

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Pada Tinjauan Pustaka ini dijelaskan dan diuraikan dari hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan permasalahan dan tujuan pada tugas akhir ini. Pada tabel 2.1 dibawah menyajikan daftar jurnal yang diambil sebagai referensi pada penelitian Tugas Akhir ini.

Tabel 2. 1 Tinjaun Pustaka

Judul Penelitian	Penulis/Tahun	Keterangan
Rancang Bangun Sistem Kendali Motor Induksi 3 Fasa Berbasis <i>Internet of Things</i> (IOT).	Alfikri, M. R. (2024)	Rancang bangun kendali kecepatan motor induksi tiga dengan sistem kendali jarak jauh menggunakan <i>platform</i> Blynk.
Kendali P, PI, Dan PID Pada Pengaturan Kecepatan Motor DC Dengan Penalaan Ziegler-Nichols	Fitria, S. dan Annisa, F. (2018)	Perancangan kendali P, PI dan PID pada pengaturan kecepatan motor DC menggunakan penalaan Ziegler-Nichols.
Pengaruh Perubahan Frekuensi Dalam Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Berbasis <i>Variable Frequency Driver</i> (VFD) Terhadap Arus Kumparan Motor	Alfian, dkk (2023)	Pengaruh perubahan frekuensi pada motor induksi tiga fasa dengan menggunakan VFD, membandingkan perbedaan besarnya arus, tegangan dan RPM yang dihasilkan pada frekuensi yang telah ditentukan

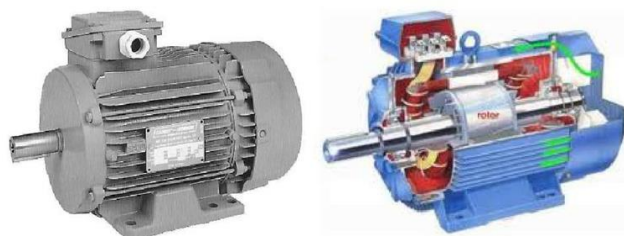
2.2 Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (ac) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke statornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator[4].

Motor induksi sangat banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Motor induksi yang umum dipakai adalah motor induksi satu fasa dan motor induksi tiga fasa. Motor induksi tiga fasa dioperasikan pada sistem tenaga tiga fasa dan banyak digunakan di dalam berbagai bidang industri dengan kapasitas yang besar. Motor induksi satu fasa dioperasikan pada sistem tenaga satu fasa dan banyak digunakan terutama untuk peralatan rumah tangga seperti kipas angin, lemari es, pompa air, mesin cuci dan sebagainya karena motor induksi satu fasa mempunyai daya keluaran yang rendah.

2.2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan suatu alat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan menggunakan prinsip induksi[4]. Ketika diberi energi oleh catu daya tiga fasa yang seimbang, motor induksi tiga fasa menunjukkan tingkat stabilitas terbesar dalam kondisi pengoperasian biasa. Pada Gambar 2.1 merupakan bentuk fisik dari motor 3 fasa.



Gambar 2. 1 Motor Induksi Tiga Fasa

Sumber: (S Noor, dkk, 2023)

Data-data motor induksi mengenai daya, tegangan dan daya lain yang berhubungan dengan kerja motor induksi dibuatkan pada plat nama (*name plate*) motor induksi. Spesifikasi dan gambar spesifikasi ditunjukkan pada Tabel 2.2 dan Gambar 2.2.

Tabel 2. 2 Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa

Frekuensi	Daya	Kecepatan	Tegangan	Arus	Faktor Daya
50 Hz	0.55/0.75 KW/HP	1380 RPM	220/380V Δ/Y	2.8/1.6 A	0,73 Cos ϕ
60 Hz	0.63/0.86 KW/HP	1656 RPM	260/440VΔ/Y	2.7/1.58 A	0,73 Cos ϕ



Gambar 2. 2 Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa

Apabila dalam perancangan sistem tenaga listrik, penting untuk memahami bagaimana daya listrik yang dikonsumsi atau dibangkitkan oleh motor ini. Berikut adalah perhitungan dasar yang digunakan untuk menghitung daya aktif pada motor induksi tiga fasa, baik untuk sambungan Star (Y) maupun Delta (Δ).

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \quad (2.1)$$

Keterangan:

P = Daya Aktif (Watt)

V = Tegangan (VAC)

I = Arus

Cos ϕ = Faktor Daya

2.2.2 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Konstruksi motor induksi terdiri atas dua bagian utama, yaitu:

a. Stator (bagian yang diam)

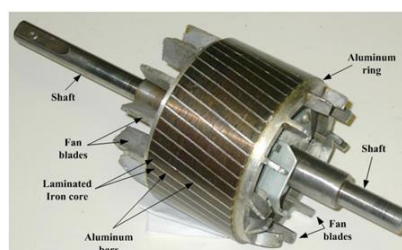
Inti stator terbuat dari lapisan-lapisan plat baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau pelat baja yang dipabrikasi. Lilitan-lilitan sama halnya dengan lilitan dari generator sinkron diletakkan dalam alur-alur stator yang terpisah 120 derajat listrik.

b. Rotor (bagian yang berputar)

Konstruksi rotor dalam motor induksi dibagi menjadi dua macam, yaitu:

1. Rotor sangkar tupai

Rotor sangkar tupai adalah konstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasang paralel dengan poros dan mengelilingi permukaan inti. Konduktornya tidak terisolasi dengan inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil, yaitu konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubungkan singkatkan dengan cincin ujung.[4] Konduktor rotor dan cincin ujung menyerupai sangkar tupai yang berputar sehingga diberi nama demikian. Dengan demikian, motor induksi yang dibangun dengan rotor tipe sangkar tupai disebut motor induksi rotor sangkar tupai, atau secara singkat motor induksi rotor sangkar. Berikut bentuk fisik dari rotor sangkar tupai ditunjukkan pada Gambar 2.3.



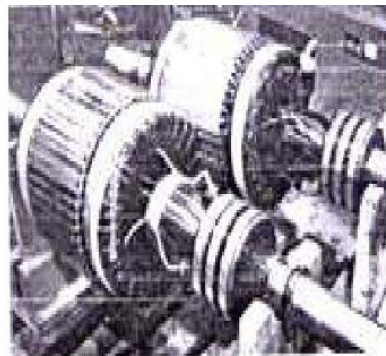
Gambar 2. 3 Rotor Sangkar Tupai

Sumber: (S Noor, dkk, 2023)

2. Rotor Belitan

Rotor belitan sesuai dengan namanya, rotor dililit dengan lilitan (kumparan) tiga fasa terisolasi serupa dengan lilitan stator. Satu ujung lilitan fasa rotor

dihubungkan secara bintang (Y), sedangkan ujung-ujung yang lain terbuka dikeluarkan atau dihubungkan ke cincin slip (*slip rings*) yang terpasang pada poros rotor. Ketiga cincin slip dan sikat sikat dapat dilihat berada di sebelah kanan kumparan rotor[4]. Dengan mempergunakan sikat-sikat yang lekatkan diam diatas pada permukaan cincin slip, terminal kumparan rotor dapat dihubungkan ke rangkaian luar. Misalnya, dihubungkan dengan tahanan variabel luar untuk keperluan pengaturan kecepatan atau mengurangi arus *start*. Dengan demikian, motor induksi yang dibangun dengan rotor lilitan disebut motor induksi rotor lilitan atau motor induksi *slip ring*. Berikut bentuk fisik dari rotor belitan ditunjukkan pada Gambar 2. 4.



