

**RANCANG BANGUN *CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER*
9 TINGKAT DENGAN PENGENDALI PID UNTUK PENGENDALIAN
KECEPATAN MOTOR INDUKSI VIA *SMARTPHONE***

(Skripsi)

Oleh

**RAHMAT FAJAR YANTO
NPM 1715031019**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

**RANCANG BANGUN *CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER*
9 TINGKAT DENGAN PENGENDALI PID UNTUK PENGENDALIAN
KECEPATAN MOTOR INDUKSI VIA *SMARTPHONE***

Oleh

RAHMAT FAJAR YANTO

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2021**

ABSTRAK

RANCANG BANGUN *CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER* 9 TINGKAT DENGAN PENGENDALI PID UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI VIA *SMARTPHONE*

Oleh

RAHMAT FAJAR YANTO

Motor induksi merupakan salah satu jenis motor arus bolak-balik yang banyak digunakan baik di industri maupun di rumah tangga. Meskipun demikian, motor induksi memiliki kelemahan di mana motor induksi tidak mampu mempertahankan kecepatannya pada saat terjadi perubahan beban. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membuat suatu alat yang mampu mengendalikan kecepatan motor induksi agar tetap sesuai dengan kecepatan yang diinginkan walaupun terjadi perubahan beban.

Proses pengaturan kecepatan motor induksi pada penelitian ini dilakukan melalui perubahan frekuensi yang dihasilkan oleh *cascaded H-bridge multilevel inverter* 9 tingkat menggunakan metode *switching* yang diatur melalui *board* mikrokontroler. Sementara itu, pengendalian kecepatan motor induksi dilakukan menggunakan sistem kendali *loop* tertutup dengan metode pengendali PID. Pengendali ini melakukan perubahan pada nilai frekuensi *multilevel inverter* agar menghasilkan kecepatan motor induksi yang sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.

Penentuan parameter pengendali PID dilakukan menggunakan metode osilasi Ziegler-Nichols. Metode ini menghasilkan nilai $K_p = 0,0132$, $K_i = 0,0132$, dan $K_d = 0,0033$. Nilai parameter tersebut menghasilkan respon kecepatan motor induksi dengan rata-rata *rise time* selama 2,775 detik, *settling time* selama 4,112 detik, dan tanpa *overshoot*. Parameter tersebut juga mampu mengembalikan kecepatan motor induksi ke nilai *set point* kembali ketika diberi beban. Selain itu, kecepatan motor induksi pada penelitian ini dapat diatur dan dimonitor di mana saja dan kapan saja secara *real time* melalui sebuah aplikasi *smartphone*.

Kata kunci: motor induksi, *multilevel inverter*, *cascaded H-bridge multilevel inverter* 9 tingkat, pengendali PID, metode osilasi Ziegler-Nichols, *smartphone*

ABSTRACT

DESIGN OF 9-LEVEL CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER WITH PID CONTROLLER FOR SPEED CONTROL OF INDUCTION MOTOR VIA SMARTPHONE

By

RAHMAT FAJAR YANTO

Induction motor is one type of alternating current motor that is widely used both in industry and at home. However, the induction motor has a weakness where the induction motor is not able to maintain its speed when there is a change in load. Therefore, this study aims to create a device that is able to control the speed of an induction motor so that it remains in accordance with the desired speed even though there is a change in load.

The induction motor speed regulation process in this study was carried out by changing the frequency generated by 9-level cascaded H-bridge multilevel inverter using a switching method that was regulated through a microcontroller board. Meanwhile, the induction motor speed control was carried out using a closed-loop control system with PID controller method. This controller makes changes to the frequency value of the multilevel inverter in order to produce the induction motor speed according to the desired speed.

Determination of PID controller parameters was carried out using Ziegler-Nichols oscillation method. This method produces values of $K_p = 0.0132$, $K_i = 0.0132$, and $K_d = 0.0033$. This parameter value produces an induction motor speed response with average rise time of 2.775 seconds, settling time of 4.112 seconds, and without overshoot. These parameters are also able to return the speed of the induction motor to its set point value when it is given a load. In addition, the speed of the induction motor in this study can be set and monitored anywhere and anytime in real-time through a smartphone app.

Keywords: induction motor, multilevel inverter, 9-level cascaded H-bridge multilevel inverter, PID controller, Ziegler-Nichols oscillation method, smartphone

Judul Skripsi

**: RANCANG BANGUN CASCADED
H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER
9 TINGKAT DENGAN PENGENDALI PID
UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN
MOTOR INDUKSI VIA SMARTPHONE**

Nama Mahasiswa

: Rahmat Fajar Yanto

Nomor Pokok Mahasiswa

: 1715031019

Program Studi

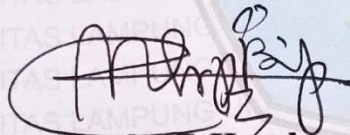
: Teknik Elektro

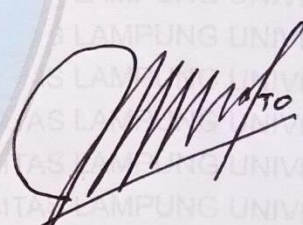
Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

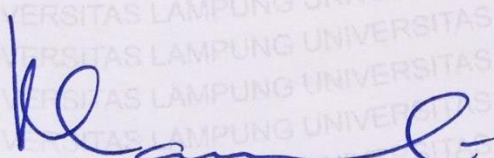

Dr. Eng. Charles R. Harahap, S.T., M.T.
NIP. 196912111999031001

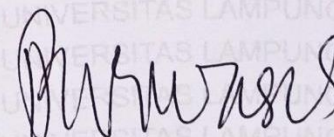

Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.
NIP. 196311141999031001

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program Studi Teknik Elektro


Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D. Eng.
NIP. 197007192000121001

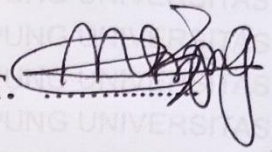

Dr. Eng. Nining Purwasih, S.T., M.T.
NIP. 197404222000122001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

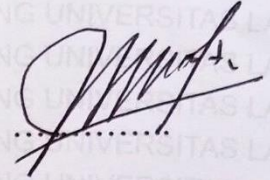
Ketua

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



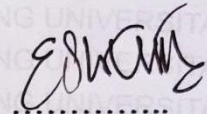
Sekretaris

: **Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.**



Penguji

Bukan pembimbing : **Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng.

NIP. 196207171987031002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **15 Oktober 2021**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (Sarjana), baik di Universitas Lampung maupun perguruan tinggi lainnya. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dari Komisi Pembimbing. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.

Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya tulis ini, serta sanksi lainnya sesuai norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Bandar Lampung, 19 Oktober 2021



Rahmat Fajar Yanto
NPM 1715031019

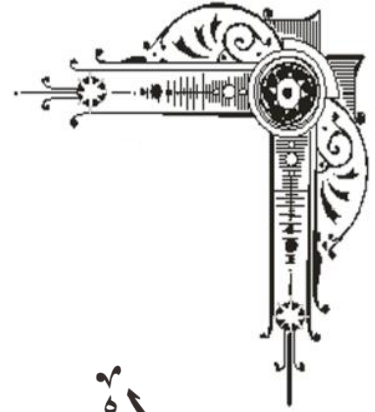
RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, 08 Mei 1999. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Prayitno dan Ibu Maylanah.

Penulis menempuh pendidikan taman kanak-kanak di TK YWKA (Yayasan Wanita Kereta Api) pada tahun 2004-2005, sekolah dasar di SDN 1 Sawah Lama Bandar Lampung pada tahun 2005-2011, sekolah menengah pertama di SMPN 5 Bandar Lampung pada tahun 2011-2014, dan sekolah menengah atas di SMAN 5 Bandar Lampung pada tahun 2014-2017.

Tahun 2017, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah menjadi anggota Departemen Pendidikan dan Pengembangan Diri Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) Unila pada tahun 2018-2019. Kemudian, penulis pernah menjadi Asisten Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi Unila tahun 2019-2020. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik Unila pada tahun 2020-2021. Tahun 2020, penulis melakukan kerja praktik di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Natar dengan judul penelitian *“Pengujian Tahanan Isolasi dan Tahanan Kontak Pemutus Tenaga 20 kV Kubikel Trafo Daya 3 di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Natar”*.



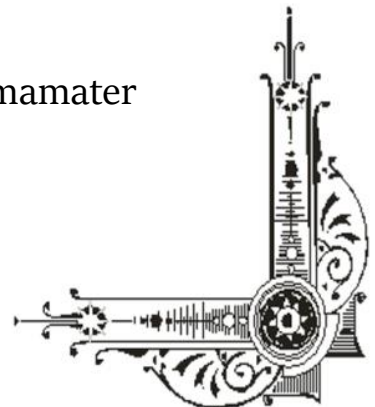
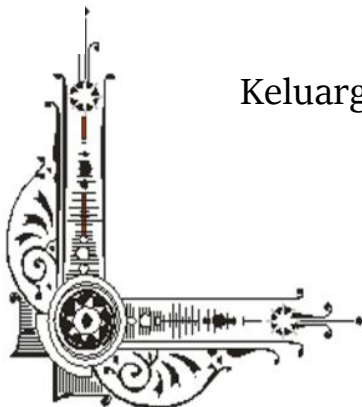
بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

SKRIPSI INI KUPERSEMBAHKAN UNTUK

Ayah dan Ibu Tercinta
Prayitno dan Maylanah

Adik Tersayang
Syafira Balqis Azzahra
Asyifa Trivebayusan Azzahra

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater





MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(QS. Al-Insyirah : 5)

“Tidak ada balasan kebaikan kecuali kebaikan (pula)”

(QS. Ar-Rahman : 60)

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi (pula) kamu menyukai sesuatu, padahal ia amat buruk bagimu, Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui”

(QS. Al-Baqarah : 216)

“The greatest failure is not to try”

(Debbi Fields)



SANWACANA

Alhamdulillah rabbil 'alamin, puji syukur kehadiran Allah SWT, karena atas rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, suri tauladan bagi seluruh umat manusia.

Skripsi ini yang berjudul “*Rancang Bangun Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter 9 Tingkat dengan Pengendali PID untuk Pengendalian Kecepatan Motor Induksi via Smartphone*” merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Drs. Ir. Suharno, Ph.D., IPU., ASEAN Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung;
2. Bapak Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D. selaku Wakil Dekan Bidang Akademik dan Kerja Sama, Bapak Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. selaku Wakil Dekan Bidang Umum dan Keuangan, dan Bapak Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D. selaku Wakil Dekan Bidang Kemahasiswaan dan Alumni Fakultas Teknik, Universitas Lampung;
3. Bapak Khairudin, S.T., M.Sc., Ph.D.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung;
4. Ibu Dr. 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 Dosen Pembimbing Utama sekaligus Dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa memberikan

bimbingan, kritik, dan saran selama perkuliahan serta dalam proses penyelesaian skripsi ini;

6. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto, M.T. selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang banyak memberikan bimbingan, kritik, dan saran dalam proses penyelesaian skripsi ini;
7. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang banyak memberikan masukan serta saran-saran selama proses penyelesaian skripsi ini;
8. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah mendidik dan membimbing penulis selama menyelesaikan studi;
9. Segenap Staff Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik yang telah membantu penulis dalam hal administrasi dan keperluan lainnya;
10. Teman-teman Jurusan Teknik Elektro Angkatan 2017 yang selalu membantu, memberi doa, dan semangat dalam penyusunan skripsi ini;
11. Semua pihak yang terlibat dalam penyelesaian skripsi ini yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak. Semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat.

Bandar Lampung, 19 Oktober 2021

Rahmat Fajar Yanto

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Manfaat Penelitian	5
1.5. Batasan Masalah.....	5
1.6. Hipotesis.....	6
1.7. Sistematika Penulisan.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1. Motor Induksi.....	8
2.1.1. Klasifikasi Motor Induksi.....	8
2.1.2. Konstruksi Motor Induksi	9
2.1.3. Prinsip Kerja Motor Induksi.....	11
2.1.4. Pengaturan Kecepatan Motor Induksi	13
2.2. <i>Multilevel Inverter</i>	15
2.2.1. Topologi <i>Multilevel Inverter</i>	16
2.2.2. Gelombang Keluaran <i>Multilevel Inverter</i>	19
2.3. MOSFET	20
2.3.1. <i>N-Channel</i> MOSFET.....	20
2.3.2. <i>P-Channel</i> MOSFET.....	21
2.4. PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	21
2.5. HCPL 3120.....	23

2.6. Modul Sensor Kecepatan LM393	24
2.7. Arduino Mega 2560	25
2.8. Pengendali PID.....	27
2.8.1. Pengendali Proporsional.....	28
2.8.2. Pengendali Integral.....	28
2.8.3. Pengendali Derivatif.....	29
2.8.4. Persamaan Pengendali PID	29
2.9. IoT (<i>Internet of Things</i>).....	32
2.10. NodeMCU ESP288	33
2.11. Blynk.....	33
III. METODE PENELITIAN	36
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	36
3.2. Diagram Alir Penelitian	36
3.3. Diagram Blok Sistem	37
3.4. Alat dan Bahan.....	39
3.4.1. Perangkat Keras.....	39
3.4.2. Perangkat Lunak.....	40
3.5. Perancangan Sistem	40
3.5.1. Studi Literatur	41
3.5.2. Spesifikasi Motor Induksi yang Digunakan	41
3.5.3. Perancangan Rangkaian <i>Multilevel Inverter</i>	42
3.5.4. Perancangan Rangkaian <i>Gate Driver</i>	46
3.5.5. Perancangan Rangkaian <i>DC Power Supply</i>	47
3.5.6. Perancangan <i>Wiring</i> Arduino Mega.....	48
3.5.7. Perancangan <i>Wiring</i> Sensor Kecepatan.....	49
3.5.8. Perancangan <i>Wiring</i> NodeMCU.....	51
3.5.9. Penentuan Parameter Pengendali PID	52
3.5.10. Perancangan Aplikasi <i>Smartphone</i>	53
3.5.11. Pemrograman Arduino Mega dan NodeMCU	54
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	56
4.1. Hasil Rancangan.....	56
4.1.1. <i>Wiring</i> Arduino Mega	56

