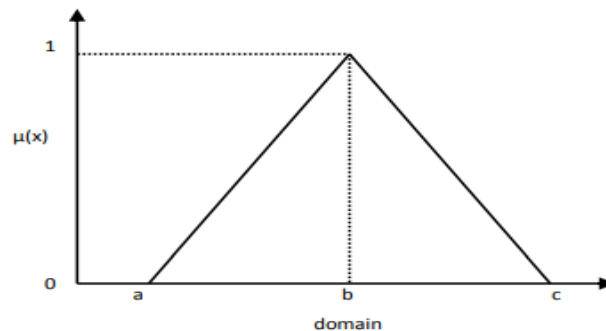


Gambar 2. 6 *Membership Function* Kurva Linear

Pada kurva linear naik, kenaikan himpunan nilai domain yang dimulai dari nol (0) bergerak kekanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan yang semakin tinggi (representasi fungsi linear naik). Lalu pada kurva linear turun himpunan bergerak kekanan yang dimulai dari titik $y < 1$ hingga mencapai titik nol pada sumbu x.

2. Kurva segitiga

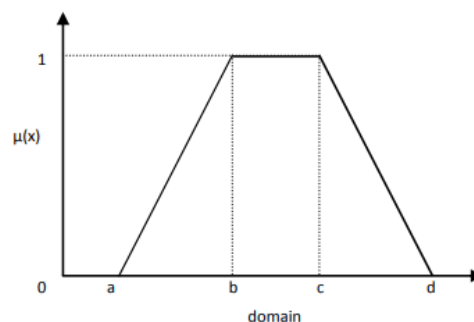
Pada fungsi kurva segitiga hanya terdapat satu nilai x yang memiliki derajat keanggotaan yang sama dengan dengan 1 yaitu ketika $x=b$. namun nilai-nilai disekitar b memiliki derajat keanggotaan yang turun cukup tajam menjauhi 1. Pada dasarnya fungsi segitiga merupakan gabungan antara dua fungsi yaitu fungsi linear naik dan fungsi linear turun.



Gambar 2. 7 Membership Function kurva segitiga

3. Kurva trapesium

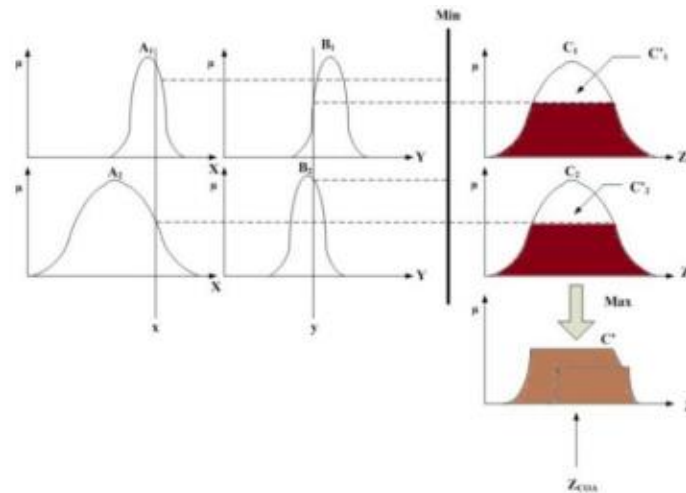
Pada kurva trapesium pada dasarnya merupakan gabungan antara kurva linear naik dan turun serta kurva garis horizontal yang memiliki nilai keanggotaan 1.



Gambar 2. 8 *Membership Function* kurva trapesium

Setelah pembentukan himpunan fuzzy, tahapan selanjutnya adalah penggunaan fungsi implikasi. Fungsi implikasi yang digunakan adalah min. Lalu proses selanjutnya adalah penarikan kesimpulan atau komposisi aturan. Tidak seperti penalaran monoton, apabila sistem terdiri dari beberapa aturan, maka inferensi diperoleh dari kumpulan dan korelasi antar aturan. Ada 3 (tiga) metode yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem fuzzy, yaitu *max*, *additive* and

probabilistic OR atau PROBOR. Selanjutnya pada tahapan defuzzifikasi, dapat dilakukan dengan metode *Centroid*, *Bisektor*, *Mean of Maximum*, *Largest of Maximum* atau *Smallest of Maximum*. Ilustrasi sistem fuzzy model Mamdani dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Skema Defuzzifikasi Mamdani

2.7. Internet of Things

Internet of things adalah suatu konsep di mana suatu benda atau objek ditanamkan teknologi-teknologi seperti sensor dan *software* dengan tujuan untuk berkomunikasi, mengendalikan, menghubungkan, dan bertukar data melalui perangkat lain selama masih terhubung ke internet. [12]. Internet of Things (IoT), atau dalam bahasa Indonesia dikenal sebagai "*Internet of Things*" atau "IoT," adalah konsep teknologi yang telah mengubah cara kita berinteraksi dengan dunia di sekitar kita. Ini merupakan revolusi besar dalam dunia teknologi yang telah memungkinkan objek dan perangkat sehari-hari untuk terhubung ke internet, berbagi data, dan berkomunikasi satu sama lain. IoT telah menciptakan kemungkinan baru di berbagai sektor, termasuk rumah pintar, perawatan kesehatan, transportasi, manufaktur, pertanian, dan lain lain.

Struktur *Internet of Things* terdiri dari beberapa perangkat yang saling terhubung satu sama lain, dimana perangkat ini saling bekerja sama dalam mengumpulkan data, mentransmisikan data, menganalisis informasi dan mengambil tindakan berdasarkan informasi yang ditangkap.

1. Perangkat Sensor, sebagai pendeteksi dan pengukur informasi.

2. Komunikasi, berfungsi untuk mentransmisikan data yang dikumpulkan oleh sensor ke Platform IoT untuk pengolahan lebih lanjut.
3. Platform IoT, merupakan pusat pengolahan data yang diterima dari perangkat sensor.
4. Pengolahan Data, meliputi analisis, penggabungan data, dan penerapan algoritma tertentu untuk mendapatkan output.
5. Manajemen Perangkat.
6. Aplikasi dan Antarmuka pengguna.

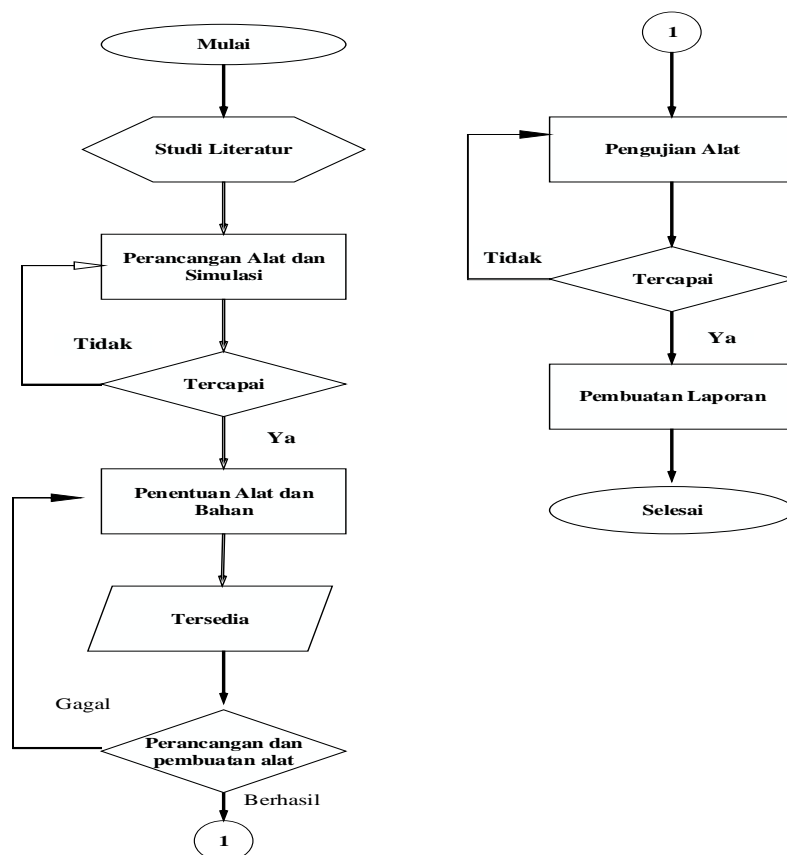
III.METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian akan dilaksanakan di Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung. Untuk waktu pelaksanaan penelitian ini yaitu dimulai dari bulan Febuari hingga Juli 2023.