Gambar 2. 4 Rotor Belitan

Sumber: (S Noor, dkk, 2023)

2.2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Prinsip kerja motor induksi tiga didasarkan pada hukum Faraday (tegangan induksi akan ditimbulkan oleh perubahan induksi magnetik pada suatu lilitan) dan hukum Lorentz (perubahan magnetik akan menimbulkan gaya). Prinsip dasar dapat dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada kumparan stator akan timbul medan putar.
- 2) Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor rotor, akibatnya pada kumparan rotor diinduksikan tegangan.
- 3) Karena rangkaian rotor merupakan rangkaian tertutup, maka tegangan induksi rotor menghasilkan arus (I).

- 4) Adanya arus (I) di dalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.
- 5) Bila torsi mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk menggerakkan beban, rotor akan berputar searah dengan putaran medan putar stator.
- 6) Dari uraian nomor 2), tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor rotor oleh medan putar. Ini berarti agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif anatar kecepatan medan putar dan kecepatan rotor

Kecepatan gerakan medan ini konstan dan tergantung atas jumlah kutub stator dan frekuensi sumber daya. Kecepatan medan putar ini disebut kecepatan sinkron, yang dinyatakan dengan rumus:

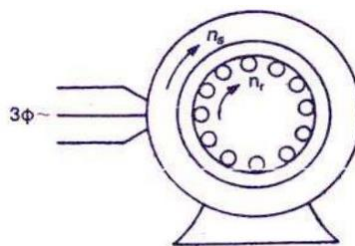
$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.2)$$

Keterangan:

n_s = Kecepatan sinkron (rpm)

f = Frekuensi (Hz)

p = Jumlah kutub motor induksi



Gambar 2. 5 Motor induksi yang dihubungkan dengan sumber tiga fasa

Sumber: (S Noor, dkk, 2023)

Dapat dilihat pada Gambar 2.5, dalam motor induksi kecepatan putaran rotor n_r lebih kecil sedikit daripada kecepatan sinkron n_s tidak ada perubahan fluksi yang dilingkupi rotor atau tidak ada pemotongan medan magnet oleh penghantar rotor, akibatnya tidak ada tegangan induksi di rotor dan torsi juga nol. Oleh karena itu, n_r harus lebih kecil dari n_s . Perbedaan antara kecepatan sinkron dan kecepatan rotor disebut *slip* yang dirumuskan sebagai berikut:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.3)$$

Keterangan:

s = slip

n_r = kecepatan rotor (rpm)

n_s = kecepatan medan putar (kecepatan sinkron) (rpm)

2.3 Variable Frequency Drive (VFD)

VFD adalah sebuah peralatan yang berfungsi untuk mengatur kecepatan motor AC tiga fasa dengan cara merubah frekuensinya. Fungsi dari VFD adalah untuk mengontrol energi supply utama ke proses melalui shaft motor listrik, dengan cara mengontrol dua besaran, yaitu torsi dan kecepatan. VFD banyak diperlukan dalam industri. Jika sebelumnya banyak dipergunakan system mekanik, kemudian beralih ke motor slip/pengereman maka saat ini banyak menggunakan semikonduktor. Tidak seperti softstarter yang level tegangan, VFD menggunakan frekuensi untuk mengatur *speed* motor. Seperti diketahui, pada kondisi ideal (tanpa slip) Jadi dengan memainkan perubahan frekuensi pada motor, speed akan berubah[5].

Prinsip kerja pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan VFD serupa dengan sistem pengaturan berbasis inverter. Hal ini disebabkan oleh tegangan keluaran VFD yang berbentuk sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dihasilkan oleh inverter di dalam VFD[6]. Salah satu keunggulan inverter berbasis PWM dibandingkan dengan jenis inverter lainnya adalah rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluarannya. Selain itu, teknik PWM menjadi lebih efisien dan mudah diterapkan berkat perkembangan teknologi semikonduktor, khususnya komponen daya dengan kecepatan switching yang sangat tinggi. Spesifikasi VFD yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 2.6.

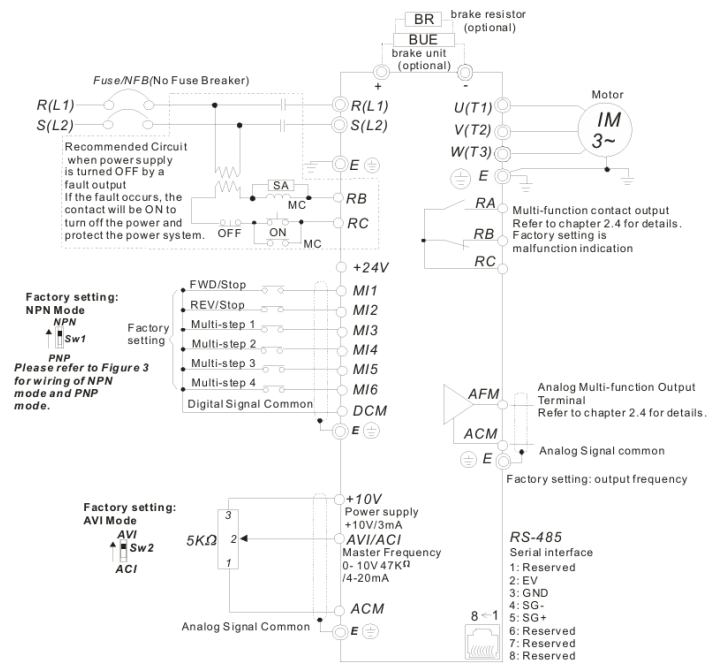


Gambar 2. 6 Spesifikasi VFD

Prinsip kerja VFD yang sederhana adalah:

- 1) Tegangan yang masuk dari jala jala 50 Hz dialirkan ke *board Rectifier*/penyearah DC, dan ditampung ke bank capacitor. Jadi dari AC dijadikan DC.
- 2) Tegangan DC kemudian diumpankan *board inverter* untuk dijadikan AC kembali dengan frekuensi sesuai kebutuhan. Jadi dari DC ke AC yang komponen utamanya adalah Semikonduktor aktif sebagai IGBT.

Penggunaan Delta VFD007EL21A dalam aplikasi pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa digunakan untuk mengontrol kecepatan pada motor induksi tiga fasa sesuai dengan *setpoint*. Dengan kontrol P, PI dan PID yang diimplementasikan pada arduino UNO, *output* PWM dari arduino UNO berfungsi untuk mengatur frekuensi pada VFD yang akan mempengaruhi kecepatan dari motor induksi tiga fasa, sensor *hall effect* memberikan umpan balik ke Arduino UNO, menambah atau mengurangi frekuensi VFD secara otomatis, guna mempertahankan stabilitas kecepatan motor induksi tiga fasa. Rangkaian skematik VFD007EL21A dapat dilihat pada Gambar 2.7. Penjelasan *wiring* yang digunakan pada sistem dapat dilihat pada Tabel 2.3.