4.1.2. Hasil Rancangan Rangkaian <i>Gate Driver</i>	57
4.1.3. Hasil Rancangan Rangkaian <i>DC Power Supply</i>	58
4.1.4. Hasil Rancangan Rangkaian <i>Cascaded H-bridge Multilevel Inverter</i>	58
4.1.5. Hasil Rancangan Rangkaian Penaik Tegangan	59
4.1.6. <i>Wiring</i> Rangkaian Sensor Kecepatan	60
4.1.7. <i>Wiring</i> Rangkaian Sensor Arus	61
4.1.8. <i>Wiring</i> NodeMCU ESP8266	61
4.1.9. Hasil Penentuan Parameter Pengendali PID	62
4.1.10. Hasil Rancangan Aplikasi <i>Smartphone</i>	64
4.1.11. Hasil Rancangan Rangkaian Beban	66
4.1.12. Hasil Rancangan Keseluruhan Rangkaian	66
4.2. Pengujian Hasil Rancangan.....	67
4.2.1. Pengujian Rangkaian <i>Multilevel Inverter</i>	67
4.2.1.1. Bentuk Gelombang dan Frekuensi	67
4.2.1.2. Tegangan Keluaran <i>Multilevel Inverter</i>	70
4.2.2. Pengujian Sensor Kecepatan	72
4.2.3. Pengujian Rangkaian Penaik Tegangan	76
4.2.4. Pengujian Sensor Arus	77
4.2.5. Perhitungan Torsi Motor Induksi	78
4.2.6. Pengujian Parameter Pengendali PID	83
4.2.6.1. Respon Kecepatan Motor Induksi pada Kondisi tanpa Beban.....	83
4.2.6.2. Respon Kecepatan Motor Induksi pada Kondisi Berbeban	86
4.2.7. Pengujian Aplikasi <i>Smartphone</i>	87
V. KESIMPULAN DAN SARAN	90
5.1. Kesimpulan	90
5.2. Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA	92
LAMPIRAN	96

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Spesifikasi Arduino Mega 2560 [21]	26
3.1 Proses Pensaklaran <i>Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter 9 Tingkat</i>	43
3.2 Waktu Pensaklaran setiap Tingkat Tegangan Keluaran.....	45
3.3 Pin Arduino Mega untuk Pensaklaran MOSFET	49
3.4 Pin <i>Wiring</i> Sensor Kecepatan dengan Arduino Mega.....	51
3.5 Pin <i>Wiring</i> NodeMCU dengan Arduino Mega.....	52
3.6 Pin <i>Wiring</i> NodeMCU dengan Modul CS712	52
3.7 Tabel Metode Osilasi Ziegler-Nichols	53
4.1 Hasil Perhitungan Parameter Pengendali PID Menggunakan Metode Osilasi Ziegler-Nichols	64
4.2 Frekuensi yang Dihasilkan <i>Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter 9 Tingkat</i>	70
4.3 Tegangan Keluaran <i>Multilevel Inverter 9 Tingkat</i>	72
4.4 Tingkat Akurasi Modul Sensor Kecepatan LM393	74
4.5 Tegangan Keluaran Rangkaian Penaik Tegangan.....	76
4.6 Pengaruh Perubahan Frekuensi <i>Multilevel Inverter</i> Terhadap Arus Motor Induksi	77
4.7 Pengaruh Perubahan Frekuensi <i>Multilevel Inverter</i> Terhadap Torsi Motor Induksi	81

4.8 Pengaruh Perubahan Torsi terhadap Kecepatan Motor Induksi.....	82
4.9 Respon Kecepatan Motor Induksi.....	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Konstruksi Motor Induksi [8]	9
2.2 Stator Motor Induksi [9]	10
2.3 Rotor Motor Induksi [9].....	11
2.4 Karakteristik Perubahan Frekuensi terhadap Kecepatan [1].....	13
2.5 Karakteristik Perubahan Tegangan terhadap Kecepatan [1].....	14
2.6 Karakteristik Perubahan Tahanan Luar terhadap Kecepatan [1]	15
2.7 <i>Diode Clamped Multilevel Inverter</i> [10].....	17
2.8 <i>Flying Capacitor Multilevel Inverter</i> [10]	18
2.9 <i>Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter</i> [10].....	18
2.10 Bentuk Gelombang Keluaran <i>Multilevel Inverter</i> 9 Tingkat [13]	19
2.11 Bagian-Bagian MOSFET [14]	20
2.12 Prinsip Kerja <i>N-Channel</i> MOSFET [14]	20
2.13 Prinsip Kerja <i>P-Channel</i> MOSFET [14].....	21
2.14 Pulsa PWM [15].....	21
2.15 IC HCPL 3120 [16].....	23
2.16 Modul Sensor Kecepatan LM393 [18]	24
2.17 Arduino Mega 2560 [19]	25
2.18 Diagram Blok Pengendali PID [6].....	30
2.19 Grafik Respon Transien Sistem [20].....	32

2.20	NodeMCU ESP8266 [22]	33
2.21	Server Blynk [23].....	35
3.1	Diagram Alir Penelitian	36
3.2	Diagram Blok Sistem	37
3.3	Motor Induksi yang Digunakan pada Penelitian.....	41
3.4	Rangkaian <i>Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter</i> 9 Tingkat	42
3.5	Sudut Penyalaan MOSFET pada setiap Tingkat Tegangan	44
3.6	Rangkaian <i>Gate Driver</i>	47
3.7	Rangkaian <i>DC Power Supply</i>	47
3.8	Perancangan <i>Wiring</i> Arduino Mega 2560.....	48
3.9	Perancangan <i>Wiring</i> Sensor Kecepatan dengan Arduino Mega	50
3.10	Perancangan <i>Wiring</i> NodeMCU dengan Arduino Mega dan Modul ACS712.....	51
3.11	Kondisi <i>Sustained Oscillation</i> pada Sistem	53
3.12	Tampilan Aplikasi Blynk.....	54
3.13	Tampilan Aplikasi Arduino IDE.....	55
4.1	<i>Wiring</i> Arduino Mega	57
4.2	Hasil Racangan Rangkaian <i>Gate Driver</i>	58
4.3	Hasil Racangan Rangkaian <i>DC Power Supply</i>	58
4.4	Hasil Racangan <i>Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter</i> 9 Tingkat	59
4.5	Hasil Racangan Rangkaian Penaik Tegangan	60
4.6	<i>Wiring</i> Rangkaian Sensor Kecepatan	61
4.7	<i>Wiring</i> Rangkaian Sensor Arus	61
4.8	<i>Wiring</i> NodeMCU ESP8266	62

4.9	Respon Sistem untuk Nilai K_u sebesar 0,022	63
4.10	Hasil Rancangan Aplikasi <i>Smartphone</i>	65
4.11	Hasil Rancangan Rangkaian Beban	66
4.12	Hasil Rancangan Keseluruhan Rangkaian	67
4.13	Gelombang Keluaran <i>Multilevel Inverter</i> pada Frekuensi 25 Hz	68
4.14	Gelombang Keluaran <i>Multilevel Inverter</i> pada Frekuensi 35 Hz	68
4.15	Gelombang Keluaran <i>Multilevel Inverter</i> pada Frekuensi 45 Hz	69
4.16	Gelombang Keluaran <i>Multilevel Inverter</i> pada Frekuensi 55 Hz	69
4.17	Tegangan Keluaran <i>Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter</i> 9 Tingkat: (a) pada Frekuensi 25 Hz, (b) pada Frekuensi 35 Hz, (c) pada Frekuensi 45 Hz, (d) pada Frekuensi 55 Hz	71
4.18	Kecepatan Motor Induksi Hasil Pembacaan Modul LM393 pada Frekuensi 30 Hz	72
4.19	Kecepatan Motor Induksi Hasil Pembacaan Modul LM393 pada Frekuensi 40 Hz	73
4.20	Kecepatan Motor Induksi Hasil Pembacaan Modul LM393 pada Frekuensi 50 Hz	73
4.21	Kecepatan Motor Induksi Hasil Pembacaan Modul LM393 pada Frekuensi 60 Hz	74
4.22	Grafik Hubungan antara Frekuensi <i>Multilevel Inverter</i> dengan Kecepatan Motor Induksi.....	75
4.23	Tegangan Keluaran Rangkaian Penarik Tegangan: (a) pada Frekuensi 25 Hz, (b) pada Frekuensi 35 Hz, (c) pada Frekuensi 45 Hz, (d) pada Frekuensi 55 Hz	76

4.24	Arus yang Dihasilkan Motor Induksi: (a) pada Frekuensi 25 Hz, (b) pada Frekuensi 35 Hz, (c) pada Frekuensi 45 Hz, (d) pada Frekuensi 55 Hz	77
4.25	Grafik Hubungan antara Frekuensi <i>Multilevel Inverter</i> dengan Arus Motor Induksi.....	78
4.26	Grafik Hubungan antara Frekuensi <i>Multilevel Inverter</i> dengan Torsi Motor Induksi.....	82
4.27	Grafik Hubungan antara Torsi dengan Kecepatan Motor Induksi.....	83
4.28	Grafik Respon Kecepatan Motor pada Kondisi Tanpa Beban dengan <i>Set Point</i> 900 rpm	84
4.29	Grafik Respon Kecepatan Motor pada Kondisi Tanpa Beban dengan <i>Set Point</i> 1100 rpm	84
4.30	Grafik Respon Kecepatan Motor pada Kondisi Tanpa Beban dengan <i>Set Point</i> 1300 rpm	85
4.31	Grafik Respon Kecepatan Motor pada Kondisi Tanpa Beban dengan <i>Set Point</i> 1500 rpm	86
4.32	Grafik Respon Kecepatan Motor pada Kondisi Berbeban.....	87
4.33	Proses <i>Controlling</i> dan <i>Monitoring</i> Kecepatan Motor Induksi via Aplikasi <i>Smartphone</i> : (a) pada <i>Set Point</i> 900 rpm, (b) pada <i>Set</i> <i>Point</i> 1100 rpm	88
4.34	Proses <i>Controlling</i> dan <i>Monitoring</i> Kecepatan Motor Induksi via Aplikasi <i>Smartphone</i> : (a) pada <i>Set Point</i> 1300 rpm, (b) pada <i>Set</i> <i>Point</i> 1500 rpm	89

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini, teknologi berkembang semakin pesat. Penggunaan transportasi konvensional pun perlahan mulai beralih ke transportasi listrik. Hal ini karena transportasi listrik bebas emisi dan ramah lingkungan. Selain itu, beberapa sektor di industri pun mulai beralih dari penggunaan tenaga manusia ke penggunaan teknologi. Salah satu teknologi yang banyak digunakan baik pada transportasi listrik, industri, maupun rumah tangga adalah motor induksi. Hal ini tentunya tidak terlepas dari keunggulan yang dimiliki oleh motor induksi, yaitu memiliki konstruksi yang sederhana, pemeliharaannya mudah, harga yang relatif murah, dan memiliki efisiensi yang tinggi. Selain keunggulannya tersebut, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk meningkatkan unjuk kerja dari motor induksi, antara lain kecepatan yang diharapkan dapat dikendalikan, torsi yang dapat memenuhi beban, dan dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi. Pada umumnya motor induksi bekerja dengan kecepatan yang konstan, apabila beban bertambah maka kecepatannya akan menurun, sehingga motor induksi cocok digunakan pada keperluan dengan kondisi beban yang konstan [1]. Namun pada beberapa aplikasi, diperlukan kecepatan motor induksi yang konstan walaupun terjadi perubahan beban, sehingga perlu dilakukannya pengendalian kecepatan

motor induksi. Langkah pertama yang diperlukan untuk melakukan pengendalian kecepatan motor induksi ialah melakukan pengaturan kecepatan motor induksi.

Terdapat beberapa cara untuk mengatur kecepatan motor induksi, antara lain dengan merubah frekuensi dan jumlah kutub. Pada praktiknya, pengaturan kecepatan motor induksi dengan mengubah jumlah kutub cukup sulit dilakukan karena perlu mengubah konstruksi dari motor induksi, sedangkan pengaturan kecepatan motor induksi dengan cara mengubah frekuensi lebih mudah untuk dilakukan karena tidak mengubah konstruksi dari motor induksi yang sudah ada. Pengaturan kecepatan motor induksi dengan mengubah frekuensi dapat dilakukan menggunakan *inverter* [2].

Inverter umumnya digunakan untuk mengubah listrik arus searah (DC) menjadi listrik arus bolak-balik (AC), namun *inverter* dengan desain tertentu dapat digunakan untuk menghasilkan frekuensi yang dapat diatur nilainya. Frekuensi sangat erat kaitannya dengan kecepatan motor induksi. Kecepatan motor induksi sebanding dengan frekuensi sumber, semakin besar frekuensi yang diberikan pada motor, maka putaran motor induksi menjadi semakin cepat dan begitu sebaliknya.

Inverter konvensional pada umumnya hanya menghasilkan dua level/tingkat tegangan keluaran. Hal ini menyebabkan timbulnya distorsi harmonik yang dapat menimbulkan panas pada peralatan dan dapat mengurangi masa pakai (*lifetime*) dari peralatan [3]. Harmonik ini tidak dapat dihilangkan, tetapi bisa untuk dikurangi. Cara untuk mengurangi distorsi harmonik pada *inverter* adalah dengan menambah level/tingkat tegangan yang dihasilkan *inverter* konvensional. Penambahan level/tingkat tegangan ini dapat dilakukan dengan

mengubah topologi *inverter* konvensional menjadi topologi *multilevel inverter*. Terdapat beberapa jenis *multilevel inverter* yang umum digunakan, antara lain *diode clamped multilevel inverter*, *flying capacitor multilevel inverter*, dan *cascaded H-bridge multilevel inverter*. Pada topologi *multilevel inverter*, semakin banyak level/tingkat tegangan yang dihasilkan, maka THD (*Total Harmonics Distorsion*) yang dihasilkan akan berkurang dan menghasilkan keluaran yang semakin baik [4]. Berdasarkan ketiga jenis *multilevel inverter* tersebut, *cascaded H-bridge multilevel inverter* menjadi salah satu yang cukup banyak digunakan. *Cascaded H-bridge multilevel inverter* memiliki topologi yang sederhana serta mudah untuk dilakukan penambahan level tegangan keluaran.

Selain pemilihan jenis *inverter*, sistem kendali juga diperlukan untuk mengendalikan kecepatan motor induksi agar sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Terdapat dua jenis sistem kendali, yaitu dengan sistem kendali *loop* terbuka dan *loop* tertutup. Pengendalian kecepatan motor induksi dengan sistem *loop* terbuka menjadi kurang efektif karena ketika terjadi perubahan beban, kecepatan juga akan berubah tanpa adanya koreksi terhadap perubahan yang terjadi. Permasalahan ini dapat diatasi dengan menggunakan sistem *loop* tertutup di mana perubahan pada sisi *output* digunakan sebagai *input* dan dibandingkan dengan nilai referensi, sehingga *output* akan tetap sesuai dengan referensi atau nilai yang diinginkan [5].

