

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
BLDC MENGGUNAKAN ZIEGLER-NICHOLS PID KONTROLER
BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IOT)**

(Skripsi)

Oleh

**JOSEPH NICOLAS
NPM 1915031057**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR BLDC MENGGUNAKAN ZIEGLER-NICHOLS PID KONTROLER BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IOT)

Oleh

JOSEPH NICOLAS

Motor BLDC merupakan salah satu jenis motor sinkron yang pengaplikasiannya banyak diterapkan pada peralatan listrik. Hal tersebut dikarenakan kelebihan dari motor BLDC yang memiliki efisiensi energi yang baik serta perawatannya yang murah dan mudah. Secara umum, motor BLDC akan bekerja pada kecepatan yang konstan saat tanpa terjadi gangguan, tetapi ketika terdapat gangguan kecepatan pada motor tersebut akan menurun. Sehingga dalam pengaplikasiannya, dibutuhkan sebuah pengendali yang mampu menjaga kestabilan respon sistem agar efisiensi motor BLDC terjaga. Untuk mengatur kecepatan motor BLDC pada penelitian ini, membutuhkan suatu rangkaian elektronika daya, yaitu inverter. Pada inverter akan terjadi proses *switching* yang diatur oleh Arduino Mega 2560, sehingga pengendalian kecepatan motor BLDC dilakukan melalui perubahan frekuensi inverter. Sementara itu, pengendalian kecepatan motor BLDC ini juga menerapkan sistem kendali *closed-loop* dengan pengendali PID. Di mana pengendali ini dapat menghasilkan respon kecepatan motor BLDC sesuai dengan *setpoint* yang dibutuhkan. Di dalam menentukan parameter pengendali PID, menggunakan metode osilasi Ziegler-Nichols, sehingga melalui metode tersebut menghasilkan nilai parameter PID, $K_p = 0,043974$, $K_i = 0,043974$, dan $K_d = 0,0109935$ dan penerapan nilai parameter PID ini mampu menjaga kestabilan respon kecepatan motor BLDC. Selain itu, pengendalian kecepatan motor BLDC pada penelitian ini dapat dilakukan dan dipantau di mana saja dan kapan saja melalui aplikasi Blynk yang terhubung dengan jaringan internet.

Kata kunci: Motor BLDC, Inverter, Pengendali PID, Metode Ziegler-Nichols, *Internet of Things*, Blynk.

ABSTRACT

DESIGN OF BLDC MOTOR SPEED CONTROL SYSTEM USING ZIEGLER-NICHOLS PID CONTROLLER BASED ON INTERNET OF THINGS (IOT)

By

JOSEPH NICOLAS

BLDC motor is one type of synchronous motor whose application is widely applied in electrical equipment. This is due to the advantages of BLDC motors which have good energy efficiency as well as cheap and easy maintenance. In general, BLDC motors will work at a constant speed when there is no disturbance, but when there is a disturbance the speed on the motor will decrease. So that in its application, a controller is needed that can maintain the stability of the system response so that the efficiency of the BLDC motor is maintained. To regulate the speed of the BLDC motor in this study, requires a power electronic circuit, namely an inverter. In the inverter, the switching process will occur which is regulated by the Arduino Mega 2560, so that the BLDC motor speed control is carried out through changes in the inverter frequency. Meanwhile, this BLDC motor speed control also applies a closed-loop control system with a PID controller. Where this controller can produce a BLDC motor speed response in accordance with the required setpoint. In determining the PID controller parameters, using the Ziegler-Nichols oscillation method, so that through this method it produces the PID parameter values, $K_p = 0.043974$, $K_i = 0.043974$, and $K_d = 0.0109935$ and the application of these PID parameter values can maintain the stability of the BLDC motor speed response. In addition, BLDC motor speed control in this study can be done and monitored anywhere and anytime through the Blynk application connected to the internet network.

Keywords: BLDC Motor, Inverter, PID, Ziegler-Nichols Tuning, Internet of Things, Blynk.

**RANCANG BANGUN SISTEM PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
BLDC MENGGUNAKAN ZIEGLER-NICHOLS PID KONTROLER
BERBASIS *INTERNET OF THINGS* (IOT)**

Oleh

JOSEPH NICOLAS

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
BLDC MENGGUNAKAN ZIEGLER-
NICHOLS PID KONTROLER BERBASIS
INTERNET OF THINGS (IOT)**

Nama Mahasiswa : Joseph Nicolas

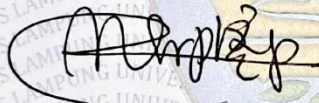
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915031057

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



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

NIP. 196912111999031001

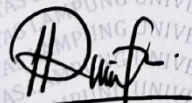


Dr. Eng. F. X. Arinto S., S.T., M.T.

NIP. 196912191999031002

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro



Herlinawati, S.T., M.T.

NIP 197103141999032001

Ketua Program Studi Teknik Elektro

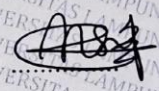


Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.

NIP 197404222000122001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji


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

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

Penguji : Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T. 

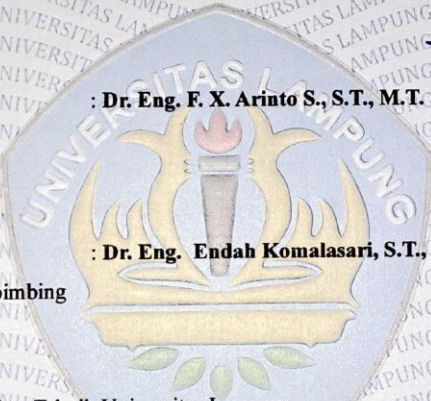
Bukan Pembimbing

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung

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

NIP 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 12 Februari 2024



SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Joseph Nicolas

Npm : 1915031057

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul "Rancang Bangun Sistem Pengendalian Kecepatan Motor BLDC menggunakan Ziegler-Nichols PID Kontroler berbasis *Internet of Things* (IoT)" 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, 19 Februari 2024



Joseph Nicolas

NPM. 1915031057

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Jakarta, pada tanggal 25 April 2001. Penulis merupakan anak ketiga dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Tonny Silaban dan Ibu Lasmaria Silitonga. Penulis memulai Pendidikan di SD Santa Lusia pada tahun 2007 hingga 2013, SMP Negeri 16 Kota Bekasi pada tahun 2013 hingga 2016, dan SMA Negeri 8 Kota Bekasi. Pada tahun 2019, penulis diterima di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN.

Pada saat 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 MBKM sekaligus kegiatan kerja praktik di PLN Indonesia Power Unit PLTGU Cilegon sebagai Operator Senior Control Room. Dan setelah itu, penulis melanjutkan kegiatan magang di PT Haleyora Power Sub Region 7 Lampung pada bidang pengoperasian dan pemeliharaan jaringan listrik.

PERSEMBAHAN

**Damai sejahtera Allah yang melampaui segala akal, itulah yang memelihara
hati dan pikiranmu, dalam Kristus Yesus Tuhan kita**

Ku persembahkan karya ini kepada

Ayah dan Ibu Tercinta

Tonny Silaban dan Lasmaria Silitonga

Saudara-saudaraku Tercinta

Gabriella Mutiara

Novia Agatha

Justin Keane

Terima kasih untuk dukungan dan doa selama ini sehingga saya dapat
menyelesaikan tugas akhir ini

MOTTO

“So do not fear, for I am with you; do not be dismayed, for I am your God. I will strengthen you and help you; I will uphold you with my righteous right hand.”

(Isaiah 41:10)

“Give thanks always.”

(1 Thessalonians 5:18)

“Work hard in silence, let success be your noise.”

(Frank Ocean)

“You're on Your Own, Kid.”

(Taylor Swift)

SANWACANA

Puji syukur penulis sampaikan kehadirat Tuhan yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Pengendalian Kecepatan Motor BLDC menggunakan Ziegler-Nichols PID Kontroler berbasis *Internet of Things* (IoT)”. Selama menjalani pengerjaan skripsi 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 Dr. Eng. Nining Purwasih, 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 yang telah 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.
6. Bapak Dr. Eng. F. X. Arinto S., S.T., M.T. selaku pembimbing pendamping yang telah 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. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., 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 kasihi, Bapak Tonny Silaban dan Ibu Lasmaria Silitonga atas segala dukungan, nasehat, serta doa sehingga memberikan kelancaran pada penulis dalam menyelesaikan perkuliahan dan pengerjaan skripsi ini.
14. Ka Bella, Ka Novi, dan Justin selaku saudara kandung penulis yang selalu memberikan semangat, motivasi, bimbingan serta doa kepada penulis selama perkuliahan dan pengerjaan skripsi.
15. Teman-teman UKM-PG: Ferry, Hari, Iyan dan Leon yang telah menemani keseharian dan membantu semua drama perkuliahan serta bermain dan bercerita suka maupun duka bersama dengan penulis selama perkuliahan dari maba hingga semester tua.
16. Segenap rekan-rekan asisten Lab PBL Angkatan 2019, 2020, dan 2021 yang saling membantu dan bekerja bersama penulis selama mejadi asisten lab PBL dan pengerjaan skripsi ini.
17. Teman - teman magang selama penulis menjalani kegiatan magang di Indonesia Power unit PLTGU Cilegon dan Haleyora Power yang telah

menemani, memberikan cerita serta pengalaman selama melaksanakan kegiatan magang.

18. Teman-teman mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung Angkatan 2019 dan HIMATRO telah menemani penulis dan memberikan pengalaman berharga selama perkuliahan.
19. Semua pihak yang telah membantu selama pelaksanaan pengerjaan skripsi namun tidak dapat disebutkan satu persatu.