Gambar 2. 7 Rangkaian Skematik VFD007EL21A

Sumber: (*User manual VFD – EL*)

Tabel 2. 3 Konfigurasi Pin yang Digunakan Pada VFD007EL21A

Channel	Keterangan	Tegangan
L1 dan L2	Di isi dengan phasa dan netral dari PLN	220 – 240 VAC
U, V, dan W	Dihubungkan ke motor tiga fasa	0 – 240 VAC
AVI	Input AVI diisi dari modul <i>PWM to Voltage</i> (0 – 10V)	0 – 10 VDC
ACM	Input ACM diisi dari GND <i>PWM to Voltage</i> (0 – 10V)	GND

2.4 Arduino UNO

Arduino adalah mikrokontroler single-board yang sifatnya open-source. Arduino diciptakan untuk memudahkan penggunaan elektronik dalam berbagai hal terutama dalam hal pemrograman. Arduino ini termasuk bagian dari mikrokontroler yang diprogram menggunakan bahasa pemrograman arduino yang pemrogramannya menggunakan software Arduino IDE. Bahasa yang digunakan untuk pemrograman arduino ini juga mirip dengan syntax bahasa C[7]. Arduino ini memiliki banyak jenis yang penggunaannya disesuaikan dengan kebutuhan

pengguna. Untuk tugas akhir kali ini, penulis menggunakan Arduino UNO. Berikut bentuk fisik dari arduino UNO ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Arduino UNO

Sumber: (Andi A, dkk, 2013)

Arduino UNO adalah sebuah *board* mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328. Arduino UNO mempunyai 14 pin *digital input/output* (6 di antaranya dapat digunakan sebagai *output* PWM), 6 *input analog*, sebuah osilator Kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah *power jack*, sebuah *ICSP header*, dan sebuah tombol *reset*. Berikut spesifikasi dari Arduino UNO ditunjukkan pada Tabel 2.4 dan Gambar 2.9.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Mikrokontroler Arduino UNO

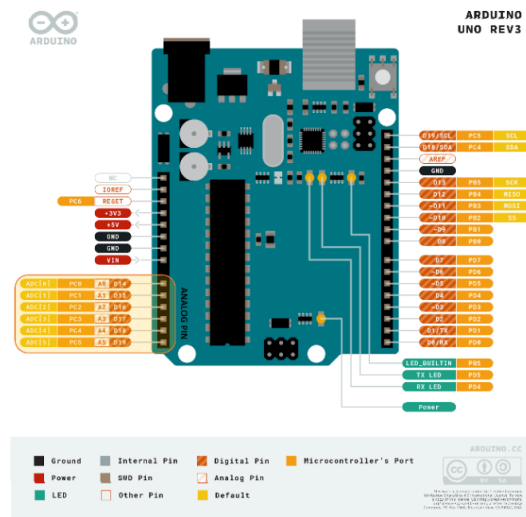
Keterangan	Spesifikasi
Mikrokontroler	ATmega 328
Tegangan operasi	5 V
Tegangan <i>Input</i>	7 – 12 V
I/O digital pin	14 pin
Input analog pin	6 pin
Arus digital pin	40 mA
Arus pada pin 3,3	50 mA
<i>Flash memory</i>	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB

Clock speed

16 MHz

Dimensi

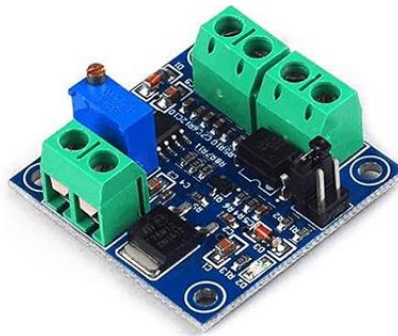
658,8 mm x 533,4 mm

**Gambar 2. 9** Spesifikasi Arduino UNO

Sumber: (Andi A, dkk, 2013)

2.5 PWM to Voltage Converter Module

PWM (*Pulse Width Modulation*) adalah metode kontrol daya yang menggunakan sinyal digital dengan pengaturan lebar pulsa untuk menghasilkan tegangan rata-rata yang bervariasi. Prinsip kerjanya melibatkan pengaturan waktu nyala (*on*) dan mati (*off*) dari sinyal pada frekuensi tertentu, sehingga menciptakan efek tegangan seolah-olah berubah secara analog. Untuk mengubah sinyal PWM menjadi tegangan analog, dibutuhkan modul *PWM to voltage*. Modul ini menggunakan rangkaian *filter low-pass*, terdiri dari beberapa resistor dan kapasitor, untuk meratakan sinyal digital menjadi keluaran tegangan DC yang halus. Pada Gambar 2.10 merupakan bentuk fisik *PWM to voltage converter module*.



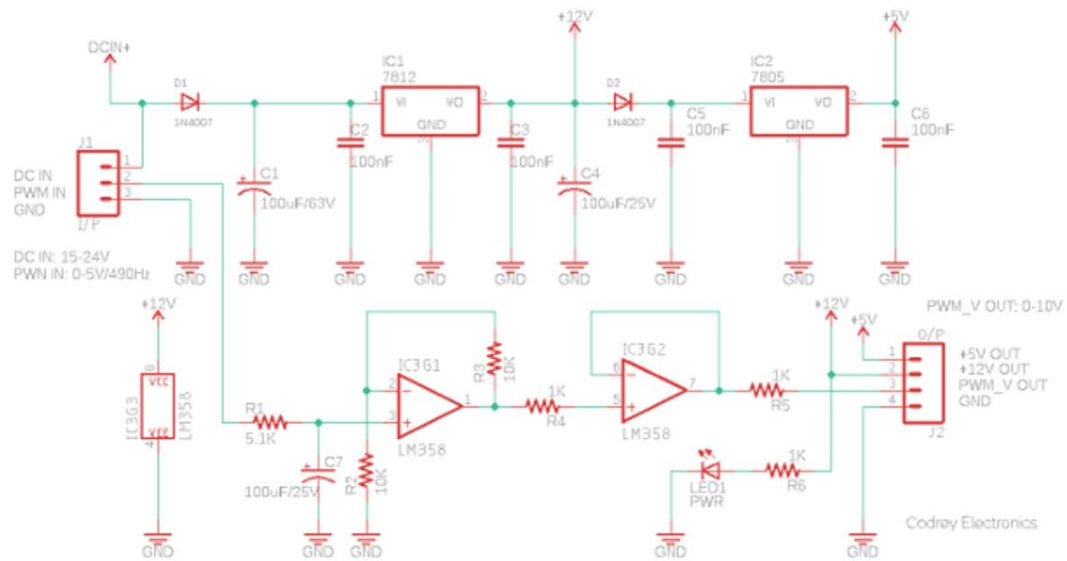
Gambar 2. 10 PWM to Voltage Converter Module

Sumber: (T.K. Hareendran, 2018)

Konversi ini memungkinkan kompatibilitas yang luas dengan kontroler seperti Arduino dan PLC. Modul PWM to voltage juga dilengkapi op-amp untuk memperkuat sinyal output, memastikan tegangan keluaran sesuai dengan kebutuhan perangkat yang dikendalikan. Spesifikasi dan rangkaian skematik ditunjukkan pada Tabel 2.5 dan Gambar 2.11.

Tabel 2. 5 Spesifikasi PWM to Voltage Converter Module

Keterangan	Spesifikasi
<i>Working Voltage</i>	DC 12V to 30V (>100mA)
<i>PWM Signal Frequency</i>	1kHz to 3kHz
<i>PWM Signal Input Voltage</i>	5V (for Microcontroller) or 24V (for PLC)
<i>Conversion Range</i>	0-100% PWM to 0-10V
<i>Allowable Error</i>	5%



Gambar 2. 11 Rangkaian Skematik PWM to Voltage Conveter Module

Sumber: (T.K. Hareendran, 2018)

Pengaturan tegangan keluaran yang sesuai dengan sinyal masukan menggunakan *Low Pass Filter* (LPF) pada rangkaian ini berperan penting dalam menyesuaikan tegangan keluaran berdasarkan sinyal masukan dengan memperhalus sinyal PWM menjadi tegangan DC. Walaupun LPF ini sederhana, pemilihan nilai komponen RC (*Resistor Capacitor*) sangat penting, karena nilai-nilai ini menentukan karakteristik *filter*, seperti kecepatan *respons filter* terhadap sinyal masukan dan seberapa besar *ripple* yang dapat diterima[8].