Sistem kendali *loop* tertutup umumnya menggunakan pengendali PID. Pengendali PID akan menghitung dan meminimalkan nilai selisih/*error* antara keluaran dengan masukan/referensi [6]. Pengendali PID akan mempertahankan kecepatan motor induksi agar tetap sesuai dengan kecepatan referensi. Pengendali

ini akan otomatis mengubah nilai frekuensi yang dapat mengubah kecepatan motor induksi agar tetap sesuai dengan kecepatan yang diinginkan [7].

Kecepatan motor induksi biasanya diatur dan dimonitor pada panel kendali yang terletak pada suatu ruangan tertentu. Dengan semakin berkembangnya teknologi, kecepatan motor induksi dapat diatur dan dimonitor di mana saja dan kapan saja dari jarak yang dekat maupun jauh dengan menggunakan IoT (*Internet of Things*).

Berdasarkan latar belakang tersebut, timbulah suatu ide untuk membuat *inverter* berjenis *cascaded H-bridge multilevel inverter* 9 tingkat dengan sistem *loop* tertutup menggunakan pengendali PID untuk mengendalikan kecepatan motor induksi yang dapat diatur dan dimonitor di mana saja dan kapan saja dari jarak dekat maupun jauh melalui *smartphone*.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang mendorong dilakukannya penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Bagaimana membuat suatu *inverter* yang dapat digunakan dalam pengendalian kecepatan motor induksi?
2. Bagaimana merancang sistem kendali yang dapat mengendalikan kecepatan motor induksi sesuai dengan kecepatan yang diinginkan?
3. Bagaimana cara mengatur dan memonitor kecepatan motor induksi dari jarak dekat maupun jauh?

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun beberapa tujuan dari dilakukannya penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Membuat rancang bangun *cascaded H-bridge multilevel inverter* 9 tingkat yang dapat digunakan dalam pengendalian kecepatan motor induksi.
2. Merancang sistem kendali *loop* tertutup dengan pengendali PID yang dapat mengendalikan kecepatan motor induksi sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.
3. Membuat aplikasi *smartphone* yang dapat mengatur dan memonitor kecepatan motor induksi dari jarak dekat maupun jauh.

1.4. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan setelah dilakukannya penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Menghasilkan suatu *inverter* dengan kualitas daya yang baik yang dapat digunakan dalam pengendalian kecepatan motor induksi.
2. Menghasilkan sistem kendali yang dapat mengendalikan kecepatan motor induksi sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.
3. Menghasilkan sebuah aplikasi *smartphone* yang dapat mengatur dan memonitor kecepatan motor induksi dari jarak dekat maupun jauh.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Jenis motor induksi yang digunakan adalah motor induksi satu fasa.

2. Jenis *inverter* yang dirancang adalah *cascaded H-bridge multilevel inverter* 9 tingkat.
3. *Board* mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Mega 2566 dan NodeMCU ESP8266.
4. Sensor yang digunakan adalah modul LM393 dan modul ACS712.
5. Sistem kendali yang digunakan adalah sistem kendali *loop* tertutup dengan menggunakan pengendali PID.
6. *Software* yang digunakan untuk membuat aplikasi *smartphone* adalah Blynk.

1.6. Hipotesis

Cascaded H-bridge multilevel inverter 9 tingkat dapat menghasilkan keluaran dengan THD (*Total Harmonic Distortion*) yang rendah dan dapat digunakan dalam pengendalian kecepatan motor induksi. Proses *switching* pada *inverter* diatur dengan menggunakan *board* mikrokontroler Arduino Mega 2560. Sistem kendali *loop* tertutup dengan pengendali PID (Proporsional, integral, derivatif) digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor induksi agar sesuai dengan kecepatan yang diinginkan. Kecepatan motor induksi dapat diatur dan dimonitor di mana saja dan kapan saja dari jarak dekat maupun jauh secara *real time* melalui *smartphone* yang terkoneksi ke internet.

1.7. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan pada penelitian ini ialah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang teori-teori penunjang yang terkait dengan penelitian yang dilakukan.

III. METODE PENELITIAN

Menjelaskan metode serta proses perancangan perangkat keras maupun perangkat lunak terkait penelitian yang dilakukan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi hasil pengujian serta pembahasan terhadap hasil penelitian yang telah diperoleh.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan serta saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Motor Induksi

Motor induksi merupakan suatu alat yang memiliki fungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi gerak atau energi mekanik yang berupa putaran. Motor induksi termasuk ke dalam jenis motor AC (*Alternating Current*). Motor AC terbagi menjadi dua tipe, yaitu *synchronous motor* dan *asynchronous motor*. Motor induksi merupakan motor AC tipe *asynchronous motor* atau motor asinkron, hal ini karena putaran pada poros motor tidak sinkron atau tidak sama dengan putaran medan putar stator. Perbedaan atau selisih putaran ini disebut dengan slip.

Motor induksi merupakan salah satu jenis motor yang umum dan sering digunakan untuk keperluan rumah tangga maupun industri. Hal ini tentunya tidak terlepas dari keunggulan yang dimiliki oleh motor induksi, antara lain konstruksinya yang sederhana, pemeliharaannya mudah, harga yang relatif murah, dan memiliki efisiensi yang cukup tinggi.

2.1.1. Klasifikasi Motor Induksi

Adapun klasifikasi motor induksi berdasarkan jumlah fasanya dibedakan menjadi dua, yaitu:

a. Motor Induksi Satu Fasa

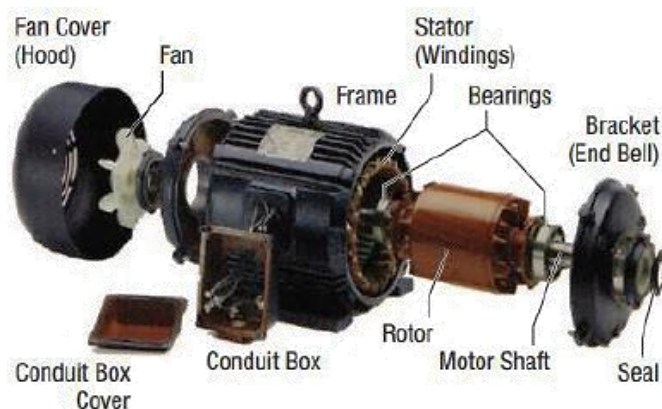
Motor induksi satu fasa merupakan motor induksi yang bekerja dengan menggunakan sumber listrik satu fasa. Motor induksi satu fasa banyak digunakan pada keperluan rumah tangga, seperti pada mesin cuci, kipas angin, pompa air, lemari es, dan lain-lain.

b. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan motor induksi yang bekerja dengan menggunakan sumber listrik tiga fasa. Motor induksi tiga fasa banyak digunakan pada keperluan industri, seperti pada pompa, kompresor, konveyor, mobil listrik, dan lain-lain.

2.1.2. Konstruksi Motor Induksi

Motor induksi satu fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor induksi tiga fasa di mana keduanya terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor.



Gambar 2.1 Konstruksi Motor Induksi [8].

a. Stator

Stator merupakan bagian motor induksi yang bersifat statis atau bagian yang diam. Stator terdiri dari beberapa bagian, yaitu:

- Inti Stator

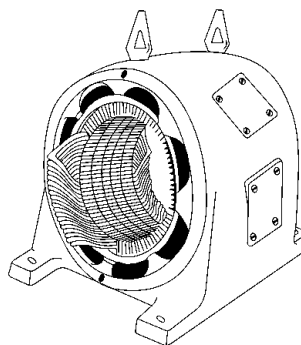
Bagian ini terbuat dari beberapa lapisan baja silikon atau besi lunak yang saling direkatkan. Inti stator sering disebut sebagai alur stator. Inti stator berfungsi sebagai tempat diletakkannya kumparan stator.

- Kumparan Stator

Bagian ini berfungsi untuk menghasilkan medan magnet atau medan putar stator. Kumparan ini ditempatkan pada inti atau alur stator. Kumparan stator dirancang sedemikian rupa untuk membentuk jumlah kutub tertentu. Jumlah kutub ini dapat menentukan kecepatan motor induksi.

- Badan Stator

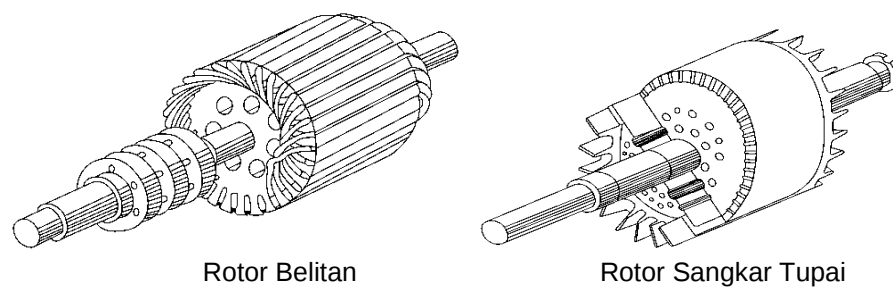
Badan stator terbuat dari besi. Selain berfungsi sebagai rangka, badan stator juga berfungsi sebagai area pelepasan panas ketika motor beroperasi sehingga desain dari badan stator dibuat bersirip-sirip agar panas dapat dengan mudah dilepaskan [8].



Gambar 2.2 Stator Motor Induksi [9].

b. Rotor

Rotor merupakan bagian motor induksi yang bersifat dinamis atau bagian yang dapat berputar. Rotor terdiri dari beberapa bagian, yaitu inti rotor, alur rotor, dan kumparan. Pada umumnya terdapat dua jenis rotor yang sering digunakan pada motor induksi, yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*) [7].



Gambar 2.3 Rotor Motor Induksi [9].

2.1.3. Prinsip Kerja Motor Induksi

Ketika stator diberi sumber tegangan, akan timbul medan putar (fluks yang berputar) pada stator dengan kecepatan tertentu. Kecepatan medan putar stator ini disebut dengan kecepatan sinkron dan dirumuskan dengan persamaan berikut [8].

$$n_s = \frac{120}{P} f \quad (2.1)$$

di mana:

n_s = kecepatan sinkron (rpm)

f = frekuensi (Hz)

P = jumlah kutub

Pada stator terdapat kumparan stator yang diletakkan pada slot-slotnya dan kemudian dililitkan membentuk sejumlah kutub. Jumlah dari kutub ini dapat menentukan kecepatan medan putar stator. Semakin banyak jumlah kutub, maka kecepatan medan putar stator menjadi semakin berkurang dan sebaliknya [1].

Tegangan induksi atau ggl (gaya gerak listrik) akan dihasilkan di rotor ketika kumparan rotor terpotong oleh medan putar stator. Karena batang konduktor atau kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup, maka akan timbul arus pada rotor [8]. Rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis-garis fluks yang dihasilkan kumparan stator, sehingga akan timbul gaya Lorentz pada rotor. Gaya ini menghasilkan torsi yang akan menggerakkan rotor searah dengan pergerakan medan putar stator.

Tegangan induksi atau ggl hanya dapat dihasilkan jika terjadi perpotongan antara medan putar stator dengan rotor, akibatnya kecepatan rotor tidak akan sama dengan kecepatan medan putar stator. Oleh karena itu, dibutuhkan selisih antara kecepatan rotor dengan kecepatan medan putar stator. Selisih atau perbedaan kecepatan ini disebut slip dan dirumuskan dalam persamaan 2.2 berikut [1].

$$S = \left(\frac{n_s - n_r}{n_s} \right) \times 100\% \quad (2.2)$$

di mana:

S = slip (%)

n_r = kecepatan rotor (rpm)

n_s = kecepatan sinkron (rpm)

2.1.4. Pengaturan Kecepatan Motor Induksi

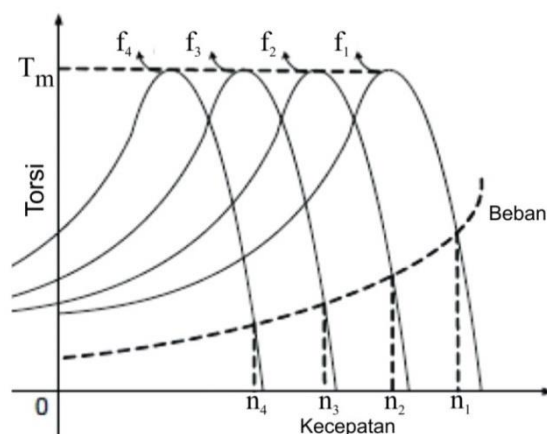
Pengaturan kecepatan motor induksi dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa cara, antara lain sebagai berikut:

a. Pengaturan Jumlah Kutub Motor

Persamaan 2.1 menunjukkan bahwa kecepatan motor berbanding terbalik dengan jumlah kutub. Semakin sedikit jumlah kutub, maka putaran motor induksi akan menjadi semakin cepat. Jumlah kutub dapat diatur dengan mendesain kumparan stator sedemikian rupa sehingga dihasilkan jumlah kutub yang diinginkan. Pada praktiknya, pengendalian kecepatan motor induksi dengan cara mengubah jumlah kutub cukup sulit dilakukan karena perlu mengubah konstruksi dari motor induksi.

b. Pengaturan Frekuensi Sumber

Persamaan 2.1 menunjukkan bahwa kecepatan motor induksi sebanding dengan frekuensi sumber. Semakin besar frekuensi yang diberikan pada motor induksi, maka putaran motor induksi menjadi semakin cepat.

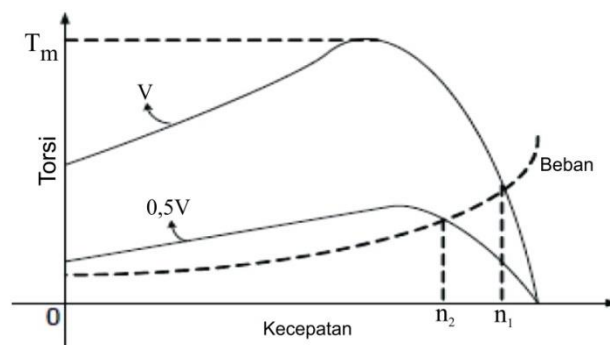


Gambar 2.4 Karakteristik Perubahan Frekuensi terhadap Kecepatan [1].