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

Bandar Lampung, 19 Februari 2024

Penulis,

Joseph Nicolas

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	v
LEMBAR PENGESAHAN	vi
SURAT PERNYATAAN	vii
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Rumusan Masalah	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
1.6. Hipotesis Penelitian	4
1.7. Sistematika Penulisan.....	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC)	6
2.1.1. Konstruksi Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC)	6
2.1.2. Prinsip Kerja Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC).....	7
2.2. Inverter	8
2.2.1. Inverter Satu Fasa.....	9
2.2.2. Inverter Tiga Fasa	10
2.3. MOSFET	11
2.4. IR2301	12
2.5. Arduino Mega.....	12
2.6. Pengendali PID	13
2.7. Metode Ziegler-Nichols	15

2.8.	<i>Internet of Things (IoT)</i>	16
2.9.	Blynk	17
III.	METODE PENELITIAN	18
3.1.	Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2.	Diagram Alir Penelitian.....	18
3.3.	Diagram Blok Sistem	19
3.4.	Alat dan Bahan	21
3.5.	Perancangan Sistem.....	21
3.5.1.	Studi Literatur	21
3.5.2.	Spesifikasi Motor BLDC	22
3.5.3.	Perancangan Rangkaian Inverter.....	22
3.5.4.	Perancangan Rangkaian <i>Gate Driver</i>	24
3.5.5.	Perancangan <i>Wiring</i> Arduino Mega.....	24
3.5.6.	Perancangan <i>Wiring</i> NodeMCU	26
3.5.7.	Perancangan <i>Wiring</i> Sensor Kecepatan	27
3.5.8.	Penentuan Parameter Pengendali PID.....	28
3.5.9.	Pemrograman Arduino Mega dan NodeMCU	29
3.5.10.	Perancangan <i>Software</i> Blynk	31
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1.	Hasil Rancangan.....	32
4.1.1.	Hasil Rancangan Rangkaian Inverter 3 Fasa	32
4.1.2.	Hasil Rancangan Rangkaian <i>Gate Driver</i>	33
4.1.3.	Hasil Rancangan Arduino Mega	33
4.1.4.	Hasil Rancangan ESP8266.....	34
4.1.5.	Hasil Rancangan Sensor Kecepatan.....	35
4.1.6.	Hasil Rancangan Sensor Arus.....	35
4.1.7.	Hasil Penentuan Parameter Pengendali PID	36
4.1.8.	Hasil Rancangan Rangkaian <i>Power Supply</i>	38
4.1.9.	Hasil Rancangan <i>Software</i> Blynk	38
4.1.10.	Hasil Rancangan Rangkaian Beban	39
4.1.11.	Hasil Rancangan Keseluruhan Rangkaian	39
4.2.	Pengujian Hasil Rancangan.....	40
4.2.1.	Pengujian Rangkaian Inverter	40
4.2.2.	Pengujian Sensor Kecepatan	46
4.2.3.	Pengujian Sensor Arus	48
4.2.4.	Pengujian Parameter Pengendali PID	51

4.2.5.	Hasil Pemodelan Arsitektur <i>Layer Internet of Things</i>	53
4.2.6.	Pengujian Kecepatan Motor BLDC melalui <i>Software Blynk</i>	55
V.	KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1.	Kesimpulan.....	57
5.2.	Saran.....	57
	DAFTAR PUSTAKA	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konstruksi Motor BLDC.....	7
Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC.....	8
Gambar 2.3 Rangkaian Inverter Satu Fasa.....	9
Gambar 2. 4 Rangkaian Inverter 3 Fasa.....	10
Gambar 2. 5 MOSFET dan Simbolnya.....	11
Gambar 2. 6 IR2301	12
Gambar 2. 7 Arduino Mega	13
Gambar 2. 8 Kontroler PID.....	13
Gambar 2. 9 Tampilan Blynk.....	17
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	18
Gambar 3. 2 Blok Diagram Blok Sistem	19
Gambar 3. 3 Motor BLDC SunnySky x2212 KV980.....	22
Gambar 3. 4 Rangkaian Inverter Tiga Fasa	23
Gambar 3. 5 Rangkaian Gate Driver.....	24
Gambar 3. 6 Wiring Arduino Mega	25
Gambar 3. 7 Wiring NodeMCU.....	26
Gambar 3. 8 Wiring Sensor Kecepatan.....	27
Gambar 3. 9 Kondisi Sistem dengan Sustained Oscillation.....	29
Gambar 3. 10 Program Arduino Mega dan NodeMCU.....	30
Gambar 3. 11 Tampilan Aplikasi Blynk	31
Gambar 3. 12 Blok Diagram Sistem Perancangan Perangkat Lunak.....	31
Gambar 4. 1 Hasil Rancangan Rangkaian Inverter 3 Fasa.....	32
Gambar 4. 2 Hasil Rancangan Rangkaian Gate Driver.....	33
Gambar 4. 3 Hasil Rancangan Arduino Mega	34
Gambar 4. 4 Hasil Rancangan NodeMCU	34
Gambar 4. 5 Hasil Rancangan Sensor Kecepatan	35
Gambar 4. 6 Hasil Rancangan Sensor Arus	36
Gambar 4. 7 Sustained Oscillation pada Respon Sistem saat Nilai Ku 0,07239 ..	36
Gambar 4. 8 Hasil Rangkaian Power Supply	37
Gambar 4. 9 Hasil Perancangan Software Blynk.....	39
Gambar 4. 10 Hasil Rancangan Beban	39
Gambar 4. 11 Hasil Keseluruhan Rangkaian	40
Gambar 4. 12 Grafik Hubungan Kecepatan Motor dan Frekuensi	48
Gambar 4. 13 Grafik Hubungan Frekuensi dan Arus Keluaran Motor BLDC	50
Gambar 4. 14 Grafik Respon Kecepatan Motor BLDC saat Berbeban	53
Gambar 4. 15 Arsitektur Pemodelan IoT	54
Gambar 4. 16 Pengujian Setpoint di Aplikasi Blynk (a) pada Setpoint 500 rpm, (b) pada Setpoint 700 rpm, (c) pada Setpoint 1000 rpm, (d) pada saat pengujian berbeban	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Konfigurasi Switching Inverter 3 Fasa	11
Tabel 2. 2 Tanggapan Sistem Kontrol PID	14
Tabel 2. 3 Metode Pertama Aturan Ziegler-Nichols.....	15
Tabel 2. 4 Metode Kedua Aturan Ziegler-Nichols.....	16
Tabel 3. 1 Spesifikasi Motor BLDC	22
Tabel 3. 2 Skema Pensaklaran Inverter.....	23
Tabel 3. 3 Konfigurasi Pensaklaran MOSFET	25
Tabel 3. 4 Pin Wiring NodeMCU dengan Arduino Mega	26
Tabel 3. 5 Pin Wiring NodeMCU dengan Modul AC712	27
Tabel 3. 6 Pin Wiring Sensor Kecepatan dengan Arduino Mega	28
Tabel 3. 7 Tabel Penentuan Nilai PID Metode Ziegler-Nichols.....	29
Tabel 4. 1 Parameter Pengendali PID dengan Metode Osilasi Ziegler-Nichols...	37
Tabel 4. 2 Pengujian Gelombang PWM Inverter.....	41
Tabel 4. 3 Pengukuran Tegangan Keluaran Inverter	45
Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran dan Perhitungan Tegangan Keluaran Inverter.....	46
Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC.....	46
Tabel 4. 6 Perbandingan Hasil Pengukuran Kecepatan Motor BLDC.....	48
Tabel 4. 7 Pengujian Arus Keluaran Motor BLDC.....	49
Tabel 4. 8 Hasil Pengukuran Arus Keluaran Motor BLDC.....	50
Tabel 4. 9 Grafik Respon Kecepatan Motor BLDC Tanpa Beban	51
Tabel 4. 10 Respon Kecepatan Motor BLDC	52

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Penggunaan peralatan listrik sudah sangat umum dijumpai dalam kehidupan sehari-hari untuk menunjang keberlangsungan hidup manusia. Dalam menunjang kebutuhan tersebut, peralatan listrik pada bidang industri modern yang handal dan efisien menggunakan mesin canggih dalam kegiatan sehari-hari, di mana mesin harus memiliki performa yang sempurna untuk menjaga kualitasnya [1]. Salah satu jenis peralatan listrik yang pengaplikasiannya sering digunakan dalam memenuhi kebutuhan tersebut adalah motor listrik, di mana motor listrik merupakan sebuah mesin listrik yang mampu mengubah energi listrik menjadi energi gerak. Dan jenis motor listrik yang umum digunakan dan mampu diterapkan di berbagai bidang yaitu motor BLDC dikarenakan motor BLDC mempunyai beberapa kelebihan, antara lain: memiliki efisiensi tinggi, waktu pengoperasian yang panjang, tingkat kebisingan yang rendah dan biaya perawatan yang terjangkau [1] [2].

Pada umumnya, motor BLDC akan bekerja pada kecepatan yang konstan saat tanpa beban, tetapi jika berbeban maka kecepatan pada motor BLDC tersebut akan menurun [3]. Namun dalam pengaplikasiannya, diperlukan juga kecepatan motor BLDC yang stabil walaupun terjadi perubahan beban, sehingga dilakukannya pengendalian kecepatan motor BLDC.

Pengendalian kecepatan pada motor BLDC dapat dilakukan dengan beberapa cara, salah satunya dengan mengubah nilai frekuensi. Untuk dapat mengatur nilai frekuensi tersebut dapat menggunakan rangkaian inverter di mana inverter mampu mengubah sumber DC menjadi listrik AC melalui proses pensaklaran sehingga proses pensaklaran ini akan menghasilkan frekuensi yang keluaran nilainya dapat diatur sesuai kebutuhan dan terciptanya kecepatan motor yang bervariasi [4]. Sehingga jenis inverter yang digunakan dalam pengendalian motor BLDC ini yaitu *Variable Frequency Drive Inverter*.

Agar pengendalian kecepatan pada motor BLDC dapat bekerja secara stabil dengan kecepatan yang diinginkan, maka dibutuhkan pengendali PID. Pengendali PID merupakan kombinasi atas tiga kontrol, yaitu P (*Proportional*), I (*Integral*) dan D (*Derivative*) dan dapat diatur sehingga dapat memberikan respon sistem yang diinginkan dengan stabilitas yang baik [5] [6]. Pengendali PID ini akan mempertahankan kecepatan motor BLDC agar tetap sesuai dengan kecepatan referensi dan akan otomatis mengubah nilai frekuensi agar tetap sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.

Di dalam menentukan parameter pengendali PID dengan metode *trial-error*, sangat melelahkan karena tidak efektif dan efisien secara penggunaannya. Maka karena hal tersebut, pada penelitian ini dalam menentukan parameter-parameter pengendali PID menggunakan metode Ziegler-Nichols agar dapat memperoleh nilai-nilai parameter pengendali PID yang tepat serta otomatis. Di mana metode ini berdasarkan karakteristik respon dari suatu sistem untuk penentuan parameternya.

Untuk mempermudah dan memperluas proses pengendalian dan pemantauan kecepatan motor BLDC, maka diterapkan teknologi *Internet of Things* (IoT). IoT ini memiliki kemampuan saling berkomunikasi antar segala bidang agar saling terhubung satu sama lain [7], sehingga memudahkan kita dalam melakukan pengendalian dan pemantauan terhadap kecepatan pada motor dengan suatu sistem dari jarak-jauh melalui platform Blynk dan pengguna mendapatkan data dari jarak jauh dan memudahkan akses pengontrolan di setiap waktu dan tempat.