Keluaran dari PWM to Voltage (0-10V) tersebut berhubungan dengan masukan PWM yang akan diberikan, jika nilai PWM diberikan 100% maka tegangan yang dihasilkan akan 10V. Secara matematis hubungan antara tegangan dan PWM dirumuskan sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{\text{Duty Cycle (\%)}}{100} \times 10 \quad (2.4)$$

Jika resolusi PWM adalah 8 – bit maka dirumuskan:

$$V_{out} = \frac{PWM}{255} \times 10 \quad (2.5)$$

Keterangan:

V_{out} = Keluaran tegangan yang dihasilkan

Duty Cycle (%) = Persentase PWM

PWM = Nilai PWM yang diberikan dengan resolusi 8 bit (0-255)

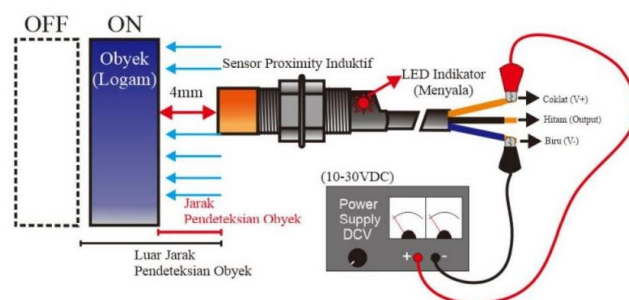
2.6 Sensor Proximity Induktif

Sensor proximity merupakan perangkat elektronik yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan suatu objek di sekitarnya. Sensor ini bekerja dengan memancarkan energi berupa cahaya, gelombang suara, atau medan elektromagnetik. Salah satu jenis sensor proximity yang sering digunakan adalah sensor induktif. Sensor induktif berfungsi mendeteksi objek logam dalam jarak tertentu tanpa perlu menyentuhnya secara langsung. Cara kerja sensor ini didasarkan pada prinsip induksi elektromagnetik, di mana medan magnet yang dihasilkan akan menimbulkan arus induksi saat terdapat logam di dekatnya, sehingga sensor dapat mengenali keberadaan objek tersebut[9]. Bentuk fisik dan Cara kerja dapat dilihat pada Gambar 2.12 dan Gambar 2.13.



Gambar 2. 12 Sensor Proximity Induktif

Sumber: (Joshua H., 2018)



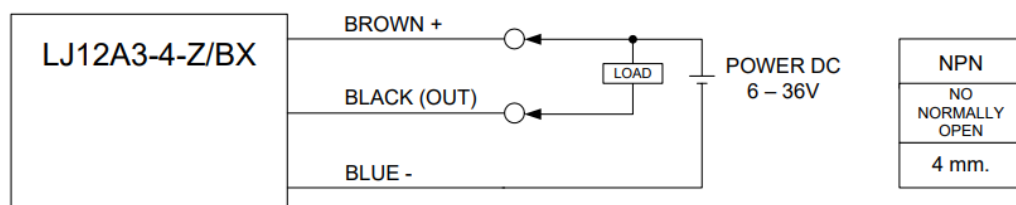
Gambar 2. 13 Cara Kerja Sensor Proximity

Sumber: (Joshua H., 2018)

Sensor proximity yang bekerja berdasarkan jarak memanfaatkan medan elektromagnetik yang terbentuk di sekitar permukaannya, hasil dari osilator dengan frekuensi tinggi. Ketika material logam dengan sifat induktif atau bahan lain yang bersifat kapasitif berada di dekat sensor, material tersebut akan memengaruhi amplitudo dari sinyal osilasi yang dihasilkan[9]. Spesifikasi dan rangkaian skematik ditunjukkan pada Tabel 2.6 dan Gambar 2.14.

Tabel 2. 6 Spesifikasi Sensor Proximity Induktif

Keterangan	Spesifikasi
Tipe	LJ12A3-4-Z/BX
Tegangan	DC 6V – 36V
Arus	200 mA
Output	NPN NO
Deteksi	Logam
Jarak Deteksi	0 – 4mm



Gambar 2. 14 Rangkaian Skematik Sensor Proximity Induktif.

Sumber: (Joshua H., 2018)

Keluaran dari sensor proximity induktif tersebut nantinya akan ada hubungannya antara pulsa yang terdeteksi dan logam yang menempel pada rotor motor induksi tiga fasa untuk mengetahui nilai RPM(*Rotation Per Minute*). Secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$RPM = pulsecount \times 60 \quad (2.6)$$

Keterangan:

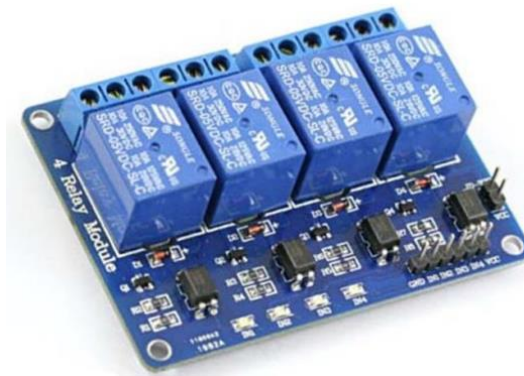
RPM = *Rotation Per Minute* yang dihasilkan

Pulsecount = Jumlah pulsa yang terdeteksi dalam interval waktu tertentu

2.7 Relay

Relay merupakan saklar (*Switch*) yang dioperasikan secara listrik dan merupakan komponen Elektromekanikal yang terdiri dari 2 bagian utama yaitu elektromagnet (*Coil*) dan mekanikal (seperangkat kontak saklar/*switch*).

Relay menggunakan prinsip eletromagnetik untuk menggerakkan kontak saklar sehingga dengan arus listrik yang kecil (*low power*) dapat menghantarkan listrik yang bertegangan lebih tinggi.[10] Sebagai contoh dengan relay yang menggunakan elektromagnet 5V dan 50mA mampu menggerakkan *Armature Relay* (yang berfungsi sebagai saklarnya) untuk menghantarkan listrik 220V 2A. Bentuk fisik dan rangkaian skematik ditunjukkan pada Gambar 2.15 dan Gambar 2.16 Selain itu pada Tabel 2.7 disajikan spesifikasi dari relay 4 *channel*.