Pengaturan frekuensi dapat dilakukan menggunakan *inverter* dengan desain tertentu. Selain untuk mengubah listrik arus searah menjadi listrik arus bolak-balik, *inverter* juga dapat digunakan untuk menghasilkan frekuensi yang berubah-ubah.

c. Pengaturan Tegangan Sumber

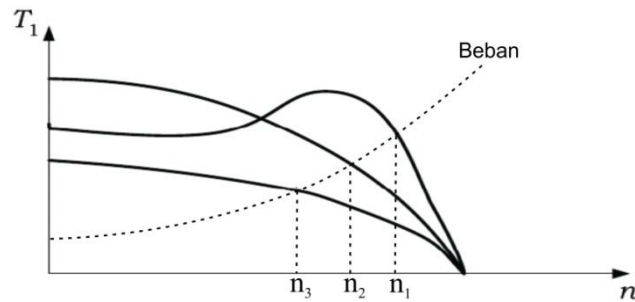
Pengendalian kecepatan motor induksi dapat dilakukan dengan mengubah tegangan sumber. Semakin besar tegangan sumber pada motor, maka putaran motor akan menjadi semakin cepat. Namun, pengaturan tegangan sumber menghasilkan putaran yang terbatas dikarenakan area pengaturan yang sempit [1].



Gambar 2.5 Karakteristik Perubahan Tegangan terhadap Kecepatan [1].

d. Pengaturan Tahanan Luar

Pengendalian kecepatan motor induksi juga dapat dilakukan dengan cara mengatur nilai tahanan luar motor induksi jenis rotor belitan. Pengaturan tahanan luar dapat menghasilkan nilai torsi yang berbeda-beda.



Gambar 2.6 Karakteristik Perubahan Tahanan Luar terhadap Kecepatan [1].

Pada pengaturan ini, motor induksi jenis rotor belitan dihubungkan dengan tahanan luar. Tahanan luar ini akan mempengaruhi putaran motor induksi, sehingga putaran motor dapat berubah-ubah [8].

2.2. *Multilevel Inverter*

Inverter merupakan perangkat elektronika daya yang dapat mengubah listrik arus searah (DC) menjadi listrik arus bolak-balik (AC) [11]. Pada awalnya, hanya dua level *inverter* yang digunakan dengan keluaran yang hanya menghasilkan dua level/tingkat tegangan. Keluaran tegangan yang dihasilkan ini memiliki rugi-rugi *switching* serta harmonik yang menyebabkan aliran arus harmonik pada rangkaian dan menghasilkan rugi-rugi. Oleh karena itu, diperlukan suatu cara untuk mengatasi hal tersebut. Cara yang dapat dilakukan adalah dengan menambah level/tingkat tegangan *inverter* menjadi lebih dari dua. Penambahan level atau tingkat ini akan menghasilkan gelombang keluaran yang lebih mendekati bentuk gelombang sinusoidal, sehingga harmonik pada keluaran dapat ditekan dan rugi-rugi dapat dikurangi. Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah topologi *inverter* konvensional menjadi suatu topologi yang disebut dengan *multilevel inverter* [10].

Multilevel inverter merupakan perangkat elektronika daya yang dapat mengubah listrik arus searah (DC) menjadi listrik arus bolak-balik (AC) di mana keluaran (*output*) yang dihasilkan berupa lebih dari dua level/tingkat tegangan. Tegangan keluaran yang dihasilkan *multilevel inverter* bertingkat-tingkat seperti tangga mendekati bentuk gelombang sinusoidal. Bila semakin banyak level/tingkat tegangan yang dihasilkan, maka distorsi harmonik yang dihasilkan menjadi semakin rendah [4]. Adapun kelebihan dari *multilevel inverter* antara lain sebagai berikut:

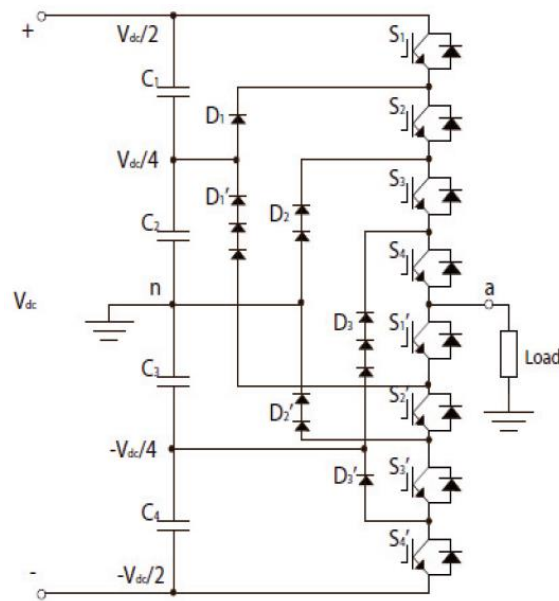
1. THD (*Total Harmonics Distorsion*) yang dihasilkan rendah.
2. Keluaran yang dihasilkan mendekati gelombang sinusoidal.
3. Intensitas perubahan tegangan rendah.
4. *Voltage stress* pada tiap saklar rendah.
5. Frekuensi *switching* rendah.
6. Rugi-rugi *switching* berkurang.
7. Menghasilkan kualitas daya yang baik.
8. Dapat diterapkan pada aplikasi tegangan tinggi.

2.2.1. Topologi *Multilevel Inverter*

Terdapat tiga jenis topologi *multilevel inverter* yang umum dan banyak digunakan, antara lain *diode clamped multilevel inverter*, *flying capacitor multilevel inverter*, dan *cascaded h-bridge multilevel inverter*.

a. *Diode Clamped Multilevel Inverter*

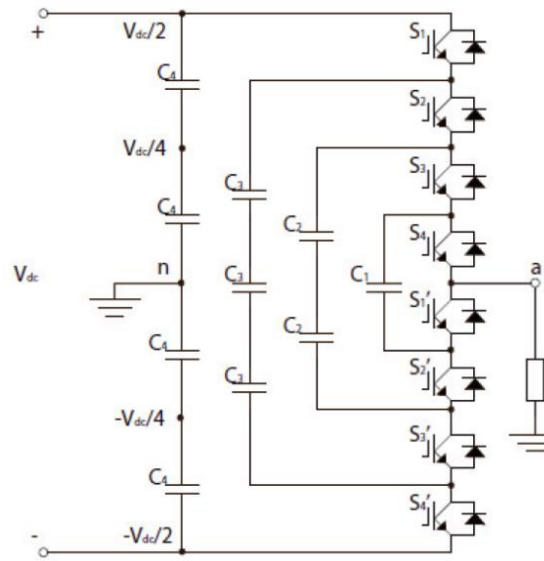
Topologi ini menggunakan beberapa buah dioda. Pada topologi ini, n level *diode clamped multilevel inverter* membutuhkan $2(n - 1)$ saklar, $((n - 1)(n - 2))$ dioda, dan $(n - 1)$ sumber tegangan DC.



Gambar 2.7 Diode Clamped Multilevel Inverter [10].

b. *Flying Capacitor Multilevel Inverter*

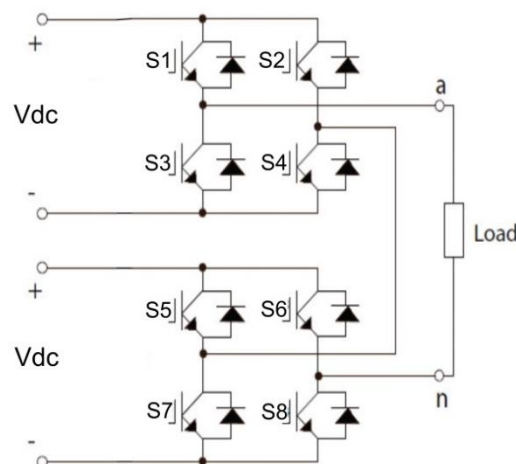
Topologi ini hampir sama dengan *diode clamped multilevel inverter*, hanya saja pada topologi ini menggunakan beberapa buah kapasitor. Penggunaan banyak kapasitor pada *inverter* ini menjadikan rangkaian lebih kompleks dan biaya yang dikeluarkan relatif lebih mahal. Pada topologi ini, n level *flying capacitor multilevel inverter* membutuhkan $2(n - 1)$ saklar, $((n - 1)(n - 2))/2$ kapasitor untuk membatasi tegangan, dan $(n - 1)$ sumber tegangan DC.



Gambar 2.8 *Flying Capacitor Multilevel Inverter* [10].

c. *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter*

Ide dari topologi *inverter* jenis ini didasarkan pada *H-bridge Inverter* yang dihubungkan secara bertingkat untuk menghasilkan tegangan keluaran yang sinusoidal. Tegangan pada *output* merupakan penjumlahan dari tegangan yang dihasilkan oleh sumber tegangan DC. Sebuah n level *cascaded H-bridge multilevel inverter* terdiri dari $2(n - 1)$ saklar dan $(n - 1)/2$ sumber tegangan DC [12].

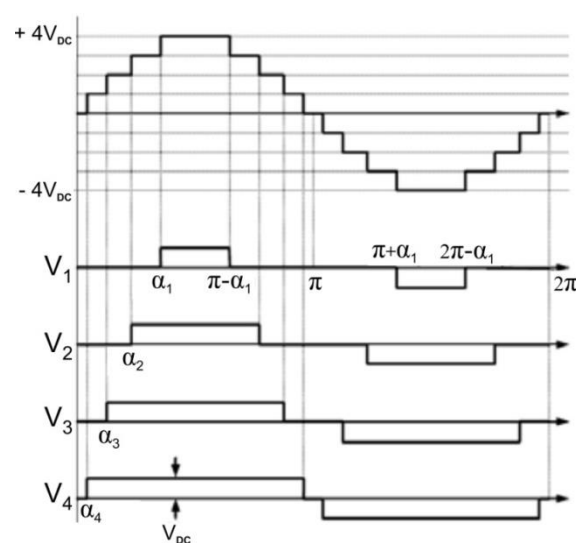


Gambar 2.9 *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* [10].

Bila dibandingkan dengan *flying capacitor multilevel inverter* dan *diode clamped multilevel inverter*, topologi ini lebih sederhana karena menggunakan lebih sedikit komponen. Selain itu, proses penambahan level tegangan pada topologi ini lebih mudah dilakukan karena hanya menambah blok *inverter* baru tanpa perlu melakukan perubahan rangkaian secara keseluruhan.

2.2.2. Gelombang Keluaran *Multilevel Inverter*

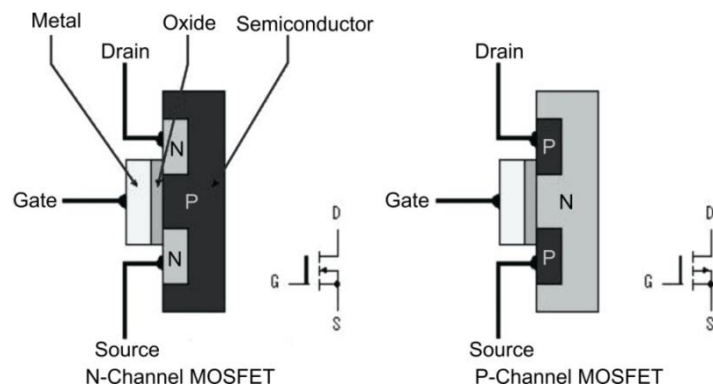
Multilevel inverter menghasilkan gelombang *output* yang bentuknya bertingkat seperti tangga mendekati bentuk gelombang sinusoidal dengan memanfaatkan beberapa sumber tegangan DC [11]. Semakin banyak sumber tegangan DC yang digunakan, maka akan semakin banyak tingkat atau level tegangan keluaran yang dapat dihasilkan, sehingga gelombang *output* semakin mendekati gelombang sinusoidal dan THD yang dihasilkan pun menjadi semakin rendah [4]. Adapun bentuk gelombang keluaran yang dihasilkan oleh *multilevel inverter* dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.10 Gelombang Keluaran *Multilevel Inverter* 9 Tingkat [13].

2.3. MOSFET

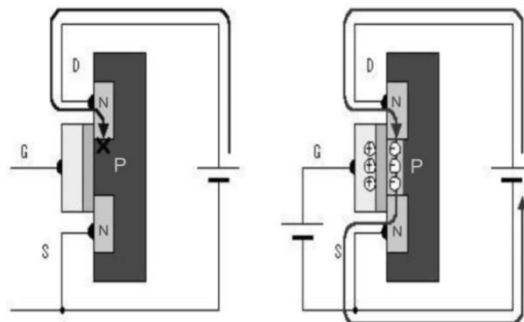
MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) merupakan salah satu jenis transistor yang terbuat dari bahan semikonduktor (silikon). MOSFET banyak digunakan sebagai suatu *switch*/saklar, sebagai penguat sinyal untuk perangkat elektronik, dan pengendali kecepatan motor. Komponen ini terdiri dari empat bagian utama, yaitu *gate* (G), *drain* (D), *source* (S), dan *body*.



Gambar 2.11 Bagian-Bagian MOSFET [14].

2.3.1. N-Channel MOSFET

Pada tipe ini, ketika *gate* diberi tegangan berpolaritas positif, maka elektron dari semikonduktor tipe N yang ada pada *drain* dan *source* tertarik oleh *gate* ke semikonduktor tipe P yang berada di antara keduanya.

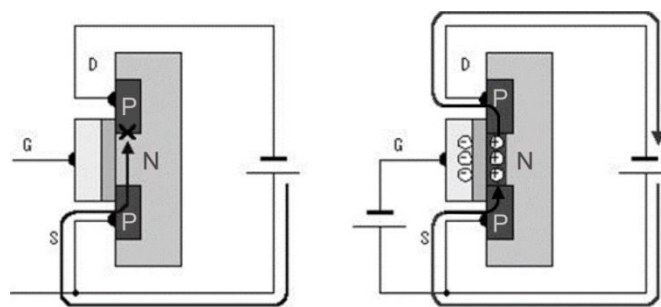


Gambar 2.12 Prinsip Kerja N-Channel MOSFET [14].

Keberadaan elektron pada semikonduktor tipe P ini akan menjadi jembatan yang menyebabkan pergerakan elektron dari *source* ke *drain* sehingga arus akan mengalir dari *drain* ke *source*.

2.3.2. *P-Channel* MOSFET

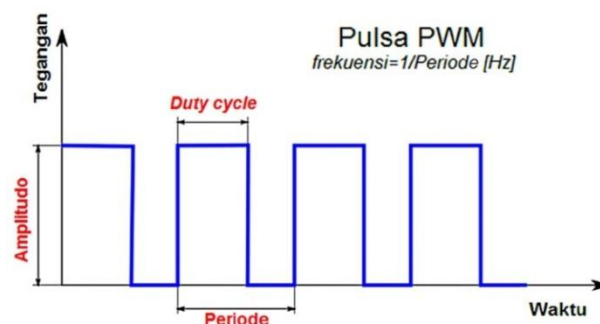
Pada tipe ini, ketika *gate* diberi tegangan berpolaritas negatif, *hole* dari semikonduktor tipe P yang ada pada *drain* dan *source* tertarik menuju semikonduktor tipe N yang berada di antara keduanya. Keberadaan *hole* pada semikonduktor tipe N ini akan menjadi jembatan yang menyebabkan pergerakan elektron dari *drain* ke *source* sehingga arus akan mengalir dari *source* ke *drain* [14].