Berdasarkan penelitian oleh Bangkit Gigih Nugroho (2021) mengenai pengendalian motor BLDC dengan frekuensi tinggi PWM menggunakan mikrokontroler untuk mengatur keluaran kecepatan pada motor BLDC di mana pada penelitian ini membahas sistem pengendalian motor BLDC secara *opened-loop* dan pengendalian besaran frekuensinya berdasarkan *duty cycle* dan belum terdapat sistem yang mampu mengolah data keluaran dari pengontrolan kecepatan motor tersebut sehingga dari latar belakang tersebut muncul sebuah ide untuk merancang suatu sistem pengendalian dan pemantauan kecepatan pada motor BLDC menggunakan sistem *closed-loop* dengan metode Ziegler-Nichols dalam penentuan nilai-nilai parameternya dan berbasis *Internet of Things* (IoT) agar sistem pengendalian

kecepatan motor BLDC tersebut dapat berjalan lebih stabil dan dapat dilakukannya pemantauan serta pengendalian kecepatan motor dari jarak jauh secara real-time.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Merancang sebuah sistem pengendalian dan pemantauan kecepatan motor *Brushless Direct Current* (BLDC) dengan menggunakan pengendali PID berbasis *Internet of Things*.
- b. Menentukan nilai-nilai parameter pada pengendali PID dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols.
- c. Melakukan pengendalian dan pemantauan kecepatan motor BLDC melalui aplikasi Blynk secara jarak jauh.

1.3. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana merancang sistem pengendalian dan pemantauan pada motor BLDC dengan pengendali PID berbasis *Internet of Things* (IoT)?
- b. Bagaimana menentukan nilai-nilai parameter pada kontroller PID dengan Metode Ziegler-Nichols?
- c. Bagaimana melakukan pengendalian dan pemantauan terhadap kecepatan motor BLDC dari jarak jauh menggunakan aplikasi Blynk?

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Merancang dan membangun sistem pengendalian dan pemantauan kecepatan motor BLDC dengan pengendali PID berbasis *Internet of Things* (IoT).
- b. Menentukan nilai-nilai parameter pengendali PID dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols.

- c. Mengendalikan dan memantau kecepatan motor BLDC dengan platform Blynk.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini, adalah:

- a. Dihasilkannya sistem pengendalian dan pemantauan kecepatan motor BLDC dengan pengendali PID berbasis *internet of things*.
- b. Mendapatkan nilai-nilai parameter pengendali PID dengan metode *tuning* Ziegler-Nichols.
- c. Memudahkan dalam pengendalian dan monitoring kecepatan motor BLDC dari jarak jauh melalui aplikasi Blynk dengan menggunakan jaringan internet.

1.6. Hipotesis Penelitian

Hipotesis dari penelitian ini adalah dapat dikendalikannya dan terpantaunya kecepatan motor BLDC dari jarak jauh melalui aplikasi Blynk dengan menggunakan jaringan internet. Adapun pengendalian motor BLDC ini, dilakukan dengan melakukan perubahan frekuensi menggunakan mikrokontroler. Dan penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam pengembangan terhadap pengendalian kecepatan motor BLDC.

1.7. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini terbagi menjadi beberapa bab, antara lain:

I. PENDAHULUAN

Bab ini memuat latar belakang, tujuan, manfaat, perumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memuat teori-teori yang mendukung mengenai perancangan alat pengendalian dan pemantauan pada motor BLDC.

III. METODE PENELITIAN

Bab ini memuat mengenai waktu, tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, garis besar pada metode yang diusulkan serta diagram alir metode yang diusulkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memuat hasil penelitian, pembahasan, dan perhitungan terhadap kinerja metode yang diusulkan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran-saran untuk pengembangan penelitian lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

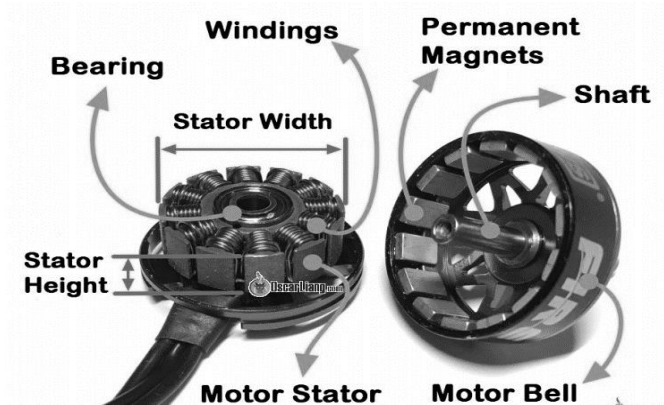
2.1. Motor *Brushless Direct Current* (BLDC)

Motor BLDC adalah jenis motor listrik yang bekerja pada kecepatan yang konstan ketika tanpa beban maupun dengan beban penuh [2]. Sumber listrik pada motor BLDC adalah listrik AC (*Alternating Current*) tiga fasa dalam pembangkitan medan magnet putarnya dan menggunakan listrik DC (*Direct Current*) untuk pengontrolan pada motor BLDC. Motor ini juga disebut motor sinkron dikarenakan medan magnet yang dibangkitkan stator dan rotor berputar pada frekuensi yang sinkron atau sama. Motor ini memiliki kelebihan seperti efisiensi motor yang baik, mampu mengurangi tingkat kebisingan saat motor bekerja, perawatan yang lebih terjangkau, dan dapat bekerja pada kecepatan yang tinggi. Adapun kekurangan pada motor BLDC, antara lain: pengontrolan yang lebih rumit dan harga motor yang lebih mahal [8].

2.1.1. Konstruksi Motor *Brushless Direct Current* (BLDC)

Pada konstruksi motor BLDC menyerupai motor AC sinkron magnet permanen [8]. Di mana kumparan jangkar terletak di stator dan pada rotor terdiri atas satu atau lebih magnet permanen, tetapi mempunyai perbedaan pada *back-EMF*.

Pada bagian rotor merupakan poros yang berputar karena gaya elektromagnetik dari stator serta terbuat dari magnet permanen dan bagian stator merupakan bagian yang diam di mana tempat letaknya kumparan tiga fasa sehingga memberikan gaya elektromagnetik ke rotor sehingga motor dapat berputar. Motor BLDC dikontrol secara elektris dengan menggunakan sensor *Hall Effect Sensor* [9], sehingga untuk memutar motor tersebut pada kumparan stator harus diberi daya sesuai dengan urutan komutasinya dikarenakan untuk mengetahui posisi rotor serta mengetahui kumparan mana yang akan diberikan daya sesuai urutan komutasi. Pada Gambar 2.1 menunjukkan konstruksi pada motor BLDC.



Gambar 2.1 Konstruksi Motor BLDC

2.1.2. Prinsip Kerja Motor *Brushless Direct Current* (BLDC)

Motor BLDC bekerja pada kecepatan konstan dengan pengaturan frekuensi tertentu. Dalam pengoperasiannya, motor ini memerlukan arus searah (DC) dalam pembangkitan daya dengan bantuan komponen inverter untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) [2]. Kemudian pada stator motor BLDC di mana merupakan bagian kumparan untuk menghasilkan medan magnet, ketika kumparan tersebut terdapat arus dan tegangan mengalir maka akan terjadi magnetisasi antara kumparan magnet pada rotor dengan kumparan stator sehingga menyebabkan motor BLDC berputar.

Pada persamaan torsi motor BLDC dapat digunakan dengan persamaan berikut :

$$T = K_{rms} \cdot \phi \cdot I (Nm) \dots\dots\dots(2.1)$$

Di mana :

T = Torsi (Nm)

K_{rms} = Konstanta *root mean square*

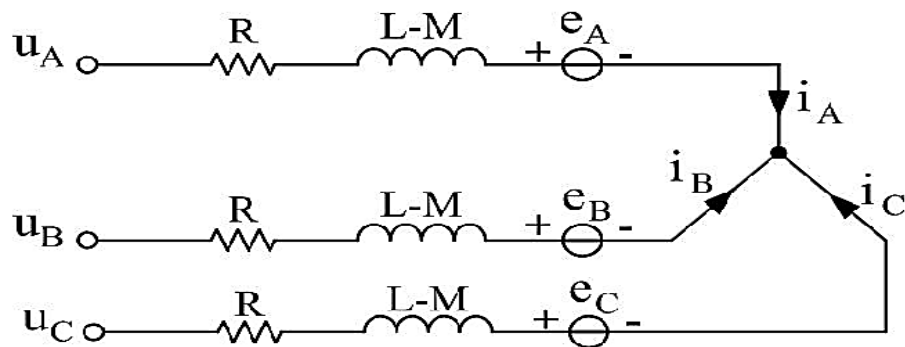
ϕ = Fluks Magnet (Tesla)

I = Arus (Ampere)

Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian ekuivalen pada motor BLDC, dan untuk mendapatkan persamaan pada tegangan terminal motor BLDC dapat dinyatakan pada persamaan 2.2.

$$V_t = K_e \cdot \omega + R_{total} \times I_{beban} \dots\dots\dots(2.2)$$

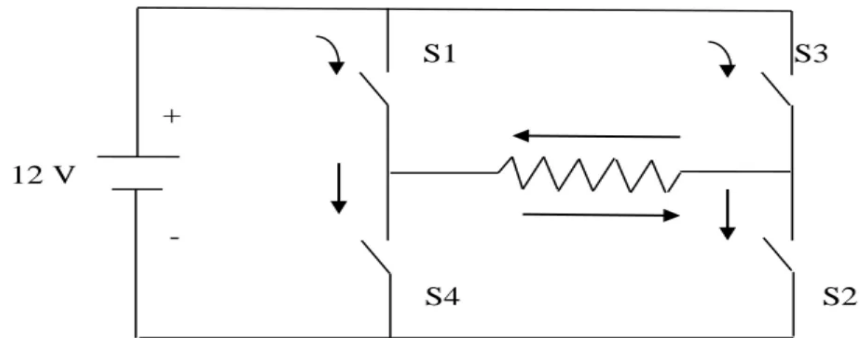
Dimana, V_t Tegangan terminal motor BLDC (volt), K_e adalah Konstanta BEMF, ω adalah kecepatan sudut rotor (rad/s), R_{total} adalah Hambatan total (ohm), dan I_{beban} adalah Arus beban (Ampere)



Gambar 2.2 Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC

2.2. Inverter

Inverter merupakan suatu rangkaian elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah sumber tegangan DC (*Direct Current*) menjadi sumber tegangan AC (*Alternating Current*) dan bekerja pada frekuensi tertentu [10]. Sumber tegangan masukan inverter yaitu tegangan DC diperoleh dari aki. Komponen semikonduktor yang digunakan berupa Transistor, SCR dan MOSFET dan bekerja sebagai sakelar. Seiring perkembangan teknologi, inverter berkembang menjadi topologi mulai dari inverter tegangan AC hingga inverter yang mampu menghasilkan tegangan sinus murni tanpa harmoniasasi [11]. Inverter disebut sebagai inverter catu-tegangan (*voltage-fed inverter-VFI*) apabila tegangan masukan selalu dijaga konstan, disebut inverter catu-arus (*current-fed inverter-CFI*) apabila arus masukan selalu dipelihara konstan. Pada Gambar 2.3 menunjukkan rangkaian inverter satu fasa.