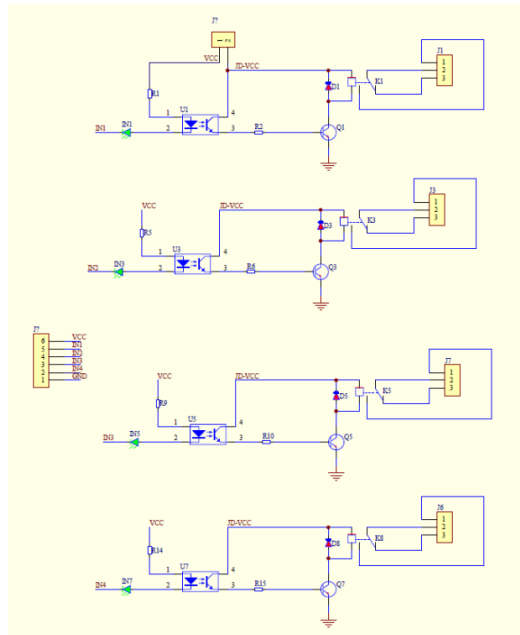


Gambar 2. 15 Relay 4 Channel

Sumber: (Datasheet Handson Technology, 2024)

Tabel 2. 7 Spesifikasi Relay 4 Channel

Keterangan	Spesifikasi
Tegangan Suplay	3.75V to 6V
Arus Pemicu	2mA
Arus Relay Aktif	~70mA
Tegangan kontak Maks Relay	250VAC, 30VDC
Arus Maksimum Relay	10A



Gambar 2. 16 Rangkaian Skematik Relay 4 *Channel*

Sumber: (Datasheet Handson Technology, 2024)

2.8 LCD (Liquid Crystal Display) I2C 16x2

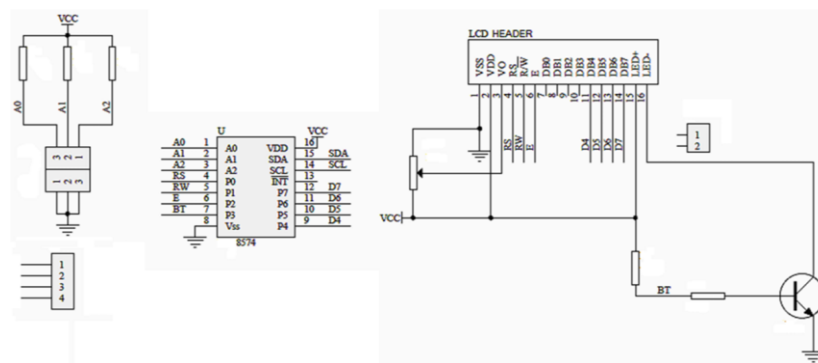
LCD (*Liquid Crystal Display*) merupakan suatu perangkat elektronika yang terkonfigurasi dengan kristal cair dalam gelas, simbol, huruf, angka maupun gambar[11]. LCD terbagi menjadi dua macam berdasarkan bentuk tampilannya, yaitu *Text*-LCD (LCD Karakter) yang menampilkan huruf atau angka dan *Graphic*-LCD yang menampilkan bentuk titik, garis, dan gambar.

Fungsi utama LCD mencakup menampilkan data seperti hasil pembacaan sensor, teks informasi, atau menu navigasi pada sistem berbasis mikrokontroler. Kemampuannya menjadikan LCD alat penting untuk memberikan umpan balik visual dalam perangkat elektronika. Bentuk fisik dan Spesifikasi ditunjukkan pada Gambar 2.17 dan Tabel 2.8.



Gambar 2. 17 LCD I2C 16x2

Sumber: (Datasheet Handsontec Technology, 2024)



Gambar 2. 18 Rangkaian Skematik LCD 16x2 to I2C

Sumber: (Datasheet Handsontec Technology, 2024)

Berikut Spesifikasi dari LCD secara umum yang dapat ditinjau pada tabel 2.8 sebagai berikut:

Tabel 2. 8 Spesifikas LCD I2C 16x2

Keterangan	Spesifikasi
<i>Blue backlight</i>	I2C
<i>Display Format</i>	16 Characters x 2 lines
<i>Supply Voltage</i>	5V
<i>PCB Size</i>	80x36mm

<i>Back lit</i>	<i>Blue with White char color</i>
<i>Contrast Adjust</i>	<i>Potentiometer</i>
<i>Backlight Adjust</i>	<i>Jumper</i>

2.9 Keypad (I2C)

Keypad merupakan komponen penting dalam perangkat elektronik yang memerlukan interaksi dengan pengguna. Fungsinya sebagai antarmuka antara manusia dan mesin (HMI – Human Machine Interface) memungkinkan pengguna berkomunikasi dengan sistem elektronik. Salah satu jenis keypad yang umum digunakan adalah matrix keypad 4×4, yang berperan sebagai media input bagi mikrokontroler[12]. Desain keypad ini sederhana dan dirancang untuk menghemat penggunaan port pada mikrokontroler. Dengan konfigurasi berbentuk matriks, jumlah tombol yang banyak dapat dihubungkan secara efisien tanpa memerlukan terlalu banyak pin mikrokontroler. Bentuk fisik keypad 4x4 ditunjukkan pada Gambar 2.19.



Gambar 2. 19 Keypad 4x4

Sumber: (Shinta A., 2019)

Berikut spesifikasi dari keypad 4x4 secara umum yang dapat ditinjau pada tabel 2.9 berikut:

Tabel 2. 9 Spesifikasi keypad 4x4

Keterangan	Spesifikasi
Konfigurasi	4 baris x 4 kolom
Jumlah	12 (biasanya 0-9, *, dan #)
Tegangan	3.3 dan 5VDC (d disesuaikan dengan
Operasional	mikrokontroler)
Dimensi	5 cm x 6 cm
Tipe Koneksi	Pin <i>header</i> untuk dihubungkan dengan kabel atau konektor pada mikrokontroler

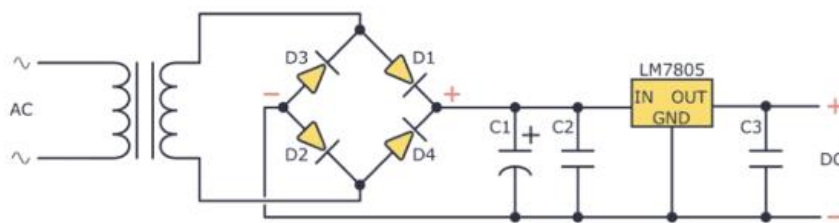
I2C (*Inter Integrated Circuit*) adalah standar komunikasi serial dua arah menggunakan dua saluran yang didesain khusus untuk mengirim maupun menerima data. Sistem I2C terdiri dari saluran SCL (*Serial Clock*) dan SDA (*Serial Data*) yang membawa informasi data antara I2C dengan pengontrolnya. Pengelamatan dalam jalur I2C bisa 7 bit atau 10 bit. Semua perangkat (uC dan modul – modul) yang terhubung ke dalam jalur I2C yang sama dapat dialamati sebanyak 7 bit[12]. Arduino sendiri sudah mendukung protocol I2C. Di papan Arduino UNO, port I2C terletak pada pin A4 untuk jalur SDA (*Serial Data*) dan pin A5 untuk jalur SCL (*Serial Clock*). Bentuk fisik I2C Keypad ditunjukkan pada Gambar 2.20.

**Gambar 2. 20** I2C Keypad

Sumber: (Shinta A., 2019)

2.10 Power Supply

Power supply atau catu daya adalah suatu alat elektronik yang dapat mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah (*AC to DC*). *Power supply* juga dapat digunakan sebagai perangkat pemasok energi listrik untuk mengalirkan arus listrik ke komponen elektronik[10]. Besar tegangan yang dialirkan oleh *power supply* mulai dari 5volt sampai 24 volt. Rangkaian skematik ditunjukkan pada Gambar 2.21



Gambar 2. 21 Rangkaian Skematik *Power Supply*

Sumber: (M. R. Alfikri, 2024)

Berdasarkan gambar 2.21 rangkaian *power supply* menggunakan trafo *step down* dengan rangkaian transformator. *Output* tegangan pada transformator ini dapat disesuaikan dengan spesifikasi perangkat elektronika, terdapat rangkaian *rectifier* dengan 4 dioda sebagai pengubah arus AC menjadi arus DC dan rangkaian filter yang menggunakan kombinasi dari kapasitor, resistor, dan induktor yang dapat menyaring arus AC sehingga output dari *power supply* menjadi arus DC. Bentuk fisik dan spesifikasi *power supply* 24V ditunjukkan pada Gambar 2.22 dan Tabel 2.10.