Gambar 2.13 Prinsip Kerja *P-Channel* MOSFET [14].

2.4. PWM (*Pulse Width Modulation*)

Komponen elektronika daya seperti MOSFET dan IGBT dapat dikendalikan dengan menggunakan suatu teknik yang disebut PWM.



Gambar 2.14 Pulsa PWM [15].

PWM (*Pulse Width Modulation*) merupakan suatu teknik modulasi yang dilakukan dengan cara mengubah lebar pulsa dengan nilai amplitudo dan frekuensi yang tetap. PWM digunakan untuk menghasilkan sinyal analog dari perangkat digital, misalnya dari mikrokontroler. Pulsa PWM memiliki dua kondisi, yaitu kondisi *on* dan kondisi *off*. Pada kondisi *on* amplitudo pulsa akan bernilai maksimum, sementara pada kondisi *off* amplitudo pulsa akan bernilai nol. Periode pulsa (T) PWM merupakan waktu yang diperlukan untuk membentuk 1 pulsa, di mana 1 pulsa PWM merupakan penjumlahan dari waktu pulsa *on* dan *off*.

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (2.3)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

Perbandingan antara waktu pulsa *on* dengan periode pulsa disebut dengan *duty cycle* (D). Adapun *duty cycle* (D) dirumuskan dalam persamaan 2.5 berikut [15].

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100 \% \quad (2.5)$$

di mana:

T = periode pulsa (detik)

T_{on} = waktu pulsa *on* (detik)

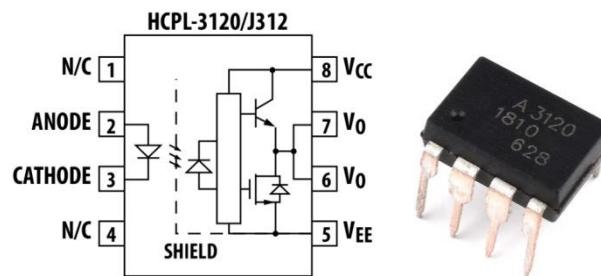
T_{off} = waktu pulsa *off* (detik)

f = frekuensi pulsa (Hz)

D = *duty cycle* (%)

2.5. HCPL 3120

Gate driver merupakan rangkaian yang memiliki fungsi sebagai penghubung antara rangkaian kontrol dengan rangkaian daya. Rangkaian *gate driver* akan memindahkan dan menguatkan sinyal pemicu (pulsa kontrol) yang dihasilkan rangkaian kontrol untuk menggerakkan saklar semikonduktor pada rangkaian daya. HCPL 3120 merupakan salah satu jenis IC yang digunakan sebagai *gate driver*. IC ini secara khusus dirancang untuk penggerak saklar semikonduktor jenis IGBT dan MOSFET.



Gambar 2.15 IC HCPL 3120 [16].

HCPL 3120 merupakan salah satu jenis *optocoupler* yang terdiri dari dua bagian, yaitu *transmitter* dan *receiver*. Bagian *transmitter* IC ini terhubung dengan rangkaian kontrol atau rangkaian *input* serta terdiri dari LED inframerah (IR LED) yang berfungsi untuk mengirimkan sinyal berupa cahaya inframerah. Sementara bagian *receiver* IC ini terhubung dengan rangkaian beban atau rangkaian output serta terdiri dari komponen yang dapat menerima cahaya yang dipancarkan *transmitter*. Komponen yang dapat menerima cahaya ini terdiri dari kombinasi transistor. Ketika terdapat arus yang mengalir melalui pin anoda dan katoda IC, maka IR LED yang terdapat pada pin tersebut akan memancarkan cahaya inframerah. Cahaya ini akan ditangkap pada bagian *receiver* dan akan

menghasilkan tegangan pada V_O . Besarnya tegangan pada V_O akan sama dengan tegangan yang diberikan pada V_{CC} .

Selain berfungsi sebagai *driver* IGBT dan MOSFET, HCPL 3120 juga berfungsi sebagai proteksi untuk rangkaian kontrol. Hal ini karena bagian *transmitter* dan *receiver* dari IC ini tidak terhubung secara langsung. HCPL 3120 memiliki arus *output* maksimum sebesar 2,5 A, tegangan masukan pada V_{CC} antara 15-30 Volt, serta waktu *switching* hingga 500 ns [16].

2.6. Modul Sensor Kecepatan LM393

Modul sensor kecepatan ini dilengkapi dengan IC LM393 serta sensor *optocoupler*. Sensor *optocoupler* bekerja dengan cara mendeteksi perubahan cahaya inframerah. Sensor *optocoupler* terdiri dari dua bagian utama, yaitu *transmitter* dan *receiver*. Bagian *transmitter* terdiri dari sebuah LED inframerah (IR LED) yang berfungsi untuk mengirim sinyal kepada bagian *receiver*. Sementara bagian *receiver* terdiri dari komponen yang dapat menerima cahaya yang dipancarkan *transmitter*.



Gambar 2.16 Modul Sensor Kecepatan LM393 [18].

Modul sensor ini mendeteksi pergerakan suatu benda yang diletakkan di antara bagian *transmitter* dan *receiver* sensor. Benda tersebut biasanya berupa

piringan *encoder* (*disk encoder*) atau kisi sehingga ketika kisi ini berputar, maka akan terdapat kondisi di mana cahaya inframerah terhubung dan terhalang oleh kisi. Pada saat sensor optocoupler terhalang kisi, maka rangkaian akan *open*. Namun, pada saat sensor tidak terhalang kisi, maka rangkaian akan *close*. Dengan begitu, cahaya inframerah yang ditangkap akan terputus-putus dan akan menghasilkan pulsa *on* dan *off*. Pulsa *on* dan *off* ini kemudian dikonversi oleh mikrokontroler menjadi nilai kecepatan [18].

2.7. Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 merupakan sebuah *board* mikrokontroler yang di dalamnya tertanam IC ATmega2560. *Board* ini memiliki 54 pin *input* dan *output* digital di mana sebanyak 15 pin di antaranya dapat digunakan sebagai keluaran PWM, 16 buah pin *input* analog, 4 buah pin UART (*hardware serial ports*), osilator kristal 16 MHz, koneksi USB, *power jack*, ICSP header (untuk memrogram Arduino dengan *software* lain), serta tombol reset.



Gambar 2.17 Arduino Mega 2560 [19].

Arduino Mega 2560 dapat dihubungkan dengan komputer menggunakan kabel USB. Selain itu, suplai daya untuk *board* ini dapat menggunakan adaptor

ataupun baterai. Adapun spesifikasi dari Arduino Mega 2560 dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino Mega 2560 [19]

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	5 V
Tegangan <i>Input</i> (rekomendasi)	7-12 V
Tegangan <i>Input</i> (batas)	6-20 V
Pin <i>Input/Output</i> Digital	54 (15 pin PWM)
Pin <i>Input</i> Analog	16
Arus DC per Pin <i>Input/Output</i>	20 mA
Arus DC Pin 3,3 V	50 mA
<i>Flash Memory</i>	256 KB (8 KB digunakan untuk <i>bootloader</i>)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
<i>Clock Speed</i>	16 MHz
LED_BULITIN	Pin 13
Panjang	101,52 mm
Lebar	53,3 mm
Berat	37 g

Arduino Mega 2560 memiliki 54 buah pin digital yang dapat digunakan sebagai *input* maupun *output* serta 16 buah pin analog yang berlabel A0 sampai A15. Resolusi dari setiap pin analog adalah 10 bit. Selain itu, Arduino Mega 2560 juga dibekali dengan fitur-fitur yang mempunyai fungsi khusus, antara lain sebagai berikut:

a. Komunikasi serial

Arduino Mega memiliki 4 buah komunikasi serial. Port serial 0: pin 0 (RX) dan pin 1 (TX), port serial 1: pin 19 (RX) dan pin 18 (TX), port serial 2: pin 17 (RX) dan pin 16 (TX), port serial 3: pin 15 (RX) dan pin 14 (TX). Pin RX berfungsi untuk menerima data setial TTL, sementara pin TX berfungsi untuk mengirim data serial TTL.

b. *Interrupt* eksternal

Arduno Mega memiliki 6 buah *interrupt* eksternal. *Interrupt* 0 (pin 2), *interrupt* 1 (pin 3), *interrupt* 2 (pin 21), *interrupt* 3 (pin 20), *interrupt* 4 (pin 19), dan *interrupt* 5 (pin 18).

c. Pin PWM

Arduino Mega memiliki 15 buah pin PWM yang terdapat pada pin: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 44, 45, dan 46. Setiap pin tersebut bisa digunakan untuk output PWM yang berukuran 8 bit.

d. Pin I2C

Arduino Mega memiliki pin I2C yang terdapat pada pin 20 (SDA) dan pin 21 (SCL).

e. Pin SPI

Komunikasi SPI pada Arduino Mega terdapat pada pin 50 (MISO), pin 51 (MOSI), pin 52 (SCK), dan pin 53 (SS).

2.8. Pengendali PID

Pengendali PID (Proporsional, Integral, Derivatif) adalah suatu pengendali yang dapat memperbaiki tingkat akurasi atau ketepatan dari suatu

sistem dengan karakteristik umpan balik (*feedback*) pada sistem tersebut. Pengendali ini akan menghitung serta meminimalisasi nilai selisih/eror antara keluaran dari sistem terhadap masukan atau *setpoint* yang telah ditentukan. Terdapat tiga komponen pada pengendali PID, yaitu proporsional, integral, dan derivatif [7]. Adapun penjelasan dari masing-masing komponen ini adalah sebagai berikut:

2.8.1. Pengendali Proporsional

Pengendali proporsional memiliki fungsi untuk mempercepat *output* sistem mencapai *set point* atau titik referensi. Pengendali proporsional dapat dinyatakan dalam persamaan 2.6 berikut.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.6)$$

di mana:

$u(t)$ = keluaran pengendali proporsional

K_p = *gain* proporsional

$e(t)$ = eror

Nilai *gain* yang terlalu besar dapat menyebabkan ketidakstabilan, sementara *gain* yang terlalu kecil dapat merusak sistem.

2.8.2. Pengendali Integral

Pengendali Integral memiliki fungsi untuk menghilangkan eror *steady state* yang masih dihasilkan oleh pengendali proporsional dan mempercepat respon sistem. Pengendali Integral dapat dinyatakan dalam persamaan 2.7 berikut.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.7)$$

di mana:

$u(t)$ = keluaran pengendali integral

K_i = *gain* integral

$e(t)$ = eror

Nilai gain yang terlalu besar dapat menyebabkan sistem osilasi, sementara nilai gain yang terlalu kecil dapat menyebabkan respon sistem menjadi lambat.

2.3.3. Pengendali Derivatif

Pengendali derivatif memiliki fungsi untuk mengurangi *overshoot* pada sistem. Pengendali Derivatif dapat dinyatakan dalam persamaan 2.8 berikut.

$$u(t) = K_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (2.8)$$

di mana:

$u(t)$ = keluaran pengendali derivatif

K_d = *gain* derivatif

$e(t)$ = eror

2.3.4. Persamaan Pengendali PID

Gabungan dari pengendali proporsional, pengendali integral, dan pengendali derivatif menghasilkan pengendali PID yang dapat dinyatakan ke dalam persamaan 2.9 berikut.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d e(t)}{dt} \right] \quad (2.9)$$

di mana:

$u(t)$ = keluaran pengendali PID

K_p = gain proporsional

T_i = waktu integral

T_d = waktu derivatif

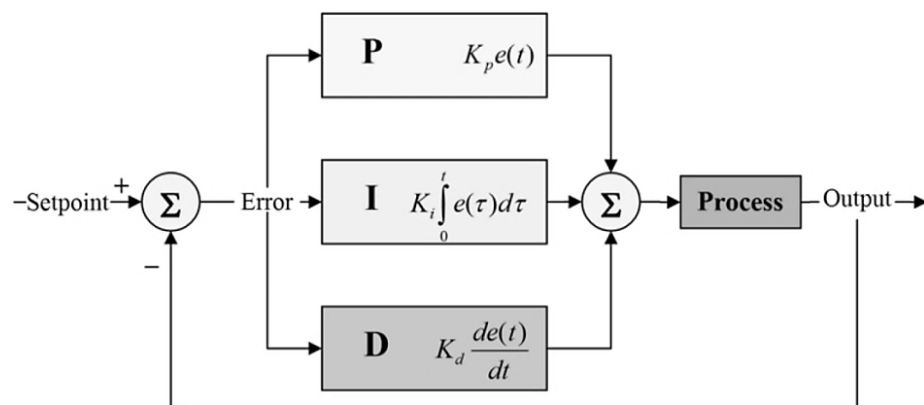
$e(t)$ = eror

Persamaan 2.9 dapat juga dinyatakan ke dalam persamaan 2.12 berikut.

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (2.10)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (2.11)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (2.12)$$



Gambar 2.18 Diagram Blok Pengendali PID [6].

Pada pemrograman, persamaan pengendali PID di atas perlu dirubah menjadi bentuk diskret. Adapun bentuk diskret dari persamaan pengendali PID di atas ialah sebagai berikut.

$$\alpha = K_p \frac{T}{T_i} \quad (2.)$$

$$\beta = K_p \frac{T_d}{T} \quad (2.14)$$

Parameter proporsional,

$$w_k = K_p e_k \quad (2.15)$$

Parameter integral,

$$p_k = \alpha e_k + p_{k-1} \quad (2.16)$$

Parameter derivatif,

$$q_k = \beta(e_k + e_{k-1}) \quad (2.17)$$

Dengan menggabungkan parameter di atas, persamaan pengendali PID menjadi [20].

$$u_k = w_k + p_k + q_k \quad (2.18)$$

di mana:

T = waktu *sampling* (detik)

u_k = keluaran pengendali PID

e_k = eror saat ini

e_{k-1} = eror sebelumnya

w_k = parameter proporsional

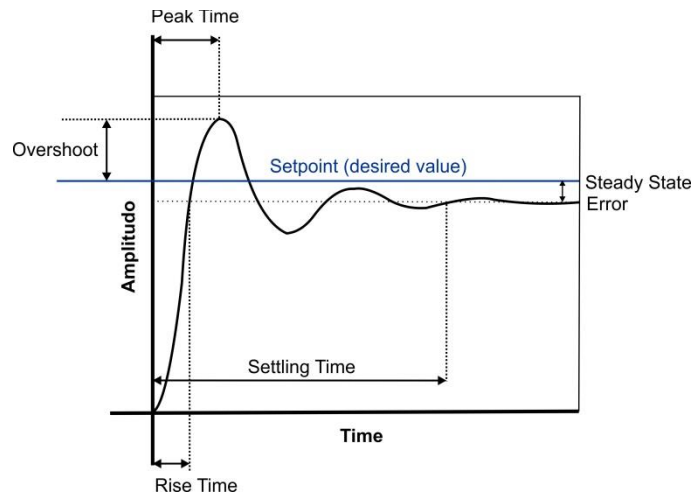
p_k = parameter integral saat ini

p_{k-1} = parameter integral sebelumnya

q_k = parameter derivatif

Pengendali PID merupakan kombinasi dari tiga jenis kendali, yaitu kendali proporsional, intergral, dan derivatif. Ketiga jenis kendali ini mempunyai kelebihan serta kekurangan masing-masing. Oleh karena itu, dengan mengombinasikan ketiga kendali ini menjadi satu sistem kendali tunggal,

diharapkan dapat memberikan kontribusi dari kelebihan masing-masing kendali sehingga mampu menghasilkan suatu sistem kendali yang lebih baik [7].