3.2 Diagram Alir Penelitian

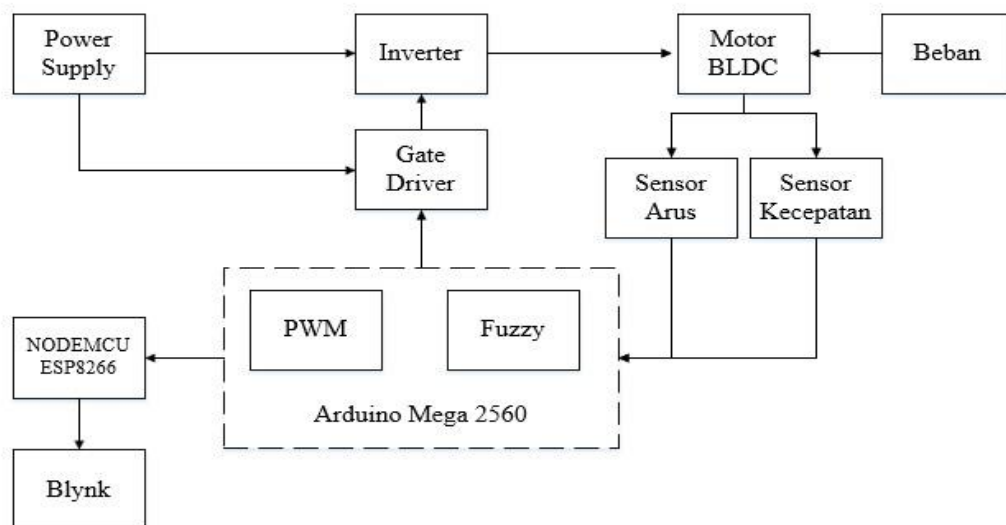
Pada tahap ini, penulis membuat rancangan diagram alir dari penelitian. Tahapan tahapan yang dilakukan terdiri dari studi literatur, perancangan alat dan simulasi, penentuan alat dan bahan, perancangan alat dan sistem, pengujian alat dan pembuatan laporan.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3.3 Diagram Blok Sistem *Hardware*

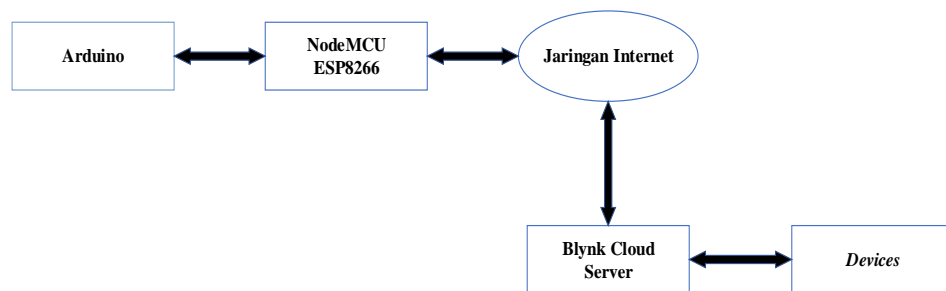
Pada perancangan *hardware*, sumber tegangan berasal dari baterai. Baterai akan mensuplai tegangan untuk inverter dan *gate driver*. Tegangan DC pada baterai akan dikonversi menjadi tegangan AC oleh inverter. Untuk mengatur pensaklaran MOSFET digunakan PWM yang berasal dari Arduino Mega 2560 yang kemudian akan diteruskan ke *gate drive*. *Gate driver* akan menaikkan tegangan yang dikeluarkan oleh Arduino sehingga bisa membuat MOSFET bekerja. Tegangan AC yang telah dihasilkan inverter selanjutnya akan dialirkan menuju motor BLDC. Ketika motor BLDC bekerja, maka sensor tegangan dan arus akan mendeteksi nilai arus dan tegangan pada masing masing fasa pada motor BLDC. Lalu pada sensor kecepatan akan mendeteksi kecepatan putar motor BLDC dengan pembacaan encoder. Pengaturan kecepatan motor akan dilakukan dengan sistem *closed loop* dimana kecepatan motor akan diumpun balikkan oleh sensor kecepatan. Dengan bantuan kontrol Fuzzy yang sudah diatur pada Arduino mega 2560, maka Fuzzy akan mengatur sinyal PWM untuk mendapatkan respon yang optimal dan mengurangi error pada saat pengaturan kecepatan putar motor. Keluaran dari sensor arus dan kecepatan yang terukur di Arduino akan diteruskan oleh *Module Wifi* ESP8266 yang sudah terhubung ke internet untuk dikirim ke *cloud server* aplikasi *Blynk*. Lalu pada aplikasi *Blynk*, kecepatan putaran motor dapat dipantau dan dikendalikan.



Gambar 3. 2 Diagram perancangan perangkat keras (*Hardware*)

3.4 Diagram Blok Sistem *Software*

Pada diagram perancangan perangkat lunak, pengaturan kecepatan dapat dilakukan melalui *device smartphone*. Aplikasi yang digunakan yaitu *Blynk*, dimana aplikasi ini akan terhubung ke *Blynk Cloud Server*. Untuk melakukan kendali pada *smartphone* membutuhkan jaringan internet yang akan mentransfer data kontrol menuju NodeMCU. kemudian NodeMCU akan mengirimkan perintah ke mikrokontroller untuk diolah.



Gambar 3. 3 Diagram perancangan perangkat lunak (*software*)

3.5 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini menggunakan dua jenis perangkat yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Untuk perangkat kerasnya antara lain:

1. Motor BLDC 12 V
2. Rangkaian catu daya (power supply) 12 Volt 20 Ampere
3. Rangkaian Gate Driver
4. Inverter DC-AC (3 Phasa)
5. Mikrokontroller Arduino Mega 2560 dan NodeMCU ESP8266
6. Model Sensor Arus ACS712
7. Sensor Kecepatan LM393
8. Laptop
9. Osiloskop Digital
10. Multimeter Digital

Perangkat Lunak (*Software*) yang digunakan adalah

1. Arduino IDE
2. EasyEda
3. Solidwork
4. Blynk
5. Matlab R2017A
6. Microsoft Office

3.6 Perancangan Sistem

Pada tahapan perancangan sistem terdiri dari studi literatur, spesifikasi motor BLDC yang digunakan, perancangan rangkaian inverter 3 fasa, perancangan rangkaian *gate driver*, perancangan *wiring* Arduino Mega, perancangan *wiring* sensor kecepatan dan arus, perancangan *wiring* NodeMCU, penentuan parameter *control* Fuzzy, perancangan rangkaian beban serta perancangan aplikasi pada *smartphone*.