Gambar 2. 22 Power Supply 24V 5A

Sumber: (M. R. Alfikri, 2024)

Berikut spesifikasi dari *power supply* 24V 5A secara umum yang dapat ditinjau pada tabel 2.10 berikut:

Tabel 2. 10 Spesifikasi *Power Supply* 24V 5A

Keterangan	Spesifikasi
Tegangan <i>Output</i>	24 VDC
Arus Beban <i>Output</i>	5 A
<i>Power Output</i>	120 W
<i>AC Input</i>	110/220 VAC

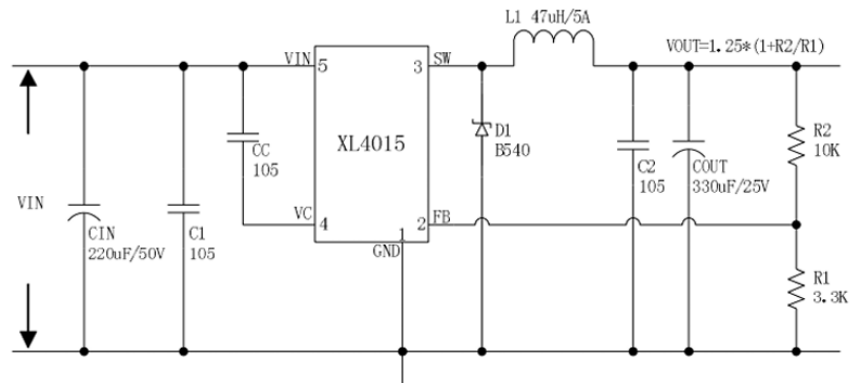
2.11 Regulator Tegangan XL4015

Step Down Voltage Regulator Module adalah sebuah modul yang berfungsi untuk mengkonversi atau menurunkan tegangan dari catudaya[13]. Dengan diturunkannya tegangan tersebut menjadi lebih rendah, maka akan dapat memberi tegangan yang sudah diperkecil ini untuk komponen yang digunakan. Bentuk fisik dan rangkaian skematik regulator tegangan XL4015 ditunjukkan pada Gambar 2.23 dan Gambar 2.24, selain itu spesifikasi regulator tegangan XL4015 pada Tabel 2.11.



Gambar 2. 23 Regulator Tegangan XL4015

Sumber: (Component101, 2015)



Gambar 2. 24 Rangkaian Skematik Regulator Tegangan XL4015

Sumber: (Component101, 2015)

Berikut spesifikasi dari regulator tegangan XL4015 secara umum yang dapat ditinjau pada tabel 2.11 berikut:

Tabel 2. 11 Spesifikasi Regulator Tegangan MP1584

Keterangan	Spesifikasi
<i>Input Voltage</i>	4V ~ 38V
<i>Output Voltage</i>	1.25V ~ 36V (<i>Adjustable</i>)
<i>Output Current</i>	0A ~ 5A
<i>Conversion Efficiency</i>	96%
Suhu Kerja	-40°C ~ +85°C
Dimensi	16mm x 39mm x 18mm

2.12 Miniature Circuit Breaker (MCB)

Alat pengaman otomatis yang dipergunakan untuk mengatur arus listrik. Alat pengaman ini bisa juga berguna sebagai saklar. Dalam pemakaiannya, pengaman ini seharusnya disesuaikan dengan besar listrik yang terpasang. Untuk MCB dengan kapasitas tertentu, semestinya mempunyai kesanggupan lepas dengan muatan optimal tertentu pula, MCB tak jarang melepas arus melebihi kapasitas yang tertera pada alat hal yang demikian. Bentuk fisik dari *Miniature Circuit Breaker* (MCB) ditunjukkan pada Gambar 2.25.



Gambar 2. 25 *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

Sumber: (Datasheet Schneider electric, 2014)

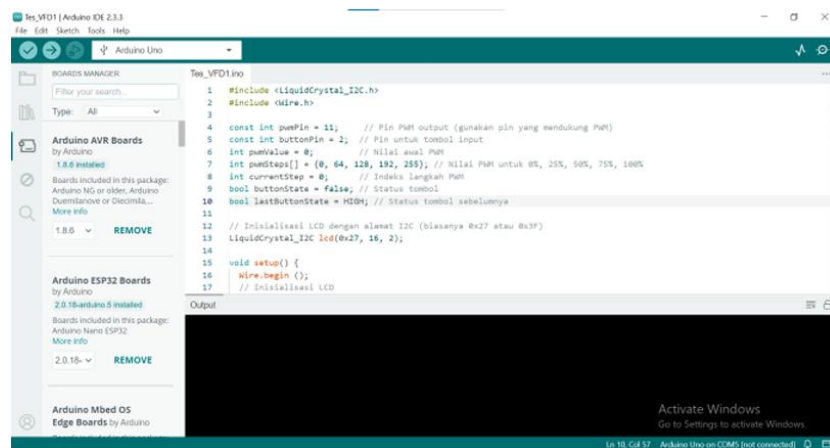
MCB bekerja dengan dua prinsip utama yaitu efek termal dan efek elektromagnetik. Efek termal melibatkan elemen bimetal yang memanaskan dan melengkung untuk memutuskan arus pada kondisi beban berlebih, sedangkan efek elektromagnetik memutuskan arus dengan cepat pada kondisi hubungan pendek[14]. Berikut spesifikasi dari MCB secara umum yang dapat ditinjau pada tabel 2.12 berikut:

Tabel 2. 12 Spesifikasi *Miniature Circuit Breaker* (MCB)

Keterangan	Spesifikasi
<i>Minature Circuit Breaker</i> (MCB)	Domae C16 2P
<i>Rated Operationel Voltage</i>	400 VAC
<i>Network Frequency</i>	50/60 Hz
<i>Rated Current</i>	16 A

2.13 Arduino IDE

Arduino menggunakan *software processing* yang digunakan untuk menulis pemrograman kedalam Arduino. Processing sendiri merupakan penggabungan antara bahasa C++ dan Java. *Integrated Development Environment* (IDE) adalah sebuah software yang sangat berperan bagi menulis program, mengcompile menjadi kode biner dan meng-optimalkan ke dalam memori mikrokontroller [7]. Tampilan dari Arduino IDE ditunjukkan pada Gambar 2.26.



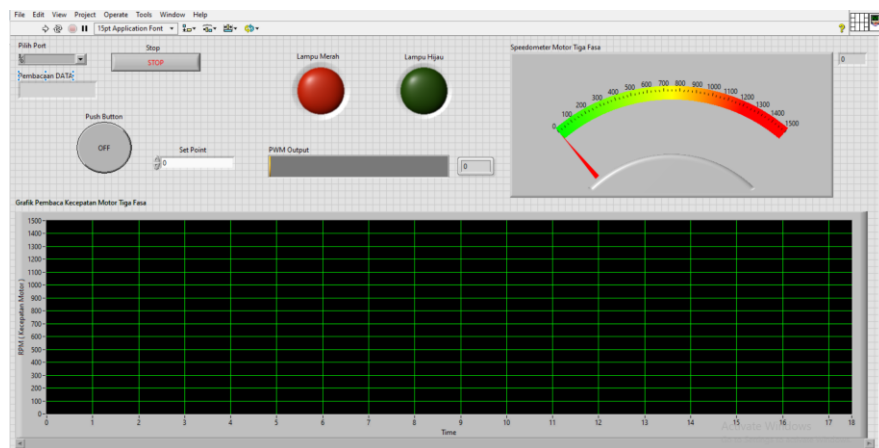
Gambar 2. 26 Tampilan Arduino IDE

2.14 LabVIEW

LabVIEW, atau Virtual Instrument (VI), merupakan perangkat lunak yang dapat mensimulasikan berbagai instrumen elektronik seperti osiloskop dan multimeter. LabVIEW menyediakan berbagai alat untuk mengakuisisi, menganalisis, menampilkan, dan menyimpan data, serta membantu dalam pemecahan masalah pemrograman[12].