Gambar 2.3 Rangkaian Inverter Satu Fasa

Klasifikasi pada inverter terbagi menjadi dua jenis, antara lain: inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Berdasarkan gelombang yang dihasilkan inverter, sinyal keluaran inverter dibagi menjadi tiga jenis, antara lain [12]:

- *Square Sine Wave Inverter*
Tipe inverter yang memberikan output gelombang sinus persegi. Jenis inverter ini tidak efisien untuk beban AC tertentu, seperti: motor induksi
- *Modified Sine Wave Inverter*
Tipe inverter yang memberikan output gelombang persegi yang disempurnakan. Di mana output gelombangnya merupakan kombinasi antara square sine wave dan sine wave. Inverter jenis ini bekerja kurang maksimal serta memiliki faktor kerugian energi yang besar.
- *Pure Sine Wave Inverter*
Jenis inverter ini memberikan output gelombang sinus murni setara standar PLN dan digunakan untuk beban-beban yang menggunakan kumparan induksi agar dapat bekerja secara efisien.

Berdasarkan proses konversinya, inverter terbagi menjadi tiga jenis, yaitu: Seri, Pararel, Jembatan (*Half-bridge dan bridge*).

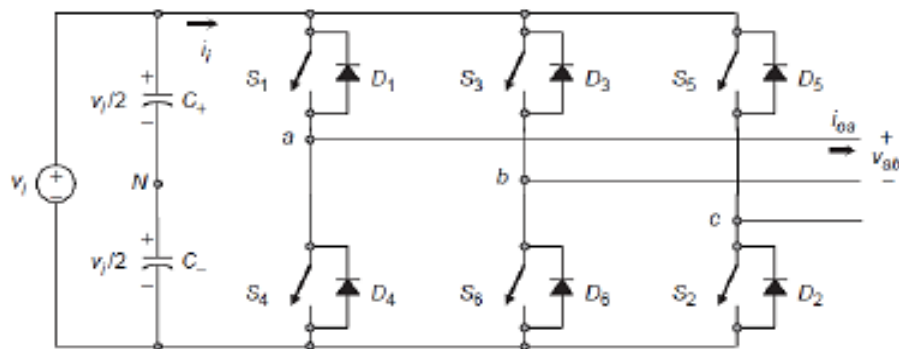
2.2.1. Inverter Satu Fasa

Perbedaan listrik satu fasa, dua fasa serta tiga fasa adalah jumlah kabel penghantar tegangannya. Pada inverter satu fasa banyak digunakan pada listrik berdaya rendah 450-900 watt [10]. Rangkaian inverter satu fasa dapat dibentuk dari saklar elektronik dengan konfigurasi jembatan. Rangkaian pada inverter satu fasa terdiri

dari empat saklar elektronik, pada rangkaian tersebut dapat disederhanakan dengan rangkaian ekivalen. Dengan menggunakan sumber listrik DC, melalui rangkaian inverter akan didapatkan keluaran listrik AC dengan cara pengaturan ke empat sakelar elektronik tersebut dengan cara bergantian dengan aturan tertentu [11]. Dan tegangan output yang dihasilkan pada rangkaian inverter satu fasa adalah gelombang kotak.

2.2.2. Inverter Tiga Fasa

Pada rangkaian inverter tiga fasa digunakan untuk mengubah sumber listrik DC menjadi listrik AC tiga fasa. Di mana komponen yang digunakan pada inverter tiga fasa, seperti : MOSFET atau IGBT yang disusun dengan pemodelan jembatan [11].



Gambar 2. 4 Rangkaian Inverter 3 Fasa

Gambar 2.4 merupakan rangkaian inverter 3 fasa dan prinsip kerja dari rangkaian tersebut yaitu dalam mengubah sumber listrik DC menjadi listrik AC memerlukan mekanisme pengendalian kombinasi pensaklaran secara elektrik dengan frekuensi yang sesuai, di mana masing-masing saklar tersebut tidak boleh bekerja secara bersamaan karena dapat menyebabkan gangguan. Sehingga pengaturan penyalan saklar hal ini MOSFET dengan perbedaan masing-masing fasa sebesar 120° . Terdapat 6 mode pengoperasian atau konfigurasi *switching* pada inverter 3 fasa. Untuk urutan pada penyalan saklar tersebut dapat mengikuti aturan berikut [13], seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Konfigurasi Switching Inverter 3 Fasa

S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	0	0	0	0	1
1	1	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0
0	0	1	1	0	0
0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	1	1

2.3. MOSFET

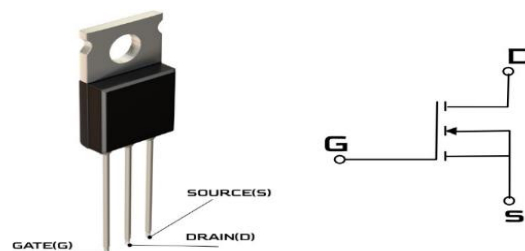
MOSFET atau *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* adalah jenis transistor yang mempunyai impedansi masukan (*gate*) sangat tinggi sehingga dengan menggunakan MOSFET sebagai saklar elektrik dengan metode *switching* [12]. Secara umum bagian pada MOSFET terdiri atas: *Gate* (G), *Drain* (D), dan *Source* (S) dan dapat dilihat pada Gambar 2.5. MOSFET merupakan komponen semikonduktor yang bekerja dengan melakukan variasi lebar saluran muatan listrik. MOSFET memiliki dua prinsip kerja, antara lain [10]:

a. Depletion Mode

Ketika *gate* pada MOSFET tidak ada tegangan maka konduksi *channel* berada pada kondisi maksimum, dikarenakan tegangan pada gerbang positif atau negatif konduksi pada *channel* mengalami penurunan.

b. Enhancement Mode

Ketika *gate* pada MOSFET tidak ada tegangan maka MOSFET tidak bersifat konduksi dan tegangan pada *gate* akan meningkat dan konduksi pada *channel* akan semakin lebih baik.



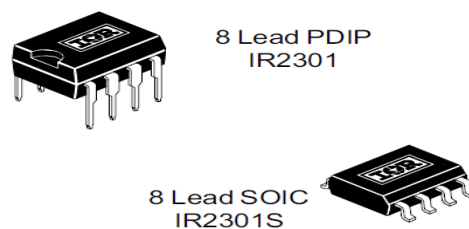
Gambar 2. 5 MOSFET dan Simbolnya

2.4. IR2301

Gate Driver merupakan penghubung antara sinyal pengendali tegangan (G) terhadap sumber (S) pada MOSFET, tegangan tersebut bernama *Voltage Gate to Source* (V_{GS}) [14]. Fungsi secara umumnya *Gate Driver* menguatkan tegangan *input* yang nilai tegangannya kecil dari pengendali menjadi tegangan input yang nilainya lebih besar, kemudian tegangan input tersebut diteruskan ke rangkaian komponen utama. Berikut merupakan kriteria yang dapat menentukan kualitas pada rangkaian *Gate Driver*, antara lain [15]:

- *IC Driver* yang digunakan mampu memberikan proteksi gangguan akibat dari pensaklaran.
- Gelombang keluaran kontrol PWM yang terisolasi dari sistem, sehingga arus balik pada saat pensaklaran tidak memberikan efek panas pada MOSFET atau IGBT.

IR2301 merupakan salah satu jenis IC yang digunakan sebagai *driver* untuk pengoperasian saklar semikonduktor pada IGBT atau MOSFET. IR2301 mampu sebagai *driver* yang bekerja pada kecepatan tinggi dan tegangan yang tinggi di mana bergantung pada kondisi sisi *high* dan sisi *low* dari referensi keluaran. Jenis-jenis IC ini ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 IR2301

2.5. Arduino Mega

Mikrokontroler merupakan chip yang mampu sebagai pengontrol suatu rangkaian elektronik [4] serta menyimpan program. dan terdapat CPU, ROM, RAM, *input-output*, *timer*, *interrupt*, *clock* dan peralatan lainnya yang saling terhubung dan terorganisasi dengan baik dalam satu chip. Arduino mega adalah salah satu modul mikrokontroler yang saat ini populer dan terdapat berbagai macam Arduino sesuai kebutuhan. Arduino mega 250 mempunyai 54 digital pin [16] di mana pin tersebut

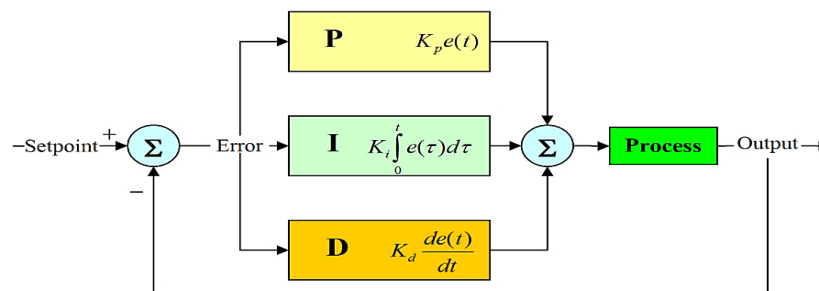
terdiri atas input dan output dan 15 pin dapat digunakan sebagai output PWM, 16 Analog input, 4 UART (*Hardware Port Serial*), Osilator Kristal 16 MHz, koneksi USB, Socket Jack, Header ICSP, dan tombol reset. Gambar 2.7 menunjukkan Arduino Mega yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 2. 7 Arduino Mega

2.6. Pengendali PID

Pengendali merupakan komponen yang berfungsi untuk mengurangi kesalahan pada sinyal [1]. Prinsip pada pengendali yaitu dapat mengubah model sistem seluruhnya dan juga berubah sesuai yang dikehendaki. Salah satu jenis pengendali yang paling umum adalah pengendali PID. Di mana elemen-elemen pengendali P, I, dan D secara keseluruhan bertujuan agar mempercepat reaksi sebuah sistem, menghasilkan perubahan awal yang signifikan dan mampu menghilangkan *offset* dan kontroler PID dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Kontroler PID

Proporsional-Integral-Derivatif (PID) merupakan pengontrol konvensional yang digunakan dalam mengontrol parameter seperti: kecepatan, suhu, aliran, tekanan dan variabel proses lainnya[17]. Pengendali PID secara kontinu menghitung nilai kesalahan sebagai pembeda antara *setpoint* yang diinginkan dengan variabel proses

yang terukur [6]. Transfer fungsi pada pengendali PID dalam domain t dinyatakan dengan persamaan:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \dots\dots\dots(2.3)$$

Di mana:

K_p = Koefisien proporsional

K_i = Koefisien integral

K_d = Koefisien derivatif

T_i = Waktu Integral

T_d = Waktu Derivatif

Dari persamaan tersebut, $u(t)$ merupakan variabel yang dapat dikendalikan dan $e(t)$ merupakan galat dari selisih antara nilai referensi dengan sinyal keluaran. Sementara K_p , K_i , dan K_d adalah koefisien dari Proporsional, Integral, dan Derivatif parameter PID yang harus ditentukan. Kontrol Proportional akan melakukan perkalian dengan kesalahan yang terjadi pada sistem. Kemudian, kontrol integral melakukan penjumlahan dengan kesalahan yang terjadi tiap waktu. Dan kontrol derivatif melakukan pengontrolan berdasarkan kecepatan perubahan terhadap kesalahan sinyal [5]. Untuk memenuhi sistem yang diinginkan maka ketiga parameter tersebut harus ditetapkan secara optimal. Masing-masing kendali tersebut dapat bekerja dan diterapkan secara terpisah maupun kombinasi secara bersamaan dengan tujuan saling memenuhi antar masing-masing karakteristik kendali tersebut. Adapun tanggapan sistem pada kontrol PID ditunjukkan pada tabel 2.2[18].