3.6.1. Studi Literatur

Pada tahap studi literatur, penulis mengumpulkan banyak referensi berupa buku atau jurnal sebelumnya yang berhubungan dengan penelitian ini sebagai acuan dalam melakukan penelitian. Tujuan melakukan studi literatur agar penulis dapat memahami penelitian yang akan dilakukan.

3.6.2. Spesifikasi Motor BLDC yang digunakan

Penelitian ini menggunakan motor BLDC 3 fasa dengan tipe X2212/980KV sebagai objek/ *plant* yang dikontrol.



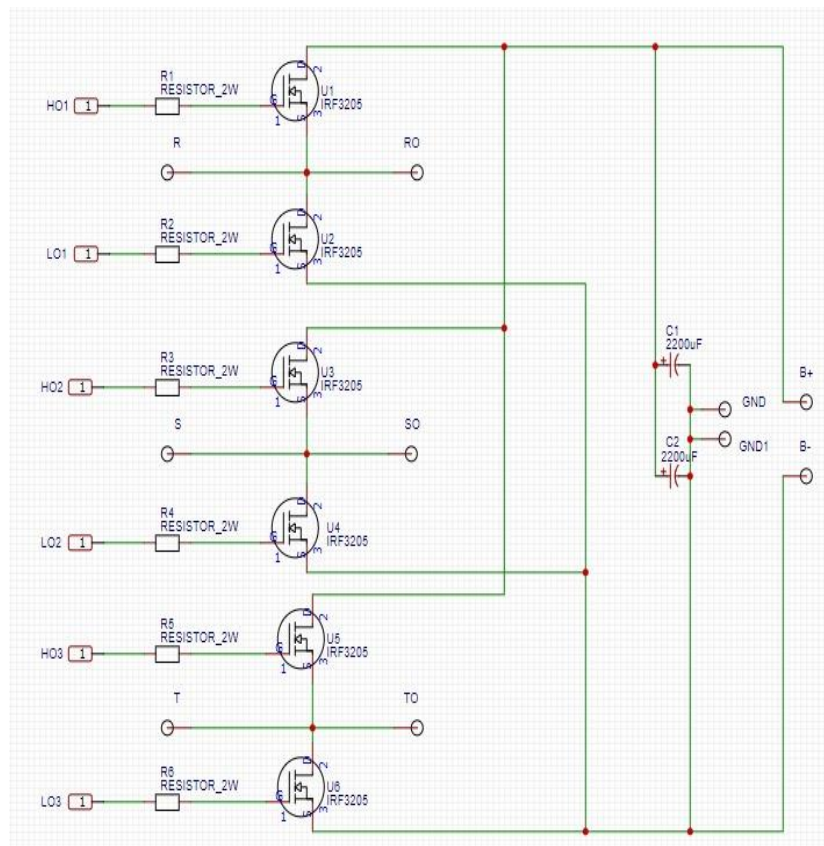
Gambar 3. 4 Motor BLDC yang digunakan,

Motor BLDC dengan tipe X2212/980KV memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. Jenis motor: *Motor Brushless* 3 fasa
2. Rating tegangan: 11,1 - 16,5 Volt
3. Rating Daya: 412 Watt
4. Rating Arus: 25 Ampere
5. Rating KV: 980 KV
6. Resistansi Motor: 100m Ω
7. Jumlah rotor: 14

3.6.3. Perancangan Rangkaian Inverter

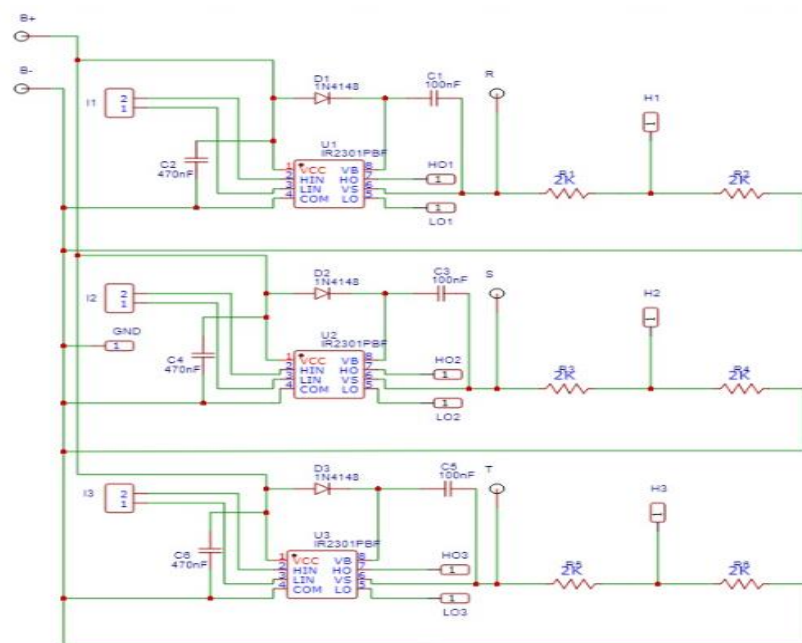
Jenis inverter yang dirancang pada penelitian ini adalah voltage source inverter dengan mode konduksi 120⁰. Pada rangkaian inverter tersusun atas beberapa komponen berupa mosfet IRF3205, kapasitor ELCO 3300 μ F, resistor 100 Ω . Komponen -komponen tersebut disusun seperti gambar 3.5.



Gambar 3. 5 Skema perancangan inverter 3 fasa

3.6.4. Perancangan rangkaian *Gate Driver*

Fungsi gate driver adalah sebagai penguat tegangan dari Arduino menuju inverter. Tegangan keluaran Arduino sebesar 5V masih belum mampu untuk menjalankan MOSFET. Besarnya tegangan yang diperlukan untuk mengaktifkan MOSFET yaitu 12 Volt. Pada penelitian ini, rangkaian gate driver terdiri dari beberapa komponen yaitu IC IR2301, resistor $1K\Omega$, resistor $2K\Omega$, dioda 1N4007, kapasitor Mylar 100nF, kapasitor Mylar 470nF. Komponen disusun seperti gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Rancangan Gate Driver