Gambar 2.19 Grafik Respon Transien Sistem [20].

2.9. IoT (*Internet of Things*)

Internet of Things atau yang lebih dikenal dengan istilah IoT adalah suatu konsep yang memiliki tujuan untuk memperluas manfaat dari konektivitas internet yang terhubung secara terus-menerus. Pada dasarnya *Internet of Things* mengacu pada benda-benda yang dapat diidentifikasi secara unik sebagai *representative virtual* dalam struktur berbasis internet.

Prinsip kerja dari IoT adalah terjadinya interaksi antar sesama mesin atau benda secara otomatis tanpa adanya campur tangan *user* dalam jarak berapa pun menggunakan koneksi internet sebagai penghubung. Pada konsep ini, *user* hanya bertugas sebagai pengatur dan pemonitor. Keuntungan yang diperoleh dengan menggunakan konsep IoT adalah membuat suatu pekerjaan menjadi lebih mudah, cepat, dan efisien. Sistem dasar dari *Internet of Things* adalah perangkat

keras/*hardware (things)*, koneksi internet, serta *cloud data center* yang bertindak untuk menyimpan data atau menjalankan aplikasi [21].

2.10. NodeMCU ESP8266

NodeMCU merupakan suatu platform IoT (*Internet of Things*) yang bersifat *open source*. *Board* ini terdiri dari perangkat keras SoC (*System on Chip*) ESP8266 buatan Espressif System dan juga menggunakan *firmware* dengan bahasa pemrograman Lua. NodeMCU dapat dianalogikan sebagai *board* Arduino-nya ESP8266. NodeMCU menggabungkan ESP8266 menjadi sebuah *board* dengan berbagai macam fungsi layaknya mikrokontroler yang dilengkapi dengan kemampuan akses WiFi serta *chip* komunikasi USB *to Serial* sehingga proses pemrogramannya hanya memerlukan kabel data mikro USB [22].



Gambar 2.20 NodeMCU ESP8266 [22].

2.11. Blynk

Blynk merupakan sebuah layanan server yang digunakan untuk mendukung proyek IoT (*Internet of Things*). Aplikasi ini mempunyai lingkungan *mobile user* Android maupun iOS. Blynk dapat diunduh melalui Google Play Store dan App Store. Blynk mendukung berbagai *hardware* yang dapat digunakan untuk proyek IoT. Proses penambahan komponen pada Blynk dilakukan dengan

cara *drag and drop*, sehingga tidak memerlukan kemampuan khusus dalam pemrograman Android maupun iOS.

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. Adapun bagian-bagian utama dari Blynk antara lain:

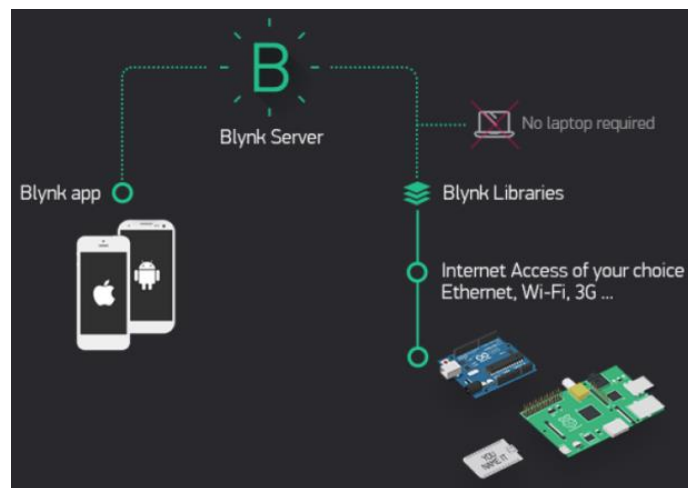
a. *Blynk App*

Bagian ini memungkinkan pembuatan proyek *interface* yang dapat dilengkapi dengan berbagai komponen *input* dan *output* untuk mendukung pengiriman dan penerimaan data serta merepresentasikannya sesuai dengan komponen yang dipilih. Data yang direpresentasikan ini dapat berbentuk angka, visual, maupun grafik. Terdapat empat jenis komponen pada *Blynk App*, antara lain:

- *Controller*, berfungsi untuk mengirim data atau perintah ke *hardware*.
- *Display*, berfungsi untuk menampilkan data dari *hardware* ke *smartphone*.
- *Notifications*, berfungsi untuk menerima pesan dan notifikasi.
- *Interface*, sebagai tampilan pada *Blynk App* yang berupa menu atau tab.
- *Others*, komponen ini antara lain terdiri dari RTC, *Bridge*, dan *Bluetooth*.

b. Server Blynk

Bagian ini merupakan fasilitas *backend service* berbasis *cloud* yang berfungsi untuk mengatur komunikasi antara *smartphone* dengan *hardware*. Kemampuannya dalam menangani puluhan hardware pada saat bersamaan akan mempermudah pengembangan sistem IoT. Server Blynk juga tersedia dalam bentuk server lokal apabila ingin digunakan pada lingkungan tanpa koneksi internet.



Gambar 2.21 Server Blynk [23].

c. Blynk Library

Bagian ini digunakan untuk membantu pengembangan *code*. Blynk *Library* dapat ditemukan pada banyak platform *hardware*, sehingga semakin mempermudah *developer* IoT dengan fleksibilitas *hardware* yang didukung lingkungan Blynk [23].

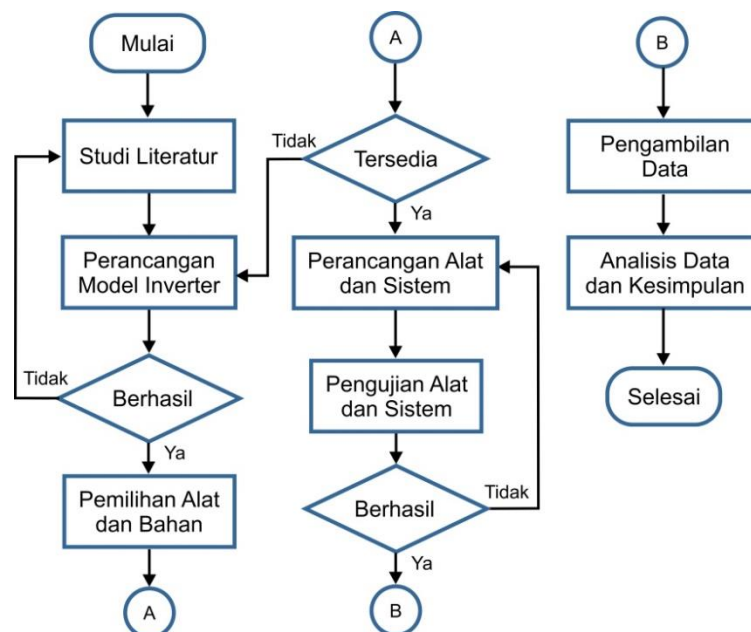
III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dikerjakan selama 8 bulan, yaitu dari Januari 2021 sampai dengan September 2021. Penelitian dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

3.2. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.1. Tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini terdiri dari studi literatur, perancangan model *inverter*, pemilihan alat dan bahan, perancangan alat dan sistem, pengujian alat dan sistem, pengambilan data, serta analisis data dan kesimpulan.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.

3.3. Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem yang dirancang pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.2. Adapun fungsi dari masing-masing blok yang terdapat pada diagram blok penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Motor Induksi

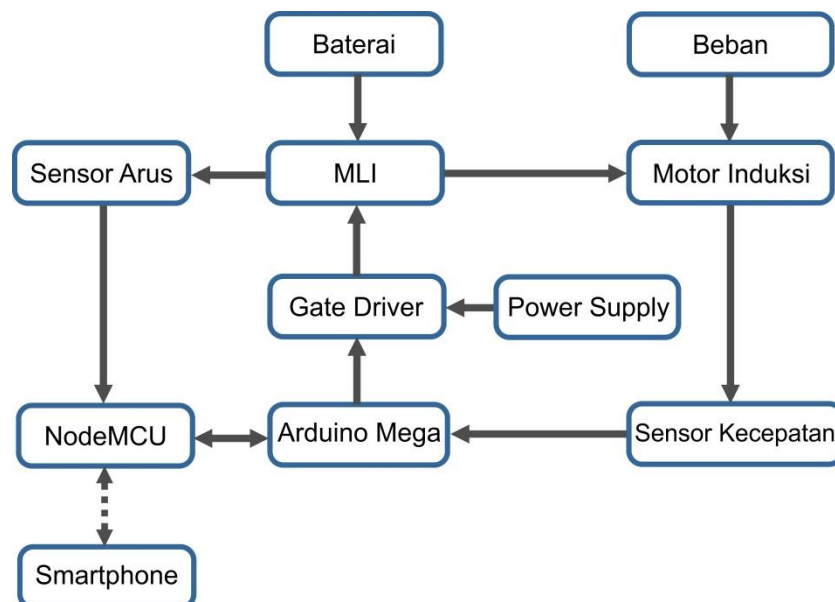
Pada penelitian ini, motor Induksi digunakan sebagai objek atau *plant* yang dikendalikan.

2. MLI (*Multilevel Inverter*)

Multilevel inverter digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi melalui perubahan nilai frekuensi.

3. Baterai 12 V

Aki digunakan sebagai baterai 12 V yang berfungsi sebagai sumber tegangan untuk *multilevel inverter*.



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem.

4. Arduino Mega

Arduino Mega digunakan untuk mengatur pensaklaran pada *inverter*, memprogram pengendali PID, mengolah hasil pembacaan sensor kecepatan, mengirim data ke NodeMCU, serta menerima data dari NodeMCU.

5. Gate Driver

Gate driver berfungsi untuk memindahkan dan menguatkan sinyal pemicu (pulsa kontrol) yang dihasilkan oleh Arduino Mega untuk menggerakkan MOSFET.

6. DC Power Supply

DC Power Supply berfungsi untuk menyuplai daya ke rangkaian *gate driver*.

7. Beban

Beban digunakan untuk menguji sistem kendali yang digunakan pada penelitian.

8. Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan berfungsi untuk mengetahui nilai kecepatan dari motor induksi.

9. Sensor Arus

Sensor Arus berfungsi untuk mengetahui arus yang dihasilkan motor induksi.

10. NodeMCU

NodeMCU berfungsi untuk menerima data berupa nilai kecepatan dari Arduino Mega dan menerima data berupa arus listrik dari modul ACS712.

Kemudian, data tersebut dikirimkan ke *Smartphone* melalui koneksi internet untuk ditampilkan. NodeMCU juga berfungsi untuk menerima data berupa nilai kecepatan referensi (*set point*) yang diatur dari *smartphone*. Kemudian, data tersebut dikirimkan ke Arduino Mega untuk diolah.

11. *Smartphone*

Smartphone digunakan untuk mengatur dan memonitor kecepatan motor induksi melalui koneksi internet.

3.4. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari perangkat keras (*hardware*) serta perangkat lunak (*software*).

3.4.1. Perangkat Keras

Perangkat keras (*hardware*) yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Motor Induksi 1 Fasa
2. Rangkaian *Multilevel Inverter*
3. Aki 12 V 3,5 Ah 4 buah
4. Rangkaian DC *Power Supply* 16 buah
5. Arduino Mega 2560
6. Rangkaian *Gate Driver* 16 buah
7. NodeMCU ESP8266
8. Transformator *Step-Up* 30/220 V 5 A
9. Modul LM393
10. Modul ACS712

11. Generator DC 12 V
12. Lampu LED DC 12 V 30 W 3 Buah
13. Laptop Acer Aspire E 14
14. *Smartphone*
15. Multimeter Digital
16. Osiloskop Digital

3.4.2. Perangkat Lunak

Perangkat lunak (*software*) yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proteus 8.9
2. MATLAB R2016b
3. Microsoft Office 2010
4. Arduino IDE 1.8.15
5. EAGLE 9.6.2
6. DipTrace 4.0
7. Blynk

3.5. Perancangan Sistem

Adapun tahapan-tahapan perancangan pada penelitian ini terdiri dari studi literatur, spesifikasi motor induksi yang digunakan, perancangan rangkaian *multilevel inverter*, perancangan rangkaian *gate driver*, perancangan rangkaian DC *power Supply*, perancangan *Wiring* Arduino Mega, perancangan *Wiring* sensor kecepatan, perancangan *Wiring* NodeMCU dan sensor arus, penentuan

parameter pengendali PID, pemrograman Arduino Mega dan NodeMCU, perancangan rangkaian beban, serta perancangan aplikasi *smartphone*.

3.5.1. Studi Literatur

Pada tahap ini, dilakukan pengumpulan berbagai referensi atau sumber yang diperlukan sebagai acuan dalam melakukan pembuatan alat. Referensi-referensi yang dikumpulkan berupa teori-teori mengenai komponen, rangkaian, metode, serta hal-hal lain yang berkaitan dengan pembuatan alat. Tujuan dari tahap ini adalah untuk memperoleh hasil penelitian yang sesuai dengan prinsip kerja dan karakteristik dari komponen-komponen yang digunakan.

3.5.2. Spesifikasi Motor Induksi yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan motor induksi satu fasa sebagai objek/*plant* yang dikendalikan.



Gambar 3.3 Motor Induksi yang Digunakan pada Penelitian.