Tabel 2. 2 Tanggapan Sistem Kontrol PID

<i>Closed-Loop Response</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Setting Time</i>	<i>SS Error</i>
<i>K_p</i>	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Small Change</i>	<i>Decrease</i>
<i>K_i</i>	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Increase</i>	<i>Eliminate</i>
<i>K_d</i>	<i>Small Change</i>	<i>Decrease</i>	<i>Increase</i>	<i>Small Change</i>

2.7. Metode Ziegler-Nichols

Salah satu metode untuk pengaturan kendali PID yang paling umum adalah metode Ziegler-Nichols. Metode ini mengusulkan aturan dalam penentuan K_p , T_i dan T_d yang berdasarkan karakteristik respon transien dari suatu sistem dan bertujuan untuk maksimum *overshoot* 25% terhadap masukan step [19][20]. Metode *Ziegler-Nichols* terdiri atas dua metode, yaitu: metode pertama dan metode kedua, antara lain:

a. Metode Pertama

Pada metode ini, respon suatu sistem terhadap masukan satu satuan fungsi *step* ditentukan secara eksperimental. Ketika respon yang dihasilkan melalui eksperimen atau simulasi dinamik sistem menghasilkan kurva berbentuk S, maka metode ini dapat diterapkan. Kurva pada metode ini dapat dilambangkan dengan dua konstanta, yaitu: waktu tunda (L) dan konstanta waktu (T) [19][20]. kedua konstanta tersebut digunakan untuk mencari nilai K_p , K_i dan K_d . Parameter pada metode pertama Ziegler-Nichols ditentukan dengan Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Metode Pertama Aturan Ziegler-Nichols

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	2L	0.5L

b. Metode Kedua

Pada metode ini, mengatur $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$ pada awalnya. Kemudian sistem hanya bekerja dengan pengendali proporsional. Nilai K_p dinaikkan dari 0 ke nilai kritis K_{cr} sehingga memperoleh *output* yang mulai berosilasi dengan amplitudo yang konstan [19][20]. Metode ini juga terdapat dua parameter, yaitu: K_u dan T_u . Berikut parameter pada metode kedua Ziegler-Nichols ditentukan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Metode Kedua Aturan Ziegler-Nichols

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

2.8. *Internet of Things (IoT)*

Internet of Things (IoT) terdiri atas dua kata yaitu “*internet*” dan “*things*” di mana memiliki konsep untuk memperluas peralatan elektronik agar saling terkoneksi dengan jaringan internet dan kemampuan berkomunikasi di segala bidang [7] [21] dan berfungsi untuk mengumpulkan data serta informasi yang berasal dari lingkungan fisik. Sehingga untuk menerapkan *Internet of Things (IoT)* pada peralatan elektronik dengan menambahkan sensor aktif dan terhubung dengan jaringan lokal maupun global. Secara umum, konsep pada IoT terdiri atas 3 elemen utama, yaitu: benda nyata yang telah terintegrasi dengan sensor, koneksi internet sever sebagai pusat data untuk menyimpan data pada aplikasi [22].

Teknologi yang terdapat pada IoT terbagi menjadi beberapa bagian arsitektur layer antara lain.[22]:

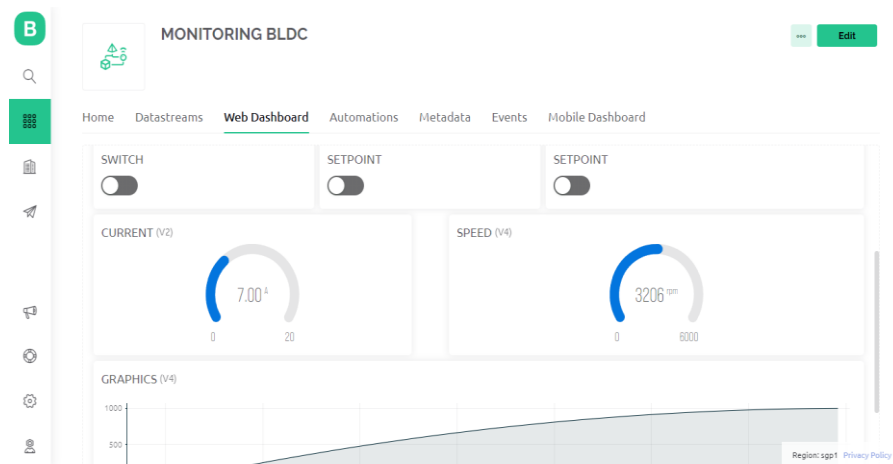
1. *Application Layer*, merupakan bagian yang digunakan untuk berinteraksi dengan pengguna.
2. *Middleware Layer*, merupakan bagian penghubung antara mikrokontroler dengan aplikasi yang berupa *cloud server*.
3. *Gateway Layer*, merupakan bagian yang menghubungkan mikrokontroler dengan perangkat yang terdapat pada *physical layer*.
4. *Physical Layer*, merupakan bagian yang membahas komponen fisik dalam arsitektur.

Prinsip kerja dari *Internet of Things* adalah adanya interaksi antar sesama benda maupun mesin secara otomatis tanpa adanya campur tangan *user* dalam jarak berapapun menggunakan jaringan internet sebagai media penghubungnya.

Sehingga pada konsep tersebut, pengguna hanya bertugas untuk memantau dan mengendalikan sistem tersebut.

2.9. Blynk

Blynk merupakan sebuah platform yang dapat digunakan dalam pengaturan atau pengendalian modul rasbery pi, Arduino, dan lain-lain dengan jaringan internet [21]. Blynk dibuat dengan tujuan untuk mengatur dan memonitor *hardware* dari jarak berapa pun menggunakan koneksi internet. Kemampuan Blynk dalam menyimpan dan menampilkan data secara visual baik menggunakan angka, warna, hingga grafik akan memudahkan pembuatan proyek dalam bidang IoT. Platform ini mampu membangun *interface* dalam pengendalian dan pemantauan suatu proyek dan dirancang untuk membuat *remote control* serta data sensor membaca dari perangkat mikrokontroler [23]. Aplikasi ini mudah digunakan dan memiliki fitur yang beragam sehingga *user* dapat menggunakannya di manapun dan kapanpun.



Gambar 2. 9 Tampilan Blynk

Pada Gambar 2.9 menunjukkan tampilan *website* dari *platform* Blynk, di mana pada bagian tersebut merupakan *Web Dashboard* yang terdapat fitur-fitur yang dapat digunakan untuk proses pemantauan dan pengendalian dalam pengaturan kecepatan motor BLDC penelitian ini. Untuk tampilan pada *website* tersebut dapat diatur dan disesuaikan dengan kebutuhan.

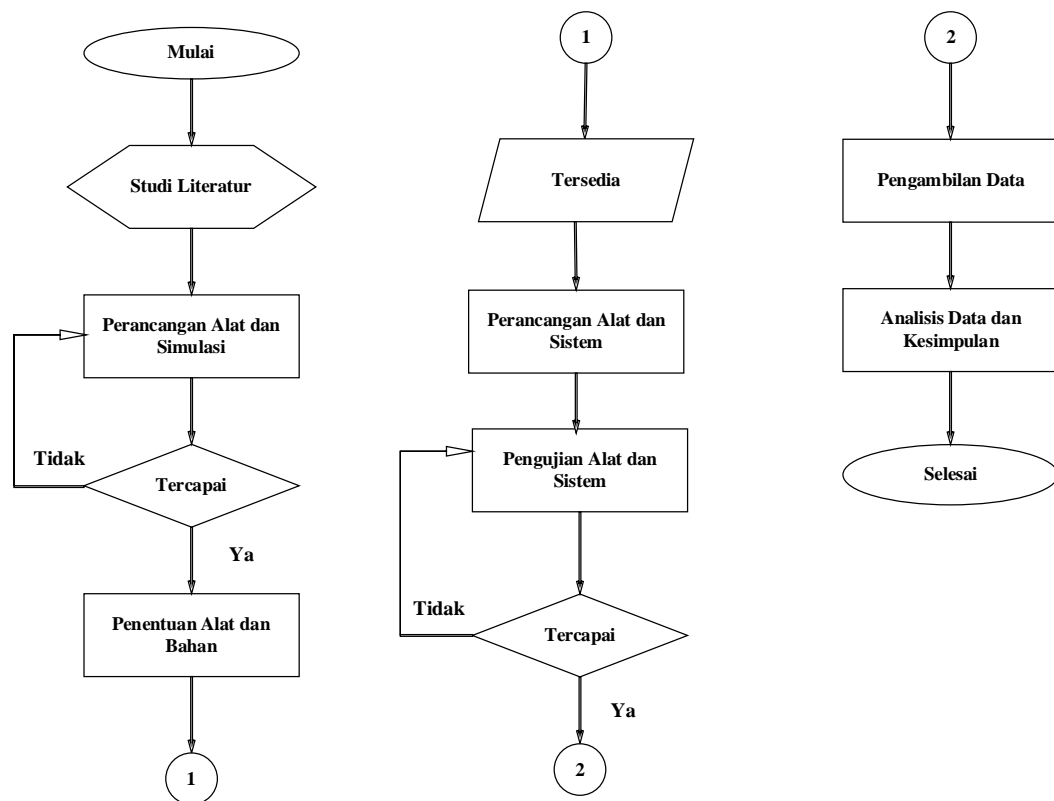
III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 6 bulan yaitu dari April 2023 sampai dengan Oktober 2023. Di mana, penelitian dilakukan di Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