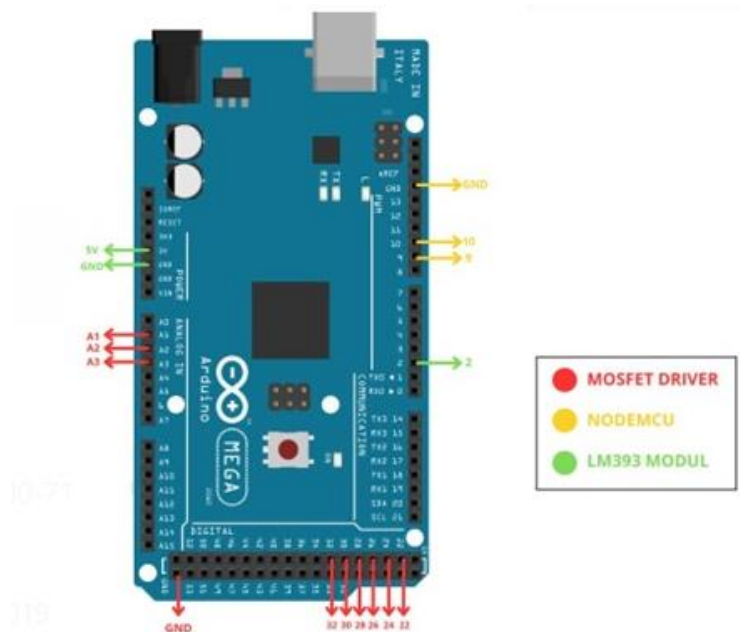
3.6.5. Perancangan *Wiring Arduino Mega 2560*

Pada penelitian ini menggunakan board mikrokontroler Arduino mega 2560. Alasan penggunaan board ini yaitu jumlah pin yang banyak serta penyimpanan yang besar sehingga tepat untuk diaplikasikan pada *gate driver*, NodeMCU serta sensor yang membutuhkan penyimpanan dan lubang pin yang banyak pada *board* mikrokontroler. Rangkaian *gate driver* dihubungkan dengan pin 22, 24, 26, 28, 30, 32, A1, A2 dan A3. Kemudian untuk modul NodeMCU dihubungkan dengan pin 9 dan 10.

Pin Arduino mega yang digunakan sebagai pin *switching* pada MOSFET dapat dilihat pada tabel 3.1:

Tabel 3. 1 Pin Arduino Mega untuk pensaklaran MOSFET

Pin Arduino Mega	Saklar
22	MOSFET 1
24	MOSFET 4
26	MOSFET 3
28	MOSFET 5
30	MOSFET 6
32	MOSFET 2



Gambar 3. 7 Perancangan *wiring* Arduino Mega

3.6.6. Perancangan *wiring* sensor kecepatan

Pada penelitian ini untuk pembacaan kecepatan menggunakan modul LM393 sebagai sensor kecepatan. Sensor kecepatan dihubungkan ke pin 2, pin 5 V serta pin GND. Modul ini menghasilkan data berupa pulsa on dan off sehingga pulsa ini perlu dikonversi agar bisa menghasilkan nilai kecepatan. Modul ini harus menggunakan piringan encoder sebagai objek pembacaan sensor. Sensor terdiri dari

transmitter dan *receiver*, di mana ketika terdapat objek diantara *transmitter* dan *receiver* maka sensor akan menghasilkan pulsa on. Dan sebaliknya, ketika tidak terdapat objek diantara *transmitter* dan *receiver* maka sensor akan menghasilkan pulsa off. Selanjutnya pulsa on dan off tersebut akan dikonversi oleh Arduino sehingga menghasilkan nilai kecepatan. Cara yang digunakan untuk mengubah nilai pulsa menjadi nilai kecepatan ditunjukkan pada persamaan 3.1:

$$n = \frac{P}{H} \times \frac{60}{t} \quad (3.1)$$

Dimana:

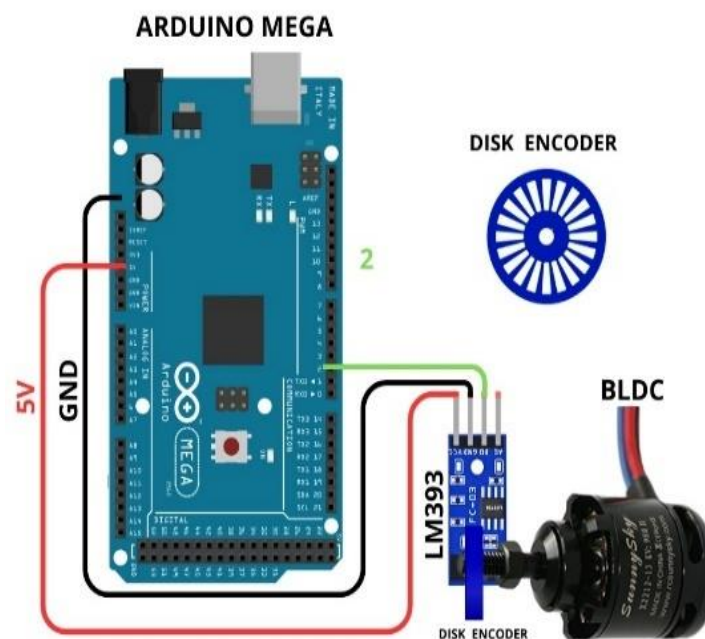
n = Kecepatan (RPM)

P = Jumlah pulsa yang dihasilkan sensor

H = Jumlah lubang pada *disk encoder*

t = Waktu *sampling* (detik)

Perancangan *wiring* sensor kecepatan pada Arduino mega ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3. 8 Perancangan *wiring* Arduino Mega dengan sensor kecepatan

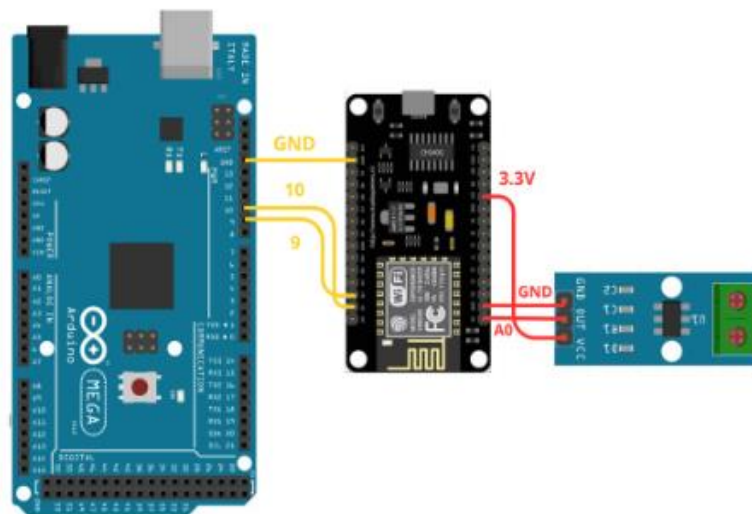
Pin *wiring* sensor kecepatan dapat dilihat pada tabel tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Pin *Wiring* Arduino mega untuk sensor kecepatan

Pin Modul LM393	Pin Arduino Mega
VCC	5V
GND	GND
D0	2

3.6.7. Perancangan *wiring* NodeMCU

NodeMCU adalah salah satu jenis mikrokontroler berbasis jaringan. Jenis NodeMCU yang digunakan pada penelitian ini tipe ESP8622. NodeMCU berfungsi sebagai penghubung antara Arduino Mega dengan smartphone agar bisa saling berkomunikasi melalui koneksi internet. Antara Arduino dan NodeMCU terjadi komunikasi dua arah yaitu untuk kontrol dan monitoring. Pada NodeMCU, pin D1 dan D2 dipakai sebagai komunikasi serial dengan Arduino Mega. Lalu pada pin 9 dan 10 Arduino akan dihubungkan dengan pin D1 dan D2 pada NodeMCU. Modul NodeMCU juga akan dihubungkan dengan modul sensor ACS712 sebagai sensor arus, di mana pada NodeMCU menggunakan pin A0, 3,3V dan GND. Adapun perancangan *wiring* NodeMCU dengan Arduino Mega dan Modul ACS712 pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Perancangan *wiring* Arduino Mega dan NodeMCU