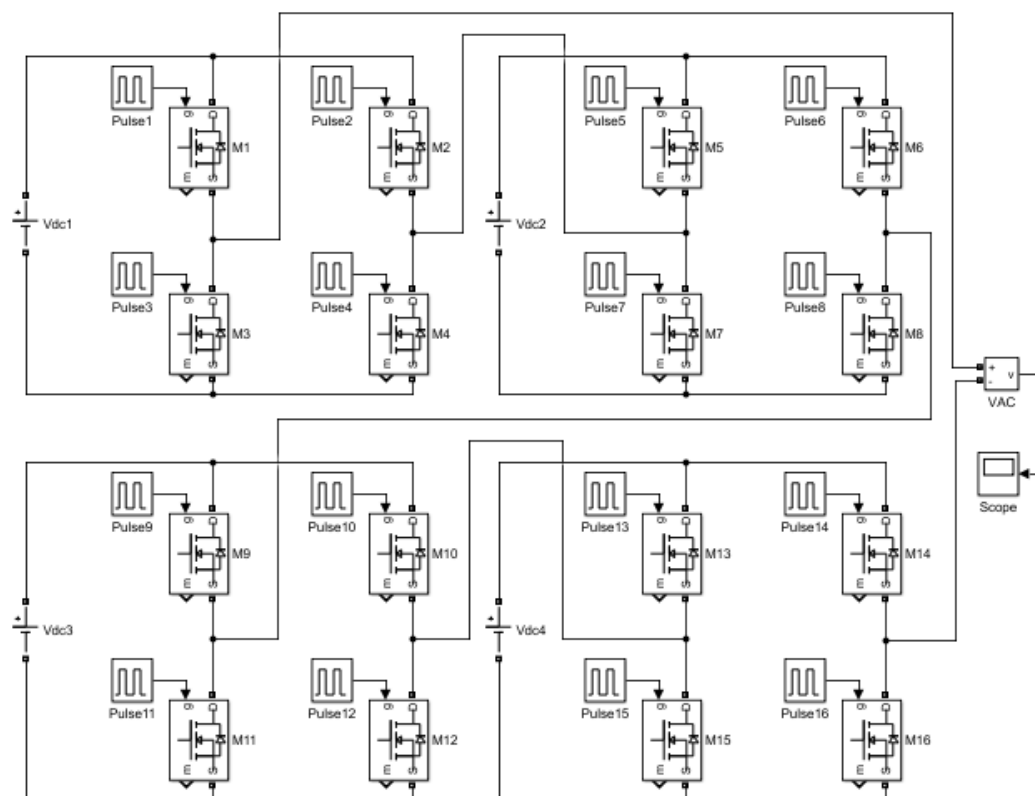
Spesifikasi dari motor induksi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jenis motor : Motor induksi satu fasa

2. *Rating* tegangan : 220-240 volt
3. *Rating* daya : 70 watt
4. *Rating* arus : 0,4 ampere
5. *Rating* frekuensi : 50/60 Hz
6. *Rating* kecepatan : 1380 rpm
7. $\cos \varphi$: 0,75

3.5.3. Perancangan Rangkaian *Multilevel Inverter*

Jenis *inverter* yang dirancang pada penelitian ini adalah *cascaded H-bridge multilevel inverter* 9 tingkat. Adapun rangkaian *cascaded H-bridge multilevel inverter* 9 tingkat dapat dilihat pada gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Rangkaian *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* 9 Tingkat.

Jumlah sumber tegangan DC yang diperlukan untuk topologi *inverter* ini adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 n &= 9 \\
 \text{Jumlah sumber DC} &= \frac{n-1}{2} \\
 &= \frac{9-1}{2} \\
 &= 4
 \end{aligned}$$

Sementara itu, jumlah MOSFET yang diperlukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah MOSFET} &= 2(n-1) \\
 &= 2(9-1) \\
 &= 16
 \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, sumber tegangan DC yang digunakan pada penelitian ini berupa Aki 12 V 3,5 Ah sebanyak 4 buah, sementara MOSFET yang digunakan pada penelitian ini adalah IRFP460 sebanyak 16 buah. IRFP460 merupakan MOSFET tipe *N-channel* dengan V_{DS} maksimum 500 V dan I_D maksimum sebesar 20 A.

Tabel 3.1 Proses Pensaklaran *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter 9 Tingkat*

V_{AC}	Kondisi MOSFET															
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{15}	M_{16}
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
$+V_{DC}$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
$+2V_{DC}$	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
$+3V_{DC}$	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$+4V_{DC}$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$+3V_{DC}$	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1
$+2V_{DC}$	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1

$$t = \frac{\text{sudut penyalaan}}{360} \times T \quad (3.1)$$

di mana:

t = waktu pensaklaran pada setiap tingkat tegangan (detik)

T = periode (detik)

Berdasarkan gambar 3.5 dan persamaan 3.1, waktu pensaklaran pada masing-masing tingkat tegangan terdapat pada tabel 3.2 berikut.

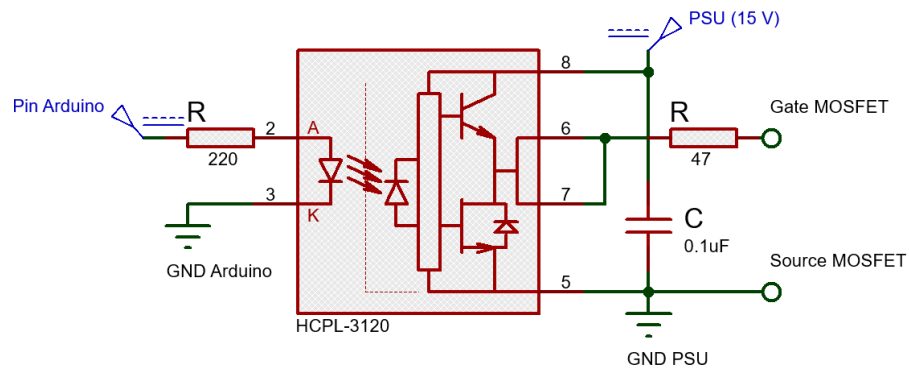
Tabel 3.2 Waktu Pensaklaran pada setiap Tingkat Tegangan Keluaran

V_{AC}	t (detik)	
0	$\frac{a}{360} \times T$	$\frac{7,5}{360} \times T$
$+V_{DC}$	$\frac{b}{360} \times T$	$\frac{14}{360} \times T$
$+2V_{DC}$	$\frac{c}{360} \times T$	$\frac{16}{360} \times T$
$+3V_{DC}$	$\frac{d}{360} \times T$	$\frac{25}{360} \times T$
$+4V_{DC}$	$\frac{e}{360} \times T$	$\frac{55}{360} \times T$
$+3V_{DC}$	$\frac{d}{360} \times T$	$\frac{25}{360} \times T$
$+2V_{DC}$	$\frac{c}{360} \times T$	$\frac{16}{360} \times T$
$+V_{DC}$	$\frac{b}{360} \times T$	$\frac{14}{360} \times T$
0	$\frac{2a}{360} \times T$	$\frac{15}{360} \times T$
$-V_{DC}$	$\frac{b}{360} \times T$	$\frac{14}{360} \times T$
$-2V_{DC}$	$\frac{c}{360} \times T$	$\frac{16}{360} \times T$
$-3V_{DC}$	$\frac{d}{360} \times T$	$\frac{25}{360} \times T$

$-4V_{DC}$	$\frac{e}{360} \times T$	$\frac{55}{360} \times T$
$-3V_{DC}$	$\frac{d}{360} \times T$	$\frac{25}{360} \times T$
$-2V_{DC}$	$\frac{c}{360} \times T$	$\frac{16}{360} \times T$
$-V_{DC}$	$\frac{b}{360} \times T$	$\frac{14}{360} \times T$
0	$\frac{a}{360} \times T$	$\frac{7,5}{360} \times T$

3.5.4. Perancangan Rangkaian *Gate Driver*

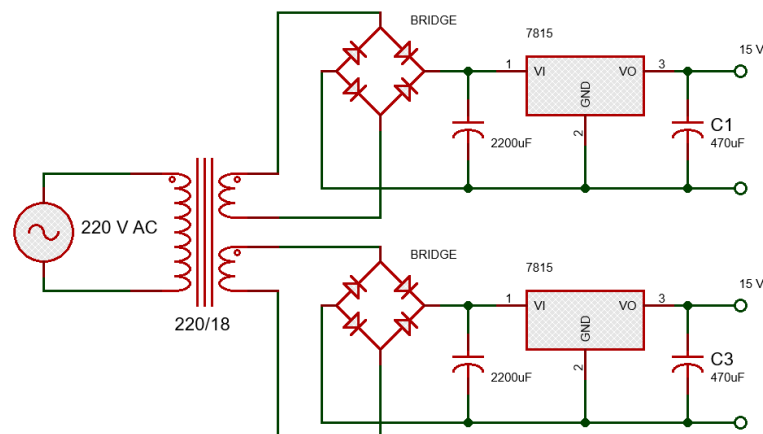
Tegangan keluaran dari pin Arduino Mega adalah sebesar 5 V. Tegangan ini belum mampu untuk mengaktifkan MOSFET secara optimal. Besarnya tegangan *gate* pada MOSFET IRFP460 agar dapat bekerja secara optimal disarankan sekitar 15 V, sehingga diperlukan suatu rangkaian yang mampu memindahkan sekaligus menguatkan tegangan keluaran Arduino menjadi 15 V. Rangkaian yang dapat melakukan hal tersebut adalah rangkaian *gate driver*. Pada penelitian ini, komponen-komponen yang digunakan pada rangkaian *gate driver* terdiri dari IC *Optocoupler* HCPL 3120, resistor 47 ohm, resistor 220 ohm, serta kapasitor Mylar 0,1 μF . Jumlah rangkaian *gate driver* yang buat harus sama dengan jumlah MOSFET yang digunakan, sehingga pada penelitian ini dibuat sebanyak 16 buah rangkaian *gate driver*. Adapun rangkaian *gate driver* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.6 berikut.



Gambar 3.6 Rangkaian *Gate Driver*.

3.5.5. Perancangan Rangkaian DC *Power Supply*

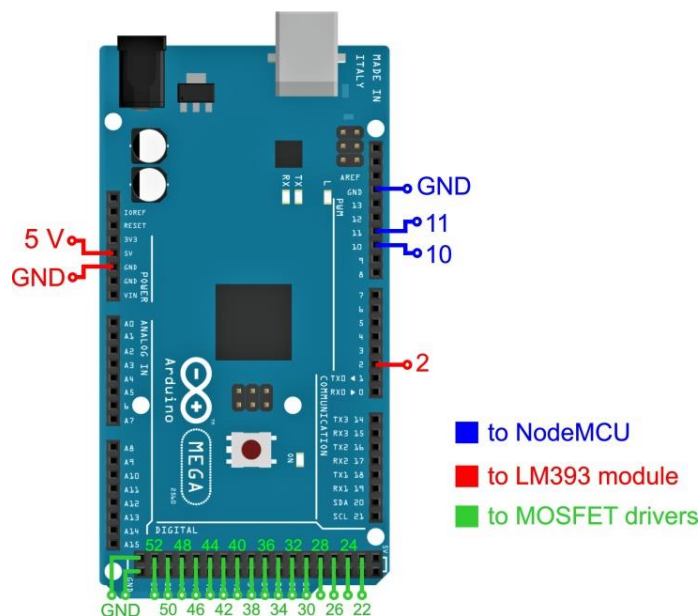
Rangkaian *gate driver* memerlukan suplai tegangan DC sebesar 15 V. Oleh karena itu, dirancang rangkaian DC *power supply* 15 V. Rangkaian *power supply* ini terdiri dari Transformator CT 220/18 Volt 1 ampere, dioda *bridge*, IC *Regulator* LM1815, kapasitor 2200 μ F, serta kapasitor 470 μ F. Jumlah rangkaian DC *power supply* yang dibuat pada penelitian ini berjumlah 16 (menyesuaikan jumlah rangkaian *gate driver*). Adapun rangkaian DC *power supply* yang akan dibuat pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.7 berikut.



Gambar 3.7 Rangkaian DC *Power Supply*.

3.5.6. Perancangan *Wiring* Arduino Mega

Penelitian ini menggunakan *board* mikrokontroler Arduino Mega 2560. *Board* ini memiliki pin *input* dan *output* yang cukup banyak, sehingga tepat untuk diaplikasikan pada *multilevel inverter* yang menggunakan banyak saklar semikonduktor seperti MOSFET ataupun IGBT. Terdapat tiga jenis *hardware* yang terhubung dengan Arduino Mega. Ketiga *hardware* tersebut adalah modul LM393, NodeMCU, dan rangkaian *gate driver*. Adapun modul LM393 dihubungkan dengan pin 2, pin 5 V, dan pin GND Arduino. Kemudian, NodeMCU dihubungkan dengan pin 10, pin 11, dan pin GND Arduino. Selanjutnya, untuk keperluan *switching*, digunakan pin 22, pin 24, pin 26, pin 28, pin 30, pin 32, pin 34, pin 36, pin 38, pin 40, pin 42, pin 44, pin 46, pin 48, pin 50, pin 52, dan 2 buah pin GND yang dihubungkan ke 16 buah rangkaian *gate driver*.



Gambar 3.8 Perancangan *Wiring* Arduino Mega 2560.

Pin Arduino Mega yang digunakan untuk keperluan *switching* MOSFET secara lebih detail dapat dilihat pada tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Pin Arduino Mega untuk Pensaklaran MOSFET

Pin Arduino Mega	Saklar
Pin 22	MOSFET 1
Pin 24	MOSFET 2
Pin 26	MOSFET 3
Pin 28	MOSFET 4
Pin 30	MOSFET 5
Pin 32	MOSFET 6
Pin 34	MOSFET 7
Pin 36	MOSFET 8
Pin 38	MOSFET 9
Pin 40	MOSFET 10
Pin 42	MOSFET 11
Pin 44	MOSFET 12
Pin 46	MOSFET 13
Pin 48	MOSFET 14
Pin 50	MOSFET 15
Pin 52	MOSFET 16

3.5.7. Perancangan *Wiring* Sensor Kecepatan

Penelitian ini menggunakan modul sensor kecepatan LM393 untuk mengetahui kecepatan motor induksi. Modul ini tidak serta-merta menghasilkan data berupa nilai kecepatan, tetapi data yang dihasilkan berupa pulsa *on* dan *off*, sehingga pulsa tersebut perlu dikonversi. Pin 2 (pin *interrupt* 0) pada Arduino Mega digunakan untuk membaca pulsa *on* dan *off* yang dihasilkan modul LM393. Selanjutnya, pulsa *on* dan *off* tersebut dikonversi pada Arduino Mega untuk mengetahui nilai kecepatan yang dihasilkan. Cara yang digunakan untuk

mengkonversi nilai pulsa tersebut menjadi nilai kecepatan ditunjukkan pada persamaan 3.1 berikut.