3.2. Diagram Alir Penelitian

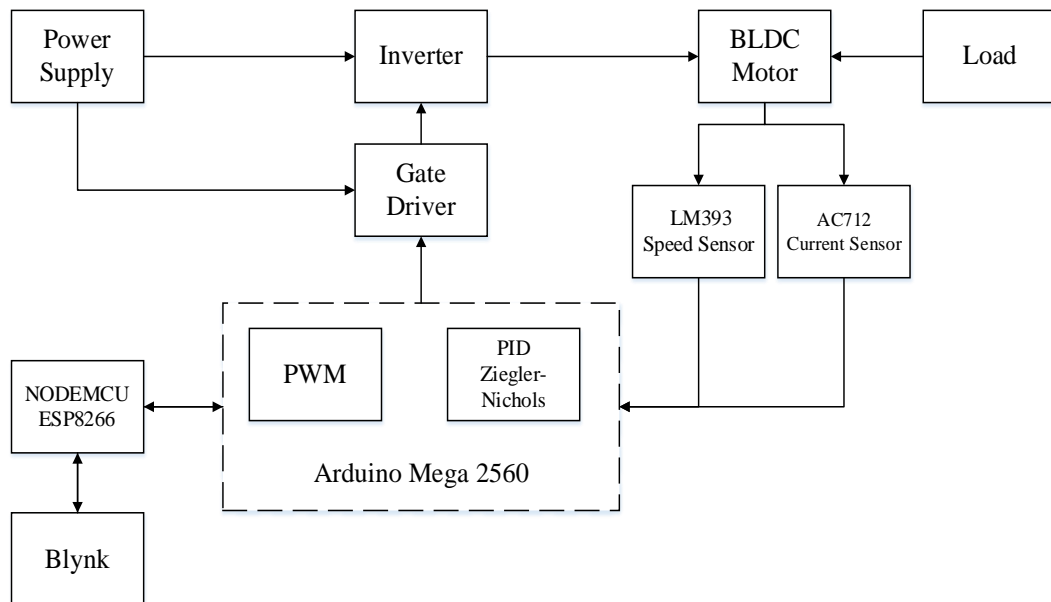
Diagram alir pada penelitian ini dijabarkan pada gambar 3.1. Di mana, tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dimulai dari studi literatur, perancangan alat dan simulasi, pemilihan alat dan bahan, perancangan alat dan sistem, pengujian alat dan sistem, pengambilan data, dan analisis data beserta kesimpulan.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.3. Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem yang terdapat pada penelitian ini diajabarkan pada gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Blok Diagram Blok Sistem

Adapun penjelasan dari masing-masing blok yang terdapat pada diagram blok sistem penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Power Supply 12 V*

Power Supply digunakan sebagai sumber daya untuk menyuplai ke rangkaian *gate driver* dan inverter.

2. Inverter

Inverter digunakan untuk mengatur kecepatan BLDC melalui pengaturan pada perubahan frekuensi.

3. *Gate Driver*

Gate driver berfungsi untuk mengirimkan sinyal dan menguatkan sinyal pemicu untuk *Gate* pada MOSFET untuk proses *switching* yang dihasilkan oleh Arduino Mega.

4. Motor BLDC

Pada penelitian ini, motor BLDC digunakan sebagai objek atau *plant* yang akan dikendalikan.

5. Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan berfungsi untuk mendeteksi nilai kecepatan yang dihasilkan dari motor BLDC.

6. Sensor Arus

Sensor Arus berfungsi untuk mengetahui arus yang dihasilkan motor induksi.

7. Arduino Mega

Arduino Mega digunakan untuk mengatur proses pensaklaran pada *inverter* dan melakukan pengendali PID melalui program. Serta menerima data hasil pembacaan sensor kecepatan yang kemudian mengirim data hasil tersebut ke NodeMCU, dan juga menerima data dari NodeMCU.

8. NodeMCU

NodeMCU berfungsi untuk menerima dan mengirimkan data menuju platform *IoT*. Di mana NodeMCU ini sebagai perantara Arduino mega dengan *Blynk* melalui komunikasi serial.

9. Beban

Beban digunakan untuk menguji sistem kendali yang digunakan pada penelitian.

10. *Blynk*

Blynk merupakan *software* yang digunakan untuk melakukan pengendalian dan pemantauan sistem melalui *smartphone* maupun *website*.

3.4. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi dua yaitu, Perangkat Keras (*Hardware*) dan Perangkat Lunak (*Software*). Untuk perangkat kerasnya antara lain:

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

Perangkat Lunak (*Software*) yang digunakan adalah

1. Arduino IDE 1.8.19
2. Easy Eda
3. Matlab R2017A
4. Microsoft Office
5. Blynk

3.5. Perancangan Sistem

Adapun tahapan-tahapan pada penelitian ini terbagi menjadi beberapa bagian, antara lain:

3.5.1. Studi Literatur

Pada tahapan ini, studi literatur dilakukan dengan mengumpulkan referensi dari beberapa buku maupun jurnal penelitian yang akan digunakan sebagai pendoman dalam melakukan perancangan alat. Dari referensi tersebut, mempelajari metode, rangkaian, komponen, teori yang mendukung penelitian ini. tahapan ini bertujuan

agar mendapatkan hasil penelitian yang sesuai dengan karakteristik dan prinsip kerja dari komponen-komponen yang digunakan.

3.5.2. Spesifikasi Motor BLDC

Motor BLDC digunakan sebagai *plant* atau objek yang dikendalikan pada penelitian ini terdapat pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Motor BLDC SunnySky x2212 KV980

Adapun spesifikasi dari Motor BLDC yang digunakan pada penelitian ini, diperlihatkan pada Tabel 3.1.

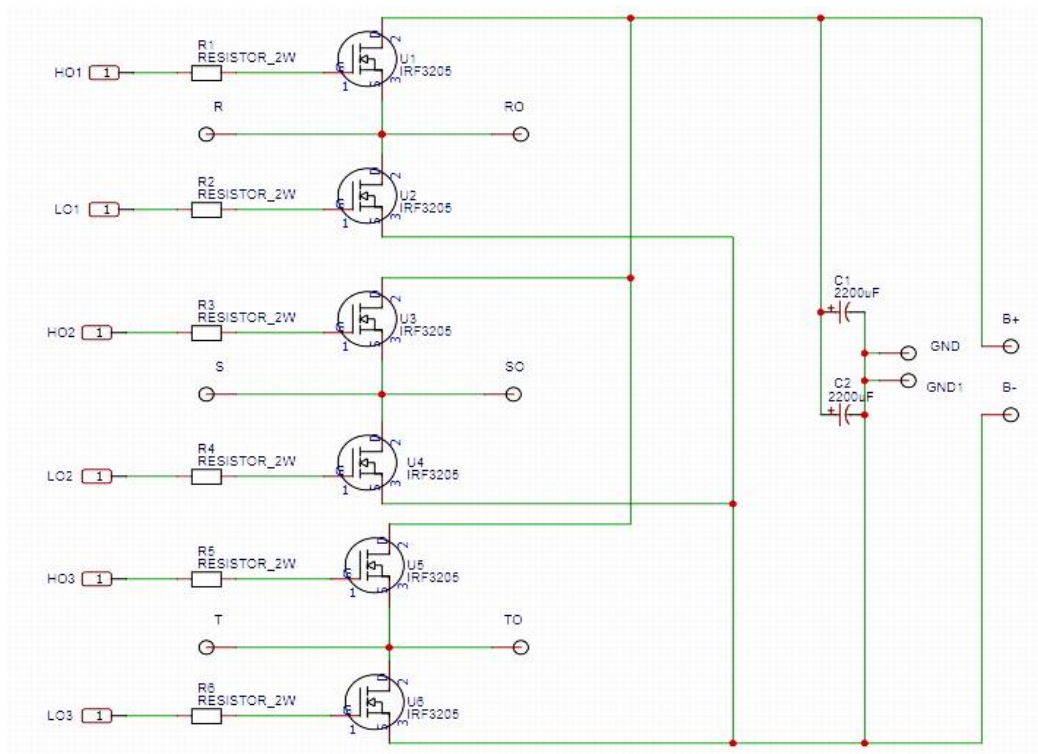
Tabel 3. 1 Spesifikasi Motor BLDC

Keterangan	Spesifikasi
Model Motor	BLDC SunnySky x2212 KV980
Rating Tegangan	11.1 V – 16.5 V
Rating Daya	412
Rating Arus	25A
Resistansi Motor	100 m Ω
Jumlah Kutub Rotor	14
Kv Motor	980

3.5.3. Perancangan Rangkaian Inverter

Jenis inverter yang digunakan pada penelitian ini adalah inverter catu-tegangan (*voltage-fed inverter-VFI*). Pada inverter ini menggunakan MOSFET IRF3205,

Resistor 100 Ω , dan Kapasitor Elco 3300 μF . Adapun rangkaian pada Inverter tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Rangkaian Inverter Tiga Fasa

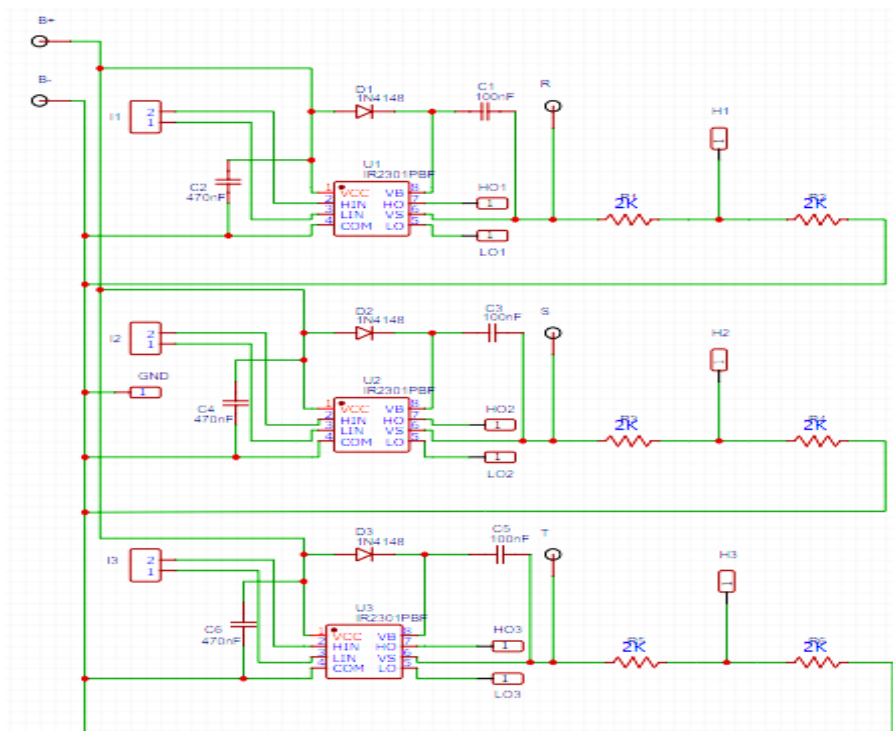
Berikut skema dari pensaklaran serta tegangan keluaran inverter dapat dilihat dari Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Skema Pensaklaran Inverter

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

3.5.4. Perancangan Rangkaian *Gate Driver*

Tegangan keluaran yang dihasilkan dari Arduino Mega sebesar 5 V sehingga belum dapat memicu Gate pada MOSFET secara optimal, sehingga dibutuhkan rangkaian *gate driver* untuk penghubung antara rangkaian kontrol dengan rangkaian daya. Di mana, tegangan 5V dari Arduino Mega akan dikuatkan dan dipindahkan sesuai dengan kebutuhan tegangan pada *Gate* untuk proses *switching* di inverter. Pada penelitian ini, komponen-komponen yang digunakan pada rangkaian *gate driver* terdiri atas IC IR2301, resistor 2000 Ω , resistor 1000 Ω , kapasitor 100nF, kapasitor 470nF, Dioda 1N4007. Adapapun rangkaian gate driver yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.5.