Pin *wiring* NodeMCU dengan Arduino Mega dapat dilihat pada tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Pin *wiring* Arduino Mega dan NodeMCU

Pin NodeMCU	Pin Arduino Mega
D1	9
D2	10
G	GND

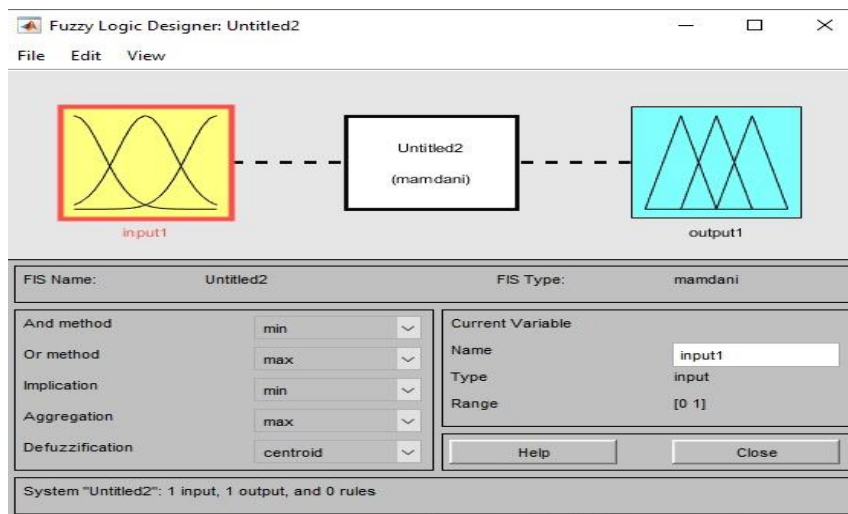
Lalu pin *wiring* NodeMCU dengan modul ACS712 terdapat pada tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Pin *Wiring* NodeMCU dengan modul ACS712

Pin NodeMCU	Pin Modul ACS712
3V	VCC
G	GND
A0	OUT

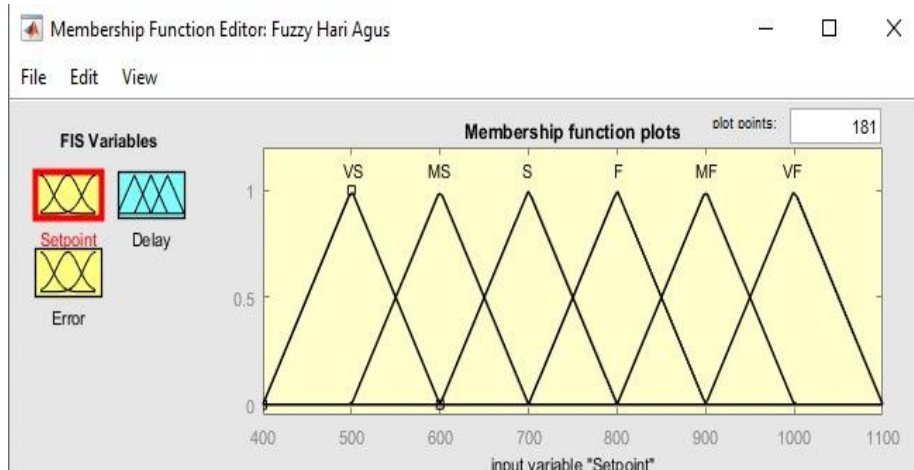
3.6.8. Perancangan pengendali Fuzzy

Pada penelitian ini, perancangan pengendali fuzzy dilakukan pada aplikasi MATLAB. Untuk mendesain kontrol fuzzy dapat dilakukan pada menu *APPS*, kemudian memilih opsi *CONTROL SYSTEM DESIGN AND ANALYSIS*, dan pilih opsi *Fuzzy Logic Designer*.



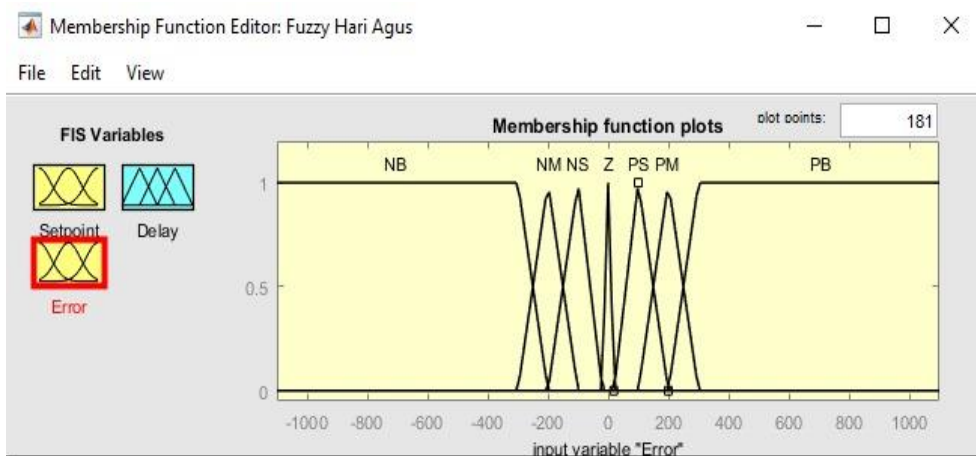
Gambar 3. 10 Tampilan awal *Fuzzy Logic Designer*

Adapun pada tahap *fuzzyfikasi*, *input fuzzy* yang digunakan berupa *setpoint* dan *error*. Pada *input setpoint* menggunakan *Triangular Membership Function* yang terdiri dari 6 *membership function* yaitu *Very Slow* [400 500 600], *Medium Slow* [500 600 700], *Slow* [600 700 800], *Fast* [700 800 900], *Medium Fast* [800 900 1000] dan *Very Fast* [900 1000 1100]. Berikut adalah tampilan *input setpoint* pada *software Matlab*.



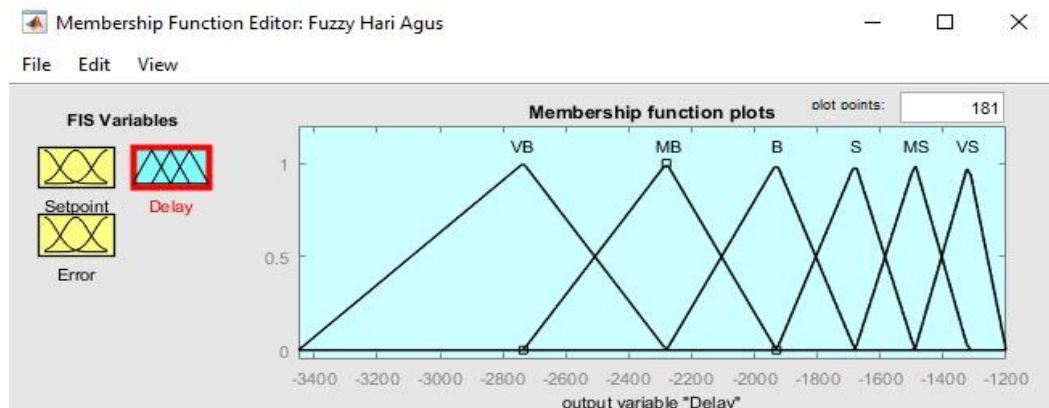
Gambar 3. 11 *Membership Function Setpoint*

Lalu *input* selanjutnya berupa *Error*. Pada *input error* menggunakan *Triangular* dan *Trapezium Membership Function* yang terdiri dari 7 *membership Function* yaitu *Negative Big* [-1100 -1100 -300 -200], *Negative Medium* [-300 -200 -100], *Negative Small* [-200 -100 -19], *Zero* [-20 0 20], *Positive Small* [19 100 200], *Positive Medium* [100 200 300] dan *Positive Big* [200 300 1100 1100]. Berikut adalah tampilan *input error* pada *software Matlab*.