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

di mana:

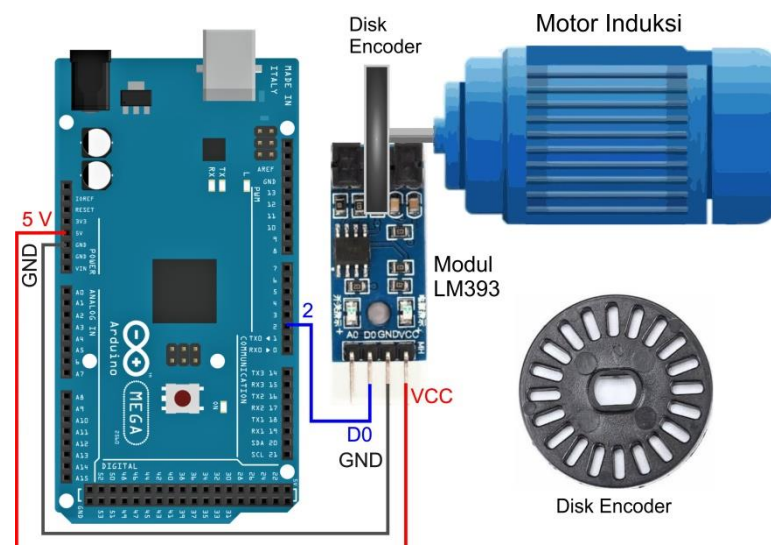
n = kecepatan (rpm)

P = jumlah pulsa yang dihasilkan sensor

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

t = waktu *sampling* (detik)

Perancangan *Wiring* sensor kecepatan dengan Arduino Mega pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.9 Perancangan *Wiring* Sensor Kecepatan dengan Arduino Mega.

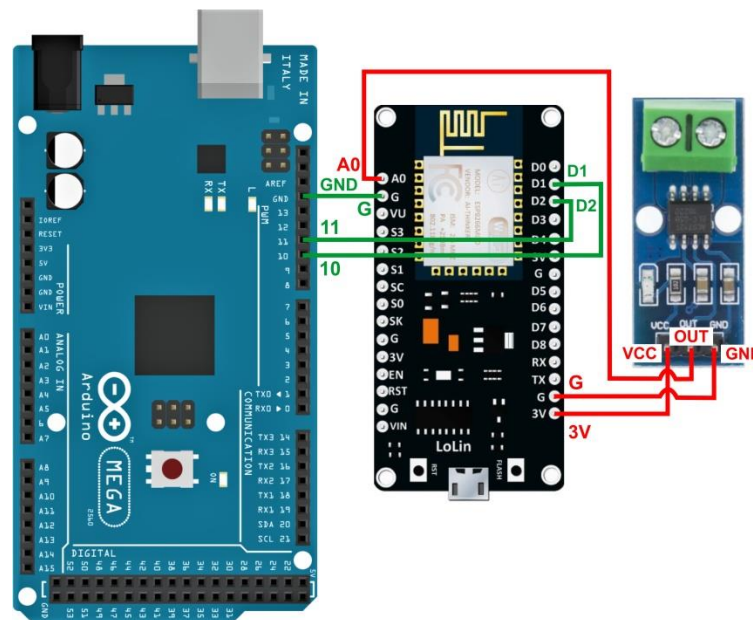
Pin *Wiring* sensor kecepatan dengan Arduino Mega pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Pin *Wiring* Sensor Kecepatan dengan Arduino Mega

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

3.5.8. Perancangan *Wiring* NodeMCU

NodeMCU berfungsi sebagai penghubung antara Arduino Mega dengan *smartphone* agar dapat saling berkomunikasi melalui koneksi internet dan menerima data berupa arus listrik dari modul ACS712. Adapun perancangan *Wiring* NodeMCU dengan Arduino Mega dan Modul ACS712 pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.10 berikut.



Gambar 3.10 Perancangan *Wiring* NodeMCU dengan Arduino Mega dan Modul ACS712.

Pin *Wiring* NodeMCU dengan Arduino Mega pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 Pin *Wiring* NodeMCU dengan Arduino Mega

Pin NodeMCU	Pin Arduino Mega
D1	10
D2	11
G	GND

Adapun pin *Wiring* NodeMCU dengan modul ACS17 pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.6 berikut.

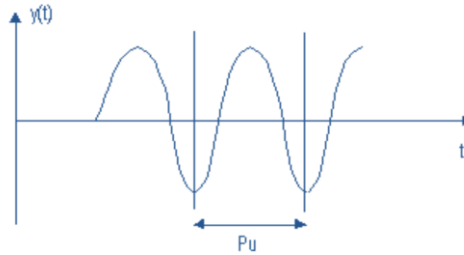
Tabel 3.6 Pin *Wiring* NodeMCU dengan Modul ACS17

Pin NodeMCU	Pin Modul ACS17
3V	VCC
G	GND
A0	OUT

3.5.9. Penentuan Parameter Pengendali PID

Penentuan parameter pengendali PID pada penelitian ini menggunakan metode osilasi Ziegler-Nichols. Pertama, nilai K_i dan K_d diatur nol ($K_p = 0$, $K_d = 0$). Kemudian, nilai K_p diatur hingga sistem menjadi berosilasi dengan amplitudo yang relatif sama (*sustained oscillation*). Nilai K_p yang mengakibatkan sistem mencapai kondisi *sustained oscillation* tersebut merupakan nilai K_p sementara dan

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



Gambar 3.11 Kondisi *Sustained Oscillation* pada Sistem.

Kemudian, penentuan nilai K_p , T_i , dan T_d ditentukan berdasarkan tabel 3.7 berikut.

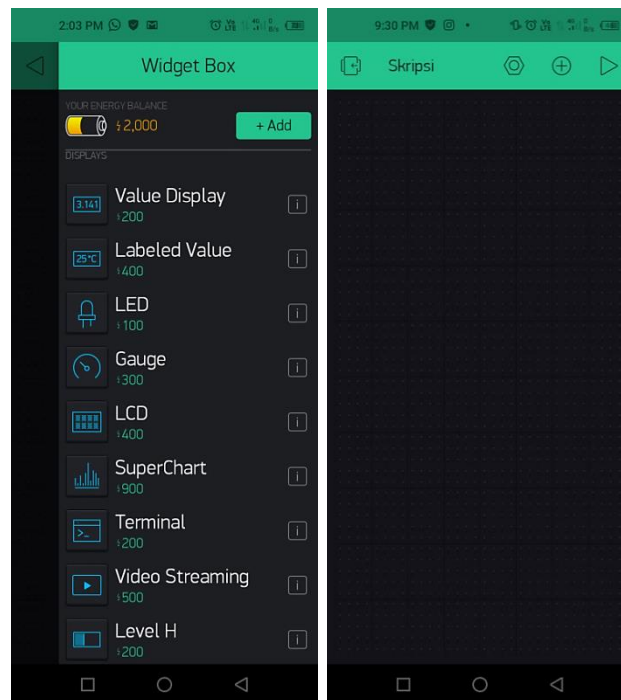
Tabel 3.7 Tabel Metode Osilasi Ziegler-Nichols

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

Adapun nilai K_i dan K_d ditentukan berdasarkan persamaan 3.10 dan persamaan 3.11.

3.5.10. Perancangan Aplikasi *Smartphone*

Proses *controlling* dan *monitoring* kecepatan motor induksi pada penelitian ini dilakukan secara *real time* melalui aplikasi *smartphone* yang terkoneksi ke jaringan internet. Proses pembuatan aplikasi *smartphone* pada penelitian ini menggunakan aplikasi Blynk yang tersedia baik di Google Play Store maupun App Store.



Gambar 3.12 Tampilan Aplikasi Blynk.

Pada aplikasi Blynk sudah tersedia berbagai macam *widget* yang dapat digunakan untuk mendukung keperluan IoT, misalnya untuk keperluan *controlling* dan *monitoring hardware*.

3.5.11. Pemrograman Arduino Mega dan NodeMCU

Pada penelitian ini proses pemrograman Arduino Mega 2560 dan NodeMCU ESP8266 dilakukan menggunakan aplikasi Arduino IDE.

1. Pemrograman Arduino Mega

Pemrograman pada Arduino Mega terdiri dari:

- Pemrograman untuk pensaklaran MOSFET.
- Pemrograman untuk pembacaan sensor kecepatan.
- Pemrograman untuk pengendali PID.

- Pemrograman untuk menerima data dari NodeMCU dan untuk mengirim data ke NodeMCU.



Gambar 3.13 Tampilan Aplikasi Arduino IDE.

2. Pemrograman NodeMCU

Pemrograman pada NodeMCU terdiri dari:

- Pemrograman untuk menerima data dari *smartphone* dan menampilkan data ke *smartphone*.
- Pemrograman untuk mengirim data ke Arduino Mega dan menerima data dari Arduino Mega.
- Pemrograman untuk membaca 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, diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

1. *Cascaded H-Bridge multilevel inverter* 9 tingkat dapat digunakan dalam pengendalian kecepatan motor induksi.
2. Penentuan parameter pengendali PID menggunakan metode osilasi Ziegler-Nichols menghasilkan nilai $K_p = 0,0132$, $K_i = 0,0132$, dan $K_d = 0,0033$. Respon kecepatan motor induksi yang dihasilkan memiliki rata-rata *rise time* selama 2,775 detik, rata-rata *settling time* selama 4,112 detik, dan tidak memiliki *overshoot*.
3. Aplikasi *smartphone* dapat digunakan untuk mengatur dan memonitor kecepatan motor induksi di mana saja dan kapan saja dari jarak dekat maupun jauh melalui jaringan internet.

5.2. Saran

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

1. Perlu dilakukan penambahan level tegangan *multilevel inverter* menjadi 11 tingkat atau lebih untuk menghasilkan THD yang lebih rendah dan kualitas yang lebih baik.

2. Diperlukan rangkaian *gate driver* dengan tegangan keluaran yang sesuai dengan tegangan *gate* MOSFET agar MOSFET dapat membuka dan menutup secara penuh. Hal tersebut dilakukan untuk menghindari MOSFET menjadi panas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Harmini dan T. Nurhayati, “Pengembangan Inverter sebagai Pengendali Kecepatan Motor Induksi 1 Phasa,” Universitas Semarang, Semarang, September. 2015.
- [2] N. Evalina, A. Aziz H, dan Zulfikar, “Pengaturan Kecepatan Putaran Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Programmable Logic Controller,” *Journal of Electrical Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 73–80, 2018.
- [3] B. Rajesh and Manjesh, “Comparison of harmonics and THD suppression with three and 5 level multilevel inverter cascaded H-bridge,” *Proceedings of IEEE International Conference Circuit, Power Computing Technologies, ICCPCT 2016*, pp. 3–8, 2016.
- [4] I. Husnaini, Asnil, Habibullah, and Krismadinata, “Komparasi Multilevel Inverter Satu Fasa,” *Jurnal EECCIS*, vol. 13, no. 2, pp. 95–99, 2019.
- [5] I. Hidayat, “Simulasi Pengendali Kecepatan Motor Dc dengan Penyearah Terkendali Semi Konverter Berbasis Matlab/Simulink,” *Telkomnika - Telecommunication, Computing, Electronics and Control*, vol. 2, no. 1, pp. 41–48, 2004.
- [6] Jepry, “Perancangan Pengendali PID pada Proportional Valve,” Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia, 2010.

- [7] D. Suhendra, "Perancangan Alat Pengontrolan Frekuensi dalam Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa Menggunakan Kontrol PID," Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia, 2014.
- [8] M. I. F. Negara, "Kontrol Kecepatan Motor 1 Fasa Menggunakan Inverter dengan Metode Hard Switching," Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Malang, Malang, Indonesia, 2017.
- [9] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, *Electronic Machines*, 4th ed. New Delhi, India: Mc Graw Hill India, 2010.
- [10] A. K. Koshti and M. N. Rao, "A brief review on multilevel inverter topologies," *2017 International Conference on Data Management, Analytics, and Innovation (ICDMAI)*, pp. 187–193, 2017.
- [11] M. Anzari, J. Meenakshi, and V. T. Sreedevi, "Simulation of a transistor clamped H-bridge *multilevel inverter* and its comparison with a conventional H-bridge *multilevel inverter*," *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2014*, pp. 958–963, 2014.
- [12] G. Singh and V. K. Garg, "THD analysis of cascaded H-bridge multi-level inverter," *4th IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control, ISPCC 2017*, vol. 2017-January, pp. 229–234, 2017.
- [13] V. Tipsuwanporn, W. Sawaengsinkasikit, A. Numsomran, and K. Somsamai, "9-Level *inverter* for induction motor control," *ICCAS 2010 - International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 2462–

2466, 2010.

- [14] K. Semarang, “Optimalisasi Penggunaan Alat Praktikum Power Supply Switching dengan Menggunakan Topologi Half Bridge Konverter sebagai Alat Bantu Praktikum Elektronika Analog,” vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [16] H. Sutriharjo, “Rancang Bangun *Inverter* Full Bridge Satu Fasa Menggunakan Teknik Dynamic Evolution Control,” Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia, 2017.
- [17] T. Darmana dan W. Sya’ban, “Rancang Bangun Alat Ukur Kecepatan Putaran Motor Dan Pendeteksi Kestabilan Putaran Pada Porosnya,” *Jurnal Energi & Kelistrikan*, vol. 7, no. 1, p. 71, 2015.
- [18] R. Indiatama, “Visualisasi Monitoring Performance Pada Motor Listrik Ac 1 Fasa Berbasis Visual Augmented Reality,” Tugas Akhir, Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia, 2019.
- [19] Junaidi dan Y. D. Prabowo, *Project Sistem Kendali Elektronik Berbasis Arduino*, Bandar Lampung: AURA, 2018.
- [20] R. P. Nastiti dan W. Susanto, “Modul Pengaturan Kecepatan Motor Satu Phasa Dengan PID Berbasis Mikrokontroler Menggunakan Interface Labview,” Tugas Akhir, Program Studi D3 Teknik Elektro, ITS, Surabaya, Indonesia, 2016.
- [21] Y. Efendi, “Internet Of Things (Iot) Sistem Pengendalian Lampu Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Mobile,” *Jurnal Ilmiah Ilmu Komputer*, vol. 4, no. 1, pp. 19–26, 2018.
- [22] A. Satriadi, Wahyudi, dan Y. Christiyono, “Perancangan Home

Automation Berbasis NodeMCU,” *Transient*, vol. 8, no. 1, pp. 64–71, 2019.

- [23] A. Hasan, “Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban pada Inkubator Bayi Berbasis Internet of Things (IoT),” Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Semarang, Semarang, Indonesia, 2019.