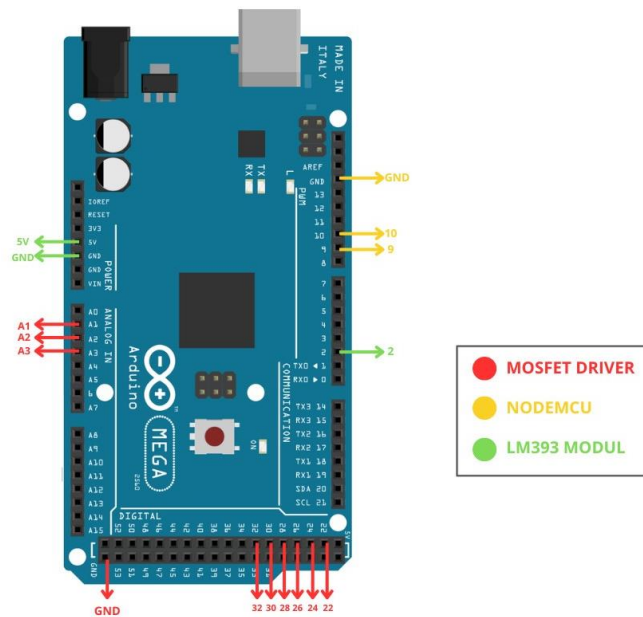


Gambar 3. 5 Rangkaian *Gate Driver*

3.5.5. Perancangan *Wiring* Arduino Mega

Board mikrokontroler Arduino mega 2560 digunakan pada penelitian ini. *Board* ini memiliki jumlah pin yang cukup banyak serta kemampuan penyimpanan data yang besar sehingga tepat untuk diaplikasikan pada penelitian ini. Terdapat tiga jenis perangkat yang dihubungkan dengan Arduino Mega ini, antara lain : MOSFET *driver*, NODEMCU, dan LM39. Adapun pada rangkaian *gate driver* untuk keperluan

switching dihubungkan dengan pin 22, pin 24, pin 26, pin 28, pin 30, pin 32, pin A1, pin A2, pin A3 dan pin GND. Kemudian untuk komunikasi serial dengan modul NodeMCU dihubungkan dengan pin 9, pin 10, serta pin GND. Dan untuk modul LM393 terhubung dengan pin 2, pin 5v, dan pin GND. Konfigurasi pin-pin tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 *Wiring* Arduino Mega

Untuk keterangan mengenai keperluan *switching* pada MOSFET dapat dilihat pada Tabel 3.3, seperti berikut:

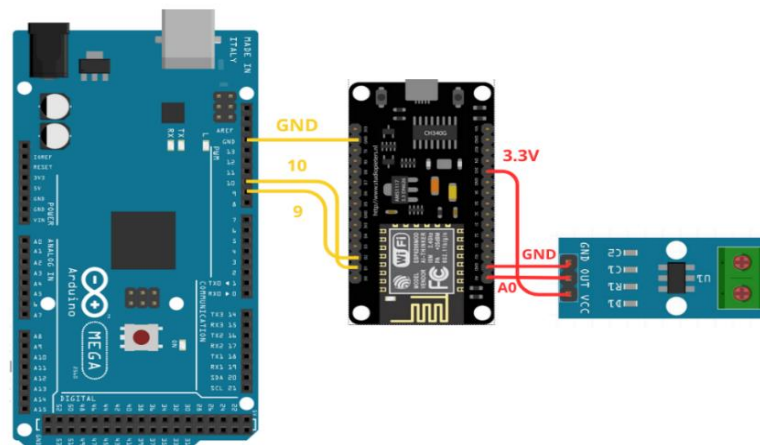
Tabel 3. 3 Konfigurasi Pensaklaran MOSFET

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

3.5.6. Perancangan *Wiring* NodeMCU

NodeMCU merupakan jenis mikrokontroler yang berbasis jaringan internet dan dengan tipe ESP8266. NodeMCU ini sebagai penghubung antara Arduino Mega dengan *platform* Blynk agar bisa berkomunikasi dengan jaringan internet. Antara Arduino Mega dengan NodeMCU terdapat komunikasi dua arah yaitu untuk pengendalian dan pemantauan. Untuk konfigurasi pada NodeMCU dapat dilihat pada gambar 3.7.

Pada NodeMCU menggunakan pin D1 dan pin D2 dan pada Arduino Mega pin 9 dan pin 10 untuk komunikasi serial yang terhubung dengan *jumper*. Pada modul NodeMCU juga terhubung dengan modul sensor ACS712 sebagai sensor arus. Di mana pada sensor tersebut menggunakan pin A0 untuk pembacaan nilai, pin 3.3V dan pin GND sebagai sumber untuk sensor tersebut.



Gambar 3. 7 *Wiring* NodeMCU

Berikut penjelasan pin *wiring* pada NodeMCU dengan Arduino Mega pada penelitian ini terdapat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Pin *Wiring* NodeMCU dengan Arduino Mega

Pin NodeMCU	Pin Arduino Mega
D1	10
D2	9
GND	GND

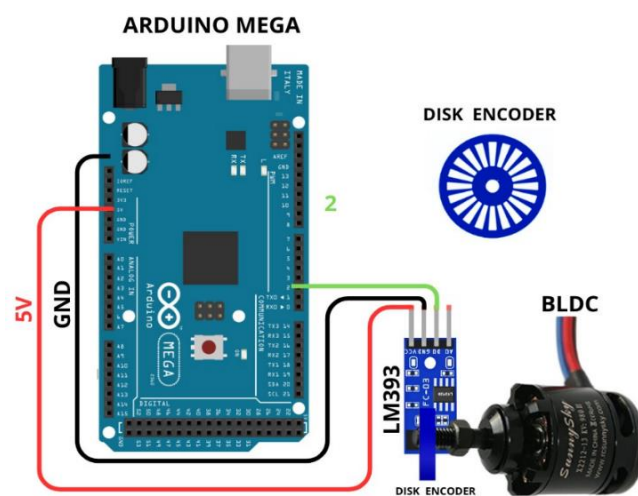
Adapun penjelasan pin wiring pada NodeMCU dengan modul AC712 pada penelitian ini terdapat pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Pin Wiring NodeMCU dengan Modul AC712

Pin NodeMCU	Pin Modul AC712
3.3 V	VCC
GND	GND
A0	OUT

3.5.7. Perancangan Wiring Sensor Kecepatan

Pembacaan nilai kecepatan pada motor BLDC pada penelitian ini, menggunakan modul LM393 sebagai sensor kecepatan. Sensor kecepatan terhubung dengan pin 2 (pin *interrupt 0*), pin 5 V dan pin GND sebagai sumber LM393. Pada prinsip kerja modul ini akan menghasilkan data berupa pulsa *ON* dan *OFF* sehingga pulsa tersebut perlu dikonversi agar dapat menghasilkan nilai kecepatan. Sensor ini terdiri dari atas *transmitter* dan *receiver*, di mana ketika terdeteksi objek di antara *transmitter* dan *receiver* maka sensor akan menghasilkan pulsa *ON*. Sebaliknya, ketika tidak terdeteksi objek di antara *transmitter* dan *receiver* maka sensor akan menghasilkan pulsa *OFF*. Dan selanjutnya nilai pulsa-pulsa *ON* dan *OFF* tersebut akan dikonversi oleh Arduino sehingga menghasilkan nilai kecepatan.



Gambar 3. 8 Wiring Sensor Kecepatan

Berikut penjelasan pin *wiring* sensor kecepatan dengan Arduino Mega pada penelitian ini terdapat pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Pin *Wiring* Sensor Kecepatan dengan Arduino Mega

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

Rumus yang digunakan dalam mengkonversi nilai pulsa yang terbaca oleh sensor LM939 tersebut agar menjadi nilai kecepatan melalui persamaan 3.1 di bawah ini

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

keterangan:

n = kecepatan (rpm)

P = jumlah pulsa yang dihasilkan sensor

H = jumlah lubang (*hole*) *disk encoder*

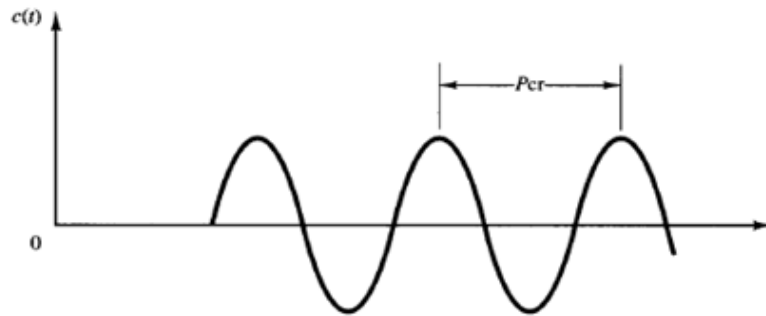
t = waktu *sampling* (detik)

3.5.8. Penentuan Parameter Pengendali PID

Penentuan parameter pengendali PID pada penelitian ini menggunakan metode osilasi atau metode ke-dua dari Metode Ziegler-Nichols. Untuk langkah-langkah dalam melakukan metode ini, antara lain:

1. Pertama, mengatur nilai K_i dan K_d menjadi nol ($K_p = 0$, $K_d = 0$).
2. Kemudian, mengatur nilai K_p hingga terjadi osilasi pada sistem dengan amplitudo yang relatif sama (*sustained oscillation*).
3. Selanjutnya, nilai K_p yang mengakibatkan sistem mencapai kondisi *sustained oscillation* tersebut merupakan nilai K_p sementara dan disebut juga dengan

ultimate gain K_u ($K_p = K_u$). Periode dari *sustained oscillation* tersebut *ultimate period* P_u .