Gambar 3. 12 *Membership Function Error*

Lalu untuk *output* fuzzy terdiri dari satu *membership function* yaitu *delay*. Pada *output delay* menggunakan *Triangular Membership Function* yang terdiri dari 6 *membership function* yaitu *Very Big* [-3450 -2735 -2280], *Medium Big* [-2735 -2280 -1930], *Big* [-2280 -1930 -1680], *Small* [-1930 -1680 -1490], *Medium Small* [-1680 -1490 -1320] dan *Very Small* [-1490 -1320 -1200]. Berikut adalah tampilan *output Delay* pada *software* Matlab.



Gambar 3. 13 *Membership Function Delay*

Pada rancangan pengendali Fuzzy dilakukan dengan merancang *inferensi* fuzzy atau *fuzzy rule base system*. Prosedur *inferensi* digunakan untuk menarik kesimpulan dari himpunan aturan fuzzy. Pada penelitian ini menggunakan metode *inferensi* Mamdani dengan fungsi keanggotaan keluaran berupa nilai tegas yaitu *delay*. Aturan-aturan fuzzy dinyatakan dalam bentuk logika *IF-THEN*. Selanjutnya pada tahap *defuzzyfikasi* yaitu dengan menggunakan metode *Center of Area* dimana hasil *defuzzyfikasi* akan digunakan untuk mengatur frekuensi keluaran pada inverter. Adapun *rule base* yang dirancang dapat dilihat pada tabel 3.5.

Tabel 3. 5 *Rule Base Fuzzy Motor BLDC*

SP/E	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
VS	S	B	MB	VB	VB	VB	VB
MS	VB	VB	VB	MB	B	S	S
S	VB	VB	MB	B	S	MS	MS
F	VB	MB	B	S	MS	MS	VS
MF	MB	B	S	MS	VS	VS	VS
VF	B	S	MS	VS	VS	VS	VS

Keterangan:

VS= Very Slow

NB= Negative Big

MS= Medium Slow

NM= Negative Medium

S= Slow

NS= Negative Small

F= Fast

Z= Zero

MF= Medium Fast

PS= Positive Small

VF= Very Fast

PM= Positive Medium

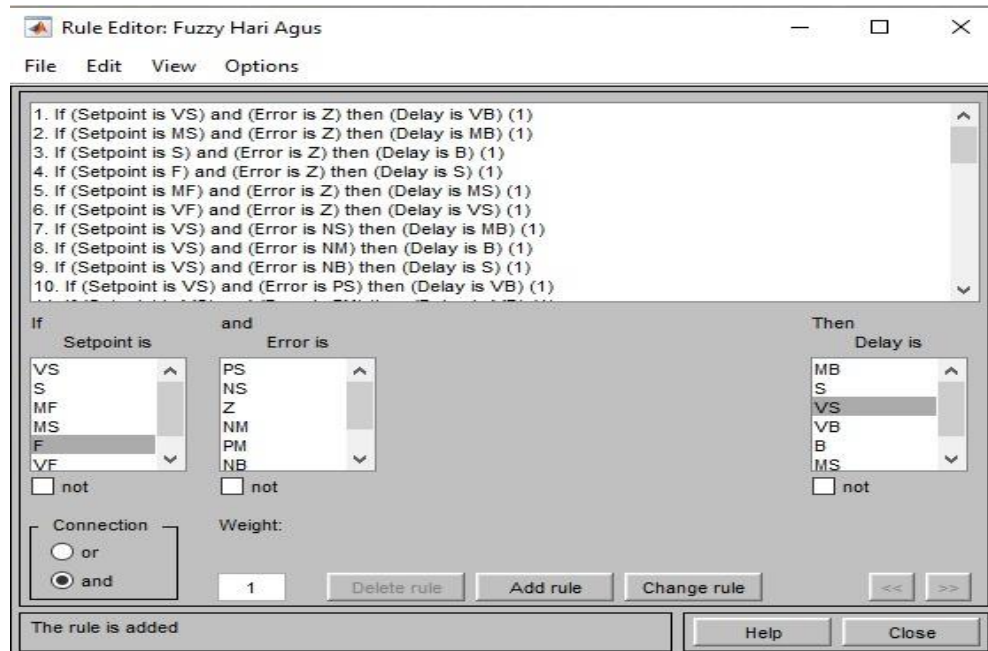
PB= Positive Big

Berikut adalah *knowledge base fuzzy* pada penelitian ini:

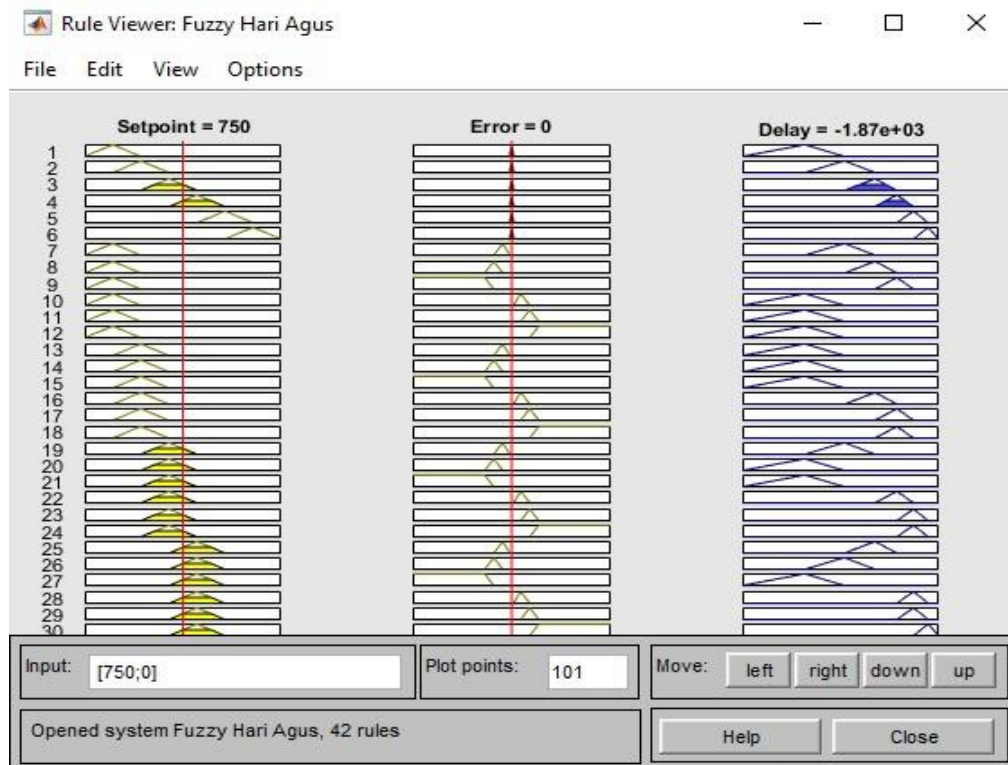
1. *If Setpoint is VS and Error is NB Then Delay is S*
2. *If Setpoint is VS and Error is NM Then Delay is B*
3. *If Setpoint is VS and Error is NS Then Delay is MB*
4. *If Setpoint is VS and Error is Z Then Delay is VB*
5. *If Setpoint is VS and Error is PS Then Delay is VB*
6. *If Setpoint is VS and Error is PM Then Delay is VB*
7. *If Setpoint is VS and Error is PB Then Delay is VB*
8. *If Setpoint is MS and Error is NB Then Delay is VB*
9. *If Setpoint is MS and Error is NM Then Delay is VB*
10. *If Setpoint is MS and Error is NS Then Delay is VB*
11. *If Setpoint is MS and Error is Z Then Delay is MB*
12. *If Setpoint is MS and Error is PS Then Delay is B*
13. *If Setpoint is MS and Error is PM Then Delay is S*
14. *If Setpoint is MS and Error is PB Then Delay is S*
15. *If Setpoint is S and Error is NB Then Delay is VB*
16. *If Setpoint is S and Error is NM Then Delay is VB*
17. *If Setpoint is S and Error is NS Then Delay is MB*
18. *If Setpoint is S and Error is Z Then Delay is B*