Setiap VI dalam LabVIEW terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *front panel*, *blok diagram*, serta ikon dan *connector pane*. *Front panel* berfungsi sebagai antarmuka pengguna yang mencakup kontrol dan indikator. Kontrol dapat berupa *knob*, *push button*, *dial*, serta perintah *input* lainnya, sedangkan indikator mencakup grafik, LED, dan tampilan data lainnya. Setelah merancang antarmuka, pengguna

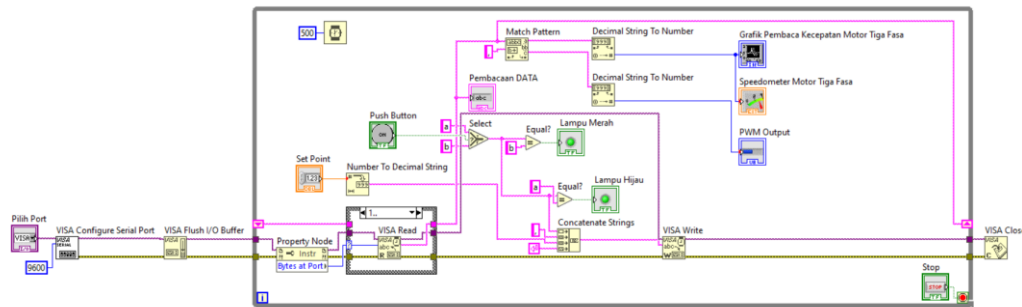
dapat menambahkan kode dengan menggunakan VI dan struktur kontrol pada objek di front panel. Semua logika pemrograman tersusun dalam blok diagram, yang sering kali menyerupai *flowchart*. Tampilan dari *front panel* ditunjukkan pada Gambar 2.27.



Gambar 2. 27 Tampilan *Front Panel* LabVIEW

LabVIEW juga memiliki kemampuan untuk berintegrasi dengan berbagai perangkat keras seperti GPIB, PXI, VXI, RS-232, dan RS-485, memungkinkan pengguna untuk mengontrol perangkat, mengumpulkan data, serta memantau sistem secara *real-time*. Selain itu, LabVIEW dapat digunakan untuk mengembangkan aplikasi berbasis web melalui LabVIEW *Web Server*, serta mendukung protokol jaringan seperti TCP/IP dan *ActiveX*.

Dengan LabVIEW, pengguna dapat melakukan berbagai eksperimen dan pengukuran, termasuk akuisisi data, pengendalian instrumen, pencatatan data (datalogging), analisis instrumen, serta pemrosesan hasil pengukuran. LabVIEW juga memungkinkan pembuatan stand-alone executable dan shared libraries seperti DLL, karena perangkat lunak ini berbasis arsitektur 32-bit.[12] Tampilan dari *blok diagram* ditunjukkan pada Gambar 2.28.



Gambar 2. 28 Tampilan Blok Diagram LabVIEW

2.15 Kontrol PID (Proportional - Integral - Derivatif)

Sistem kendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*) adalah salah satu metode kontrol yang paling umum digunakan dalam bidang rekayasa kontrol otomatis. Teknik ini diterapkan pada berbagai aplikasi, seperti pengendalian kecepatan, aliran, tekanan, suhu, dan parameter pemrosesan lainnya[15]. Dengan memanfaatkan sistem kontrol umpan balik tertutup, pengendali PID mampu menghasilkan sinyal kontrol yang membantu sistem mencapai dan mempertahankan setpoint yang diinginkan secara efisien.

Pengendali PID secara terus-menerus memantau perbedaan antara keluaran sistem (dikenal sebagai variabel proses, PV) dan *setpoint* (SP). Pengendali ini bekerja melalui mekanisme proporsional, integral, dan diferensial untuk mengurangi kesalahan ($e(t)$), sehingga variabel proses dapat mendekati setpoint yang diharapkan secara otomatis.

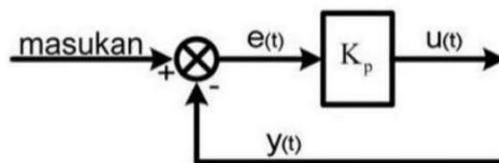
Dalam perancangan perbandingan sistem kontrol P, PI, dan PID. langkah utama adalah menentukan dan mengatur nilai parameter P, I dan D agar respons sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sesuai dengan yang diharapkan. Penentuan parameter ini dilakukan menggunakan metode Ziegler-Nichols *open loop*, yang berfungsi untuk mengidentifikasi nilai K_p , K_i dan K_d berdasarkan respons sistem. Berikut ini dijelaskan aspek-aspek penting dalam sistem kontrol PID, termasuk penerapan metode Ziegler-Nichols.

1. Kontroler P (*Proportional*)

Kontroler *proportional* adalah pengendali yang berfungsi meningkatkan kecepatan respons serta akurasi sistem kontrol. Pengendali ini berkerja dengan memperkuat sinyal *error* untuk mempercepat keluaran sistem agar mencapai titik referensi[15]. Hubungan antara keluaran kontroler $u(t)$ dan sinyal error $e(t)$ dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.7)$$

Dari persamaan tersebut, K_p adalah konstanta *proportional*. Nilai K_p yang lebih besar dapat meningkatkan respons sistem dan akurasi, tetapi jika terlalu besar, dapat menyebabkan *overshoot* yang signifikan dan membuat sistem menjadi tidak stabil. Sebaliknya, jika K_p terlalu kecil, akurasi control akan menurun, dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan menjadi lebih lama. Diagram blok pengontrol *proportional* ditunjukkan pada Gambar 2.29.



Gambar 2. 29 Blok Diagram Kontrol *Proportional*

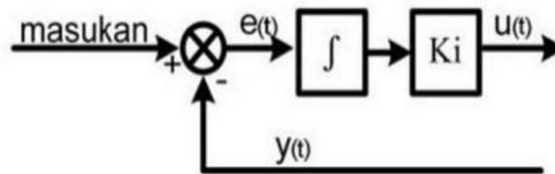
2. Kontroler I (*Integral*)

Kontroler *integral* berfungsi untuk menghilangkan kesalahan keadaan tunak (*steady-state error*) pada sistem. Secara prinsip, kontroler ini dirancang untuk mengatasi *offset* yang sering muncul ketika hanya menggunakan kontroler *proportional*. [15] Hubungan antara keluaran kontroler *integral*, $u(t)$, dnegan sinyal *error*, $e(t)$, dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.8)$$

Dimana K_i adalah konstanta *integral*. Semakin besar nilai K_i , *steady-state error* dapat dihilangkan lebih cepat. Namun, jika nilai K_i terlalu besar, akumulasi sinyal pada awal proses kendali dapat menyebabkan *overshoot* yang berlebihan.

Sebaliknya, jika nilai K_i terlalu kecil, kemampuan kontroler untuk mengeliminasi *steady state error* menjadi kurang efektif. Diagram blok pengontrol *integral* ditunjukkan pada Gambar 2.30.