Gambar 3. 9 Kondisi Sistem dengan Sustained Oscillation

4. Lalu, untuk menentukan nilai K_p , T_i , dan T_d berdasarkan pada Tabel 3.7 yang telah ditetapkan.

Tabel 3. 7 Tabel Penentuan Nilai PID Metode Ziegler-Nichols

Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_u$	-	-
PI	$0,45 K_u$	$\frac{P_u}{1,2}$	-
PID	$0,6 K_u$	$0,5 P_u$	$0,125 P_u$

5. Setelah mendapatkan nilai K_p , T_i , dan T_d dapat ditentukan berdasarkan pada persamaan berikut:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \dots\dots\dots (3.2)$$

$$K_d = K_p \times T_d \dots\dots\dots (3.3)$$

3.5.9. Pemrograman Arduino Mega dan NodeMCU

Pemrograman pada Arduino Mega 2560 dan NodeMCU dapat diterapkan melalui aplikasi Arduino IDE. Pada Gambar 3.10 menunjukkan tampilan dan program Arduino Mega dan NodeMCU di Arduino IDE

```

File Edit Sketch Tools Help
Arduino Mega or Mega 2...
PID2.ino
1 #include <SoftwareSerial.h>
2 SoftwareSerial ArduinoMega(10,9);
3
4 // SWITCHING
5 const byte S1 = 22; // MOSFET 1
6 const byte S4 = 24; // MOSFET 4
7 const byte S3 = 26; // MOSFET 3
8 const byte S6 = 28; // MOSFET 6
9 const byte S5 = 30; // MOSFET 5
10 const byte S2 = 32; // MOSFET 2
11 const int emfA = A1;
12 const int emfB = A2;
13 const int emfC = A3;

File Edit Sketch Tools Help
Mappi32
NODEMCUFIX.ino
1 #define BLYNK_PRINT Serial
2 #define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL6XkDDHGz6"
3 #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "MONITORING BLDC"
4 #define BLYNK_AUTH_TOKEN "v7jqXHFm10R64Yp02gn-7k7lecjZtuUb"
5
6 #include <SoftwareSerial.h>
7 #include <BlynkSimpleEsp8266.h>
8 #include <ESP8266WiFi.h>
9 #include "ACS712.h"
10
11 SoftwareSerial NodeMCU(D2, D1);

```

Gambar 3. 10 Program Arduino Mega dan NodeMCU

Adapun bagian-bagian program yang ditanamkan pada masing masing mikrokontroler 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 PID dan *SetPoint*
- Pemrograman untuk serial komunikasi data ke NodeMCU

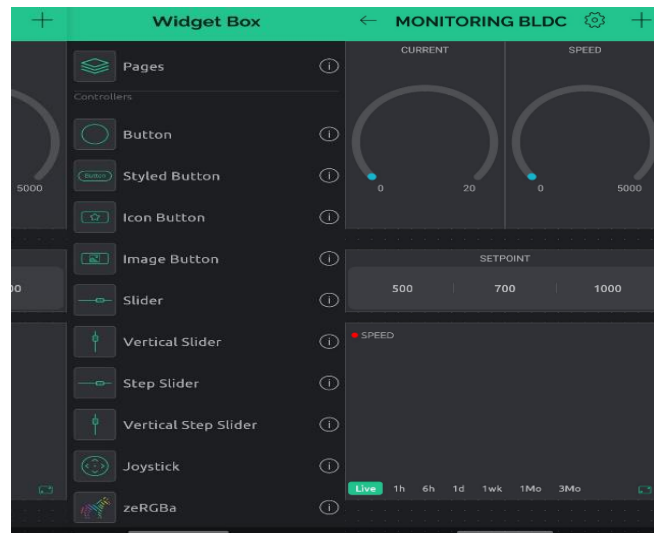
2. Pemrograman NodeMCU

Pemrograman pada NodeMCU terdiri dari:

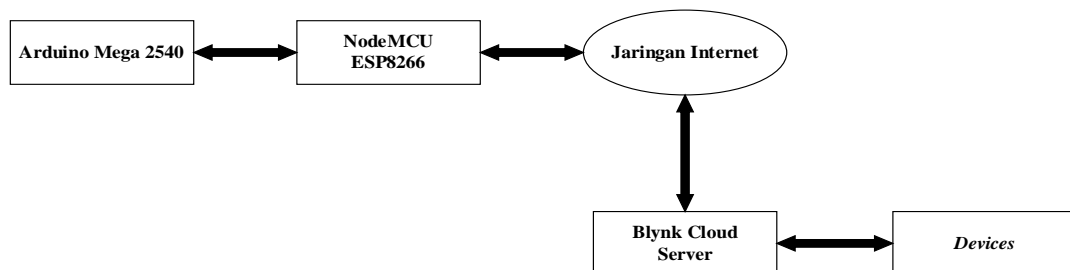
- Pemrograman untuk serial komunikasi dengan Arduino Mega
- Pemrograman untuk menerima data dari smartphone dan menampilkan data ke *smartphone*
- Pemrograman untuk pembacaan nilai arus dari modul ACS712 dan mengirim nilai arus untuk ditampilkan pada smartphone

3.5.10. Perancangan *Software* Blynk

Proses pengendalian dan pemantauan pada motor BLDC dilakukan secara *real time* melalui aplikasi di *smartphone* yaitu Blynk. Untuk menggunakan aplikasi tersebut, haruslah terhubung dengan jaringan internet. Pada aplikasi Blynk terdapat berbagai macam *widget* dengan berbagai fungsi yang dapat digunakan untuk keperluan IoT, seperti pemantauan dan pengontrolan sistem.



Gambar 3. 11 Tampilan Aplikasi Blynk



Gambar 3. 12 Blok Diagram Sistem Perancangan Perangkat Lunak

Berdasarkan gambar 3.12 menjelaskan bahwa, perangkat atau *devices* akan digunakan sebagai media pemantauan dan pengendalian, di mana aplikasi pada *devices* akan memberikan perintah dan terhubung jaringan internet. Kemudian data dari perangkat menuju *blynk cloud server*, setelah itu akan meneruskan data ke perangkat NodeMCU ESP8266 dan selanjutnya data tersebut akan diolah oleh mikrokontroler

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Telah dihasilkan sistem pengendalian dan pemantauan kecepatan motor BLDC menggunakan pengendali PID berbasis *Internet of Things*.
2. Parameter pada pengendali PID dengan metode Ziegler-Nichols menghasilkan nilai $K_p = 0,043974$, $K_i = 0,043974$, dan $K_d = 0,0109935$. Bahwa penerapan nilai parameter tersebut mampu menghasilkan respon sistem kecepatan motor BLDC yang baik tanpa terjadi *overshoot*.
3. Melalui aplikasi Blynk, penerapan teknologi IoT dalam sistem pengendalian dan pemantauan kecepatan motor BLDC dapat dilakukan secara jarak jauh menggunakan jaringan internet.

5.2. Saran

Adapun saran dari penelitian ini untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Diperlukan sensor kecepatan yang lebih akurat dan sensitif dalam pembacaan nilai kecepatan sehingga saat pengolahan nilai kecepatan dalam pengendalian *closed-loop* pada motor BLDC lebih presisi dan mudah.
2. Diperlukan pengembangan nilai pada K_p , K_i , dan K_d pengendali PID yang lebih akurat dan pengembangan metode *tuning* PID agar respon sistem yang dihasilkan lebih stabil dan bagus.
3. Diperlukan pengembangan pada *source code* arduino yang lebih sederhana dan terbaru sehingga proses kerja yang terdapat pada arduino dapat berjalan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Muslim, "Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Pengendali Fuzzy-PID," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [2] Harahap, Charles R; Komalasari, Endah; Clinton, Arnel Alberta, "Sistem Pengendalian Kecepatan Dua Motor Brushless DC (BLDC) dengan Nine Switch Inverter Menggunakan Metode PWM," Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2022.
- [3] Akbar, Danu; Riyadi, Slamet, "Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM (Pulse Width Modulation)," Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, 2018.
- [4] I.S, Rifdian; , Hartono, "Rancang Bangun Pulse Width Modulation (PWM) Sebagai Pengatur Kecepatan Motor DC Berbasis Mikrokontroler Arduino," Politeknik Penerbangan Surabaya, Surabaya, 2018.
- [5] A. T. Wahyudi, "Desain dan Simulasi Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Metode Fuzzy PID Controller Untuk Aplikasi Sepeda Motor Listrik," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.
- [6] Muhardian, Reza; , Krismadinata, "Kendali Kecepatan Motor DC Dengan Kontroller PID dan Antarmuka," Universitas Negeri Padang, Padang, 2020.
- [7] Erwan Eko Prasetyo, & Farid Ma'ruf, "Prototipe Sistem Pemantauan dan Pengendalian Beban Listrik Berbasis Internet of Things (IoT) dengan Aplikasi Cayenne," Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, 2018.
- [8] Miftaahul, Naufal; Mulyana, Defa; Yusuf, Ilham, "Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC(Direct Current) Menggunakan Cuk Converter," Universitas Hang Tuah, Surabaya, 2019.
- [9] Y. C. Wibowo and S. Riyadi, "Analisa Pembebanan pada Motor Brushless DC (BLDC)," Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, 2018.
- [10] Mundus, Ray; Khwee, Kho Hie; Hiendro, Ayong, "Rancang Bangun Inverter Dengan Menggunakan Sumber Baterai DC 12V," Universitas Tanjungpura, Pontianak, 2012.
- [11] Djatmiko, Istanto W, Bahan Ajar Elektronika Daya, Universitas Negeri Yogyakarta: 2010, 2010.

- [12] Ramadhani, Firnanda Nabilla; Luqman, Mohammad; , Siswoko, "Modul Inverter Satu Fasa menggunakan Mosfet dengan Driver EGS002 Pure Sin Wave," Politeknik Negeri Malang, Malang, 2021.
- [13] B. G. Nugroho, "Pengendalian Motor BLDC dengan Frekuensi Tinggi PWM Menggunakan Mikrokontroler," Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2022.
- [14] W. B. Pramono, "Rancang Bangun Electromagnetic Bootstrap Sebagai Gate Driver pada MOSFET," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2018.
- [15] Matalata, Hendi; Dewi, Rozlinda, "Desain Rangkaian Gate Driver Analog untuk Dual Mosfet Drivers," Universitas Batanghari, Jambi, 2021.
- [16] Soedjarwanto, Noer; , Budiarto; Nama, Gigih Forda, "Kontrol kecepatan motor induksi menggunakan teknologi IoT (Internet of Things)," Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2020.
- [17] Triwijaya, Santi; Prasetyo, Yuli; Wati, Trisna, "Kontrol Kecepatan Motor BLDC dengan PID - Firefly," Politeknik Perkeretaapian Indonesia, Surabaya, 2021.
- [18] D. S. Wardana, "Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter 9 Tingkat Berbasis IoT (Internet of Things).," Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2021.
- [19] M. D. Putri, A. Ma'arif and R. D. Puriyanto, "Pengendali Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Tuning Ziegler-Nichols," Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, 2022.
- [20] Hamid, Nasrul; Mansur, Ahyar;, "Penalaan Parameter PID dengan Metode Ziegler-Nichols untuk Optimasi Kontrol Kecepatan Motor pada Alat Spin Coater," Akademi Teknik Soroako, Luwu Timur, 2021.
- [21] Supono; Rijanto, Tri; Leksono, Jati Widyo, "Perancangan Sistem Kendali dan Monitoring Tegangan Motor 3 Fasa Berbasis Internet of Things Menggunakan Aplikasi Blynk," Universitas Hasyim Asy'ari, Surabaya, 2020.
- [22] Noviardi, "Desain Arsitektur Model pada Smar Aquaponic Berbasis Arduino IoT Cloud," vol. 5, 2022.
- [23] Budiman, Ade; Ramdhani, Yudi, "Pengontrolan Alat Elektronik Menggunakan Modul NodeMCU ESP8266 dengan Aplikasi Blynk Berbasis IoT," Universitas Adhirajasa Reswara Sanjaya, Bandung, 2021.