19. *If Setpoint is S and Error is PS Then Delay is S*
20. *If Setpoint is S and Error is PM Then Delay is MS*
21. *If Setpoint is S and Error is PB Then Delay is MS*
22. *If Setpoint is F and Error is NB Then Delay is VB*
23. *If Setpoint is F and Error is NS Then Delay is MB*
24. *If Setpoint is F and Error is NM Then Delay is B*
25. *If Setpoint is F and Error is Z Then Delay is S*
26. *If Setpoint is F and Error is PS Then Delay is MS*
27. *If Setpoint is F and Error is PM Then Delay is MS*
28. *If Setpoint is F and Error is PB Then Delay is VS*
29. *If Setpoint is MF and Error is NB Then Delay is MB*
30. *If Setpoint is MF and Error is NS Then Delay is B*
31. *If Setpoint is MF and Error is NM Then Delay is S*
32. *If Setpoint is MF and Error is Z Then Delay is MS*
33. *If Setpoint is MF and Error is PS Then Delay is VS*
34. *If Setpoint is MF and Error is PM Then Delay is VS*
35. *If Setpoint is MF and Error is PB Then Delay is VS*
36. *If Setpoint is VF and Error is NB Then Delay is B*
37. *If Setpoint is VF and Error is NS Then Delay is S*
38. *If Setpoint is VF and Error is NM Then Delay is MS*
39. *If Setpoint is VF and Error is Z Then Delay is VS*
40. *If Setpoint is VF and Error is PS Then Delay is VS*
41. *If Setpoint is VF and Error is PM Then Delay is VS*
42. *If Setpoint is VF and Error is PB Then Delay is VS*

Gambar 3.14 adalah tampilan pengimplementasian beserta simulasi *rules* fuzzy pada *software* MATLAB.

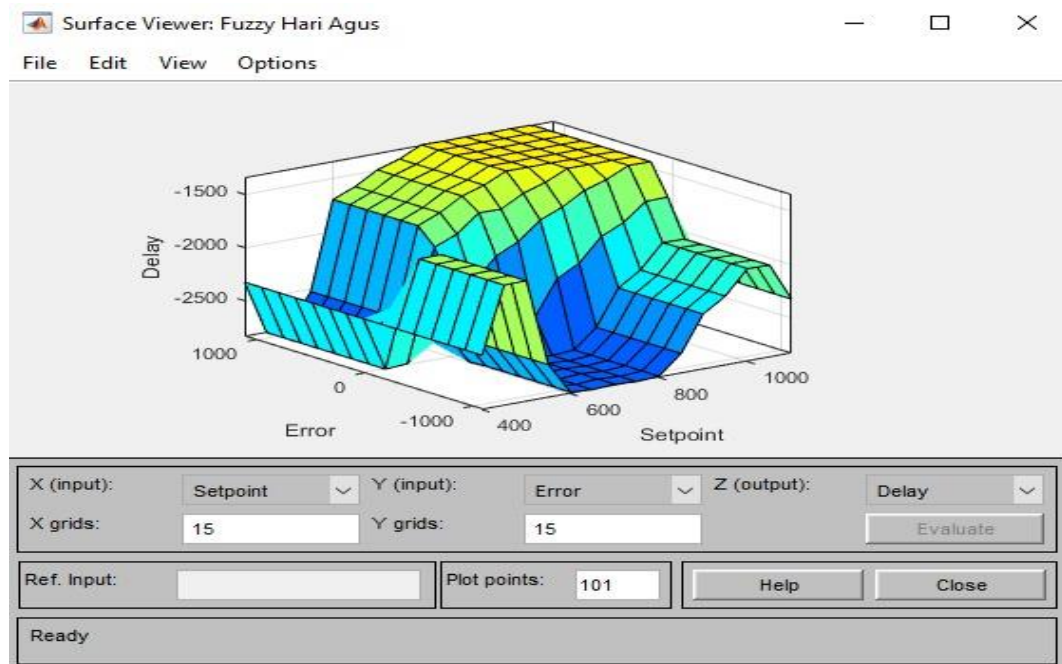


Gambar 3. 14 Implementasi rules pada MATLAB



Gambar 3. 15 Tampilan implementasi dan simulasi rules MATLAB

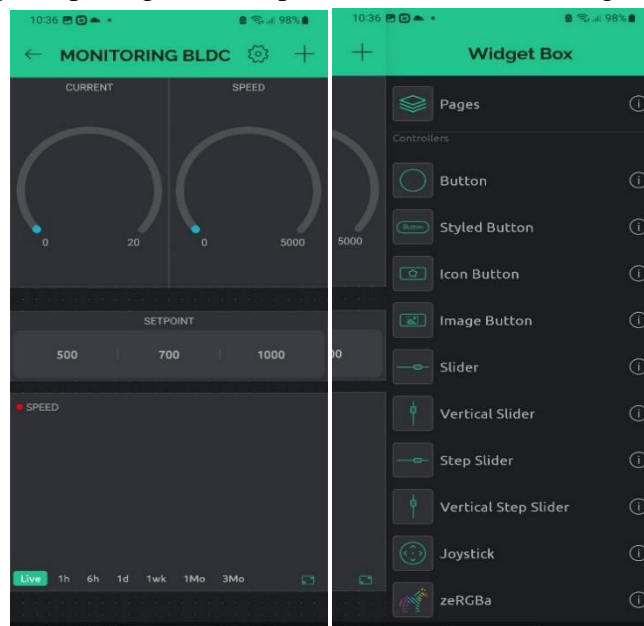
Pada simulasi matlab juga menampilkan tampilan surface dari defuzzyfikasi.