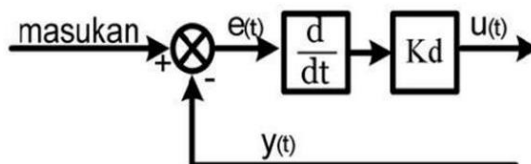
Gambar 2. 30 Blok Diagram Kontrol *Integral*

3. Kontroler D (*Dervatif*)

Keluaran dari pengontrol diferensial memiliki karakteristik yang serupa dengan operasi diferensial. Ketika terdapat perubahan mendadak pada masukan pengontrol, keluaran akan mengalami perubahan yang besar dan cepat. Pengontrol diferensial sering dikenal sebagai pengendali laju, karena keluarannya berkaitan langsung dengan laju perubahan sinyal kesalahan[15]. Hubungan antara keluaran kontroler *derivatif*, $u(t)$, dnegan sinyal *error*, $e(t)$, dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.9)$$

Komponen diferensial bekerja dengan menghitung laju perubahan kesalahan dan menghasilkan sinyal kontrol yang berlawanan arah dengan perubahan tersebut. Karakteristik utama pengontrol ini adalah kemampuannya dalam mengurangi *overshoot* serta membantu menstabilkan respons sistem[15]. Namun, jika pengaturan nilai diferensia terlalu besar, hal ini dapat menyebabkan respons sistem menjadi tidak stabil. Diagram blok pengontrol *derivatif* ditunjukkan pada Gambar 2.31.



Gambar 2. 31 Blok Diagram Kontrol *Derivatif*

4. Rise Time

Rise time adalah rentang waktu yang dibutuhkan oleh sebuah sinyal untuk berubah dari *level* rendah, biasanya sekitar 10% dari nilai *setpoint* atau posisi awal, menuju *level* tinggi sekitar 90% dari nilai *setpoint* atau posisi awal tersebut. Dalam sistem kontrol, *rise time* merupakan parameter penting yang menunjukkan kecepatan respons sistem terhadap perubahan *input* atau *setpoint*[15]. Hal ini mencerminkan seberapa responsive dan cepat sistem dapat beradaptasi terhadap perubahan yang terjadi.

5. Settling Time

Settling time adalah durasi waktu yang diperlukan oleh sebuah sinyal untuk mencapai keadaan *steady-state* setelah adanya perubahan pada *input* atau *setpoint*. *Settling time* mencerminkan seberapa cepat sistem dapat mencapai kondisi stabil di mana sinyal berhenti berfluktuasi dan berada pada nilai yang diinginkan[15]. Dalam sistem kontrol, kestabilan dievaluasi dengan membandingkan *error* antara nilai aktual dan nilai *setpoint*. Sistem dianggap stabil ketika *error* tersebut telah berada dalam batas toleransi yang dapat diterima, biasanya kurang dari persentase tertentu dari nilai *setpoint*.

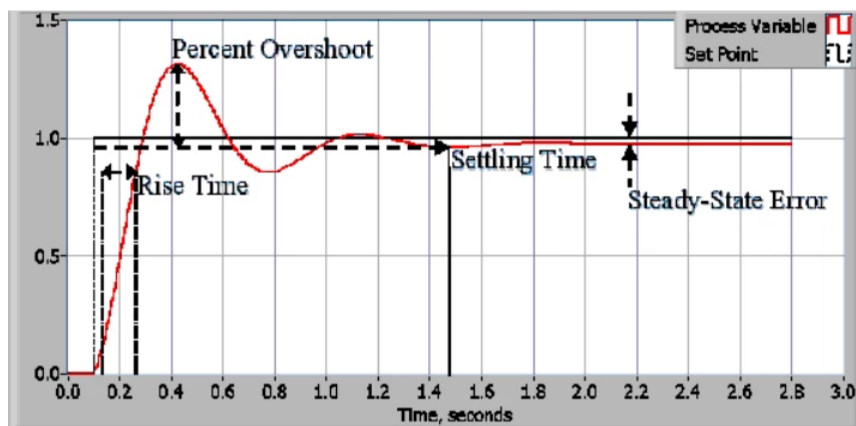
Oleh karena itu, *settling time* menjadi parameter penting karena menggambarkan tingkat responsivitas dan kinerja sistem kontrol. Semakin kecil nilai *settling time*, semakin cepat sistem mencapai *steady-state* dan semakin responsif terhadap perubahan *input* atau *setpoint*.

6. Maximum Overshoot

Maximum overshoot adalah nilai maksimum yang melampaui *setpoint* yang telah ditentukan. Besarnya *maximum overshoot* dihitung sebagai selisih antara puncak *output* sistem dan nilai *setpoint*, yang dinyatakan dalam persentase terhadap nilai *setpoint*[15]. *Maximum overshoot* biasanya terjadi akibat berbagai faktor, seperti *overshoot* sementara pada awal respons sistem atau efek dinamis yang menyebabkan sinyal berfluktuasi sebelum mencapai kondisi stabil.

7. Steady-State Error

Steady-state error adalah kesalahan yang tetap ada dalam sistem kontrol meskipun sistem sudah mencapai kondisi stabil. *Error* ini umumnya disebabkan oleh ketidaksempurnaan dalam model matematika yang digunakan dalam perancangan sistem kontrol, gangguan eksternal yang tidak terprediksi, atau faktor lain seperti gesekan dan hambatan[15]. Dalam desain dan penyesuaian sistem kontrol, penting untuk memahami dan mengevaluasi *steady-state error* guna memastikan bahwa kinerja sistem memenuhi kebutuhan dan spesifikasi yang ditentukan.



Gambar 2. 32 Grafik yang menunjukkan *rise time*, *settling time*, dan *overshoot*

Sumber: (Ni LabVIEW, 2025)

8. Metode Ziegler-Nichols

Metode Ziegler-Nichols merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk menentukan nilai parameter *proportional* (K_p), integral (K_i) dan derivatif (K_d). Metode ini dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu *open-loop* dan *closed-loop*. Dalam penelitian tugas akhir ini, penulis menggunakan metode Ziegler-Nichols dengan pendekatan *open-loop*.

Pada metode Ziegler-Nichols *open-loop*, prosesnya melibatkan pengujian respons sistem dan identifikasi parameter berdasarkan kurva yang dihasilkan. Dari kurva tersebut, dapat diperoleh nilai L (waktu tunda) dan T (waktu konstanta)[2]. Dari kedua nilai tersebut nantinya akan digunakan untuk mencari parameter kontrol *proportional* dan juga integral dengan rumus sebagai berikut:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} \quad (2.10)$$

$$T = (63\% \times \Delta PV) \quad (2.11)$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} \quad (2.12)$$

$$Kd = Kp.Td \quad (2.13)$$

Keterangan:

K = gain

ΔPV = Selisih nilai *output* terbesar dan terkecil

ΔMV = Selisih nilai *input* terbesar dan terkecil

L = Waktu delay

T = Waktu integral

Kp = Konstanta *Proportional*

Ki = Kontanta Integral

Tabel 2. 13 Penentuan Parameter PID

Tipe Pengontrol	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{KL}$	∞	0
PI	$\frac{0.9}{K} \times \frac{T}{L}$	$3.33L$	0
PID	$\frac{1.2}{K} \times \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

2.16 Rumus Perhitungan Diskrit

1) Rumus perhitungan *error* untuk pengukuran RPM (*Rotation Per Minute*)

Perhitungan *error* ini bertujuan mengetahui nilai *error* dari sebuah sensor *hall effect* yang dibandingkan dengan tachometer. Rumus perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$\%error = \frac{\text{selisih pengukuran}}{\text{Setpoint RPM}} \times 100\% \quad