Gambar 3. 16 Tampilan *surface defuzzyfikasi* pada matlab

3.6.9. Perancangan aplikasi Blynk

Pada penelitian ini, proses *monitoring* serta kontrol pada motor BLDC dilakukan secara *real time* melalui aplikasi smartphone yaitu Blynk yang tersedia di *Google Play Store*. Agar dapat digunakan, aplikasi haruslah terhubung ke jaringan internet.



Gambar 3. 17 Tampilan awal Blynk

Pada aplikasi Blynk terdapat berbagai macam *widget* dengan fungsi tertentu yang dapat digunakan untuk mendukung keperluan *IoT*, seperti pada keperluan kontrol dan *monitoring hardware*.

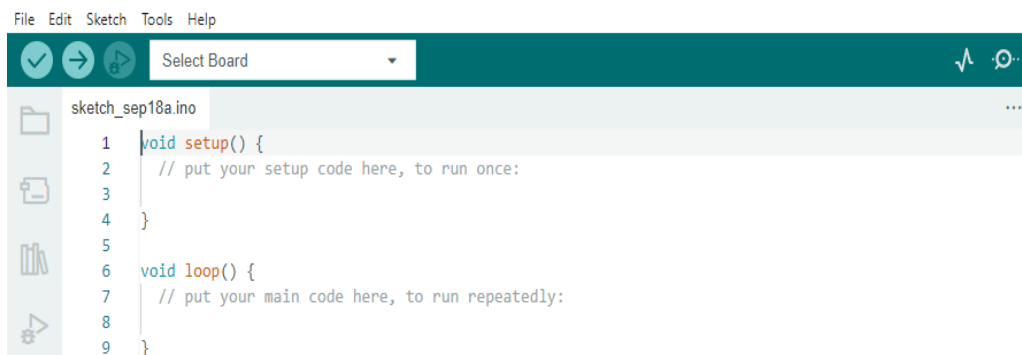
3.6.10. Pemrograman Arduino dan NodeMCU

Untuk melakukan pemrograman pada Arduino serta nodeMCU dapat dilakukan dengan menggunakan aplikasi Arduino IDE. Adapun bagian-bagian program yang ditamakan pada masing masing mikrokontroller adalah sebagai berikut:

1. Pemrograman Arduino Mega 2560

Pemrograman pada Arduino Mega terdiri dari:

- Pemrograman untuk pensaklaran MOSFET
- Pemrograman untuk pembacaan sensor kecepatan
- Pemrograman untuk nilai kontrol
- Pemrograman untuk komunikasi data ke NodeMCU



Gambar 3. 18 Tampilan awal Arduino IDE

2. Pemrograman NodeMCU

Pemrograman pada NodeMCU terdiri dari:

- Pemrograman untuk komunikasi dengan Arduino Mega
- Pemrograman untuk menerima data dari *smartphone* dan menampilkan data ke *smartphone*
- Pemrograman untuk pembacaan nilai arus dari modul ACS712 dan mengirim nilai arus untuk ditampilkan pada *smartphone*

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. Perancangan sistem monitoring dan kontrol motor BLDC dengan menggunakan metode Fuzzy Logic dan berbasis *Internet of Things* telah berhasil dibuat.
2. Dengan menggunakan kontrol Fuzzy didapatkan respon motor BLDC yang baik dikarenakan kontrol Fuzzy mampu menstabilkan kecepatan sesuai referensi dan mampu menanggapi gangguan dengan baik.
3. Monitoring serta kontrol motor BLDC dapat dilakukan dari mana saja dan kapan saja melalui jaringan internet.

5.2. SARAN

Adapun saran dari penelitian yang telah dilakukan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Diperlukan penggunaan sensor yang presisi agar tidak terjadi kesalahan pembacaan yang dapat mengganggu kinerja sistem kontrol.
2. Perlunya memperbaiki sistem kontrol dengan mengkombinasikan kontrol fuzzy dengan PID sehingga didapatkan respon kontrol yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Clinton, E. Komalasari and C. R. Harahap, "Sistem Pengendalian Kecepatan Dua Motor Brushless DC (BLDC) dengan Nine Switch Inverter Menggunakan Metode PWM," Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2022.
- [2] T. Suhendra, A. Uperiati, D. A. Purnamasari and A. H. Yuniarto, "Kendali Kecepatan Motor DC dengan Metode Pulse Width Modulation menggunakan N-channel Mosfet," Universitas Maritim Raja Ali Haji, Tanjung Pinang, 2018.
- [3] M. Mahmud, S. M. A. Motakabber, A. H. M. Z. Alam and A. N. Nordin, "Control BLDC Motor Speed using PID Controller," Department of Electrical and Computer Engineering, Kuala Lumpur, 2020.
- [4] D. Akbar and S. Riyadi, "Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM," Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, 2018.
- [5] Y. C. Wibowo and S. Riyadi, "Analisa Pembebanan pada Motor Brushless DC (BLDC)," Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, 2018.
- [6] A. T. Wahyudi, H. Suryoatmojo and D. Fahmi, "Desain dan Simulasi Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Metode Fuzzy-PID kontroler Untuk Aplikasi Sepeda Motor Listrik," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [7] M. Ali, Aplikasi Elektronika Daya Pada Sistem Tenaga Listrik, Yogyakarta: UNY Press, 2018.
- [8] I. W. Djatmiko, Bahan Ajar Elektronika Daya, Yogyakarta: Universitas Negeri Yogyakarta, 2010.
- [9] F. B. Lubis and A. Yanie, "Implementasi Pulse Width Modulation (PWM) Pada Penyaluran Limbah Cair Pupuk Kelapa Sawit Berbasis Arduino," Universitas Harapan Medan, Medan, 2022.
- [10] M. J. Mnati, D. V. Bozalakov and A. V. d. Bossche, "PID Control of a Three Phase Photovoltaic Inverter Tied to a Grid Based on a 120-Degree Bus Clamp PWM," Ghent University, Belgium, 2018.
- [11] R. Muhardian and K., "Kendali Kecepatan Motor DC Dengan Kontroller PID dan Antarmuka Visual Basic," Universitas Negeri Padang, Padang, 2022.

- [12] N. Soedjarwanto, B. and G. F. Nama, "Kontrol kecepatan motor induksi menggunakan teknologi *IoT (Internet of Things)*," Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2020.
- [13] A. Satriyadi, W. and Y. Christiyono, "Perancangan Home Automaton Berbasis NodeMCU," Universitas Diponegoro, Semarang, 2019.
- [14] B. Muslim and J. Pramudijanto, "Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler Fuzzy-PID," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [15] w. Pribadi, M. Rameli and R. Effendi, "Kontrol Torsi Motor DC Brushless Penggerak Hybrid Electric Vechile Menggunakan Predictive Direct Torque Control," Institute Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2017.
- [16] A. S. Samosir, Diktat Elektronika Daya, Bandar Lampung: Universitas Lampung, 2014.
- [17] F. H. Sholihah, N. R. Hadianto and M., "Desain dan Implementasi Inverter 3 Fasa Dengan Penambahan Push-pull Converter," Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, 2020.
- [18] A. Ardianysah, "Monitoring Daya Listrik Berbasis *IoT (Internet of Things)*," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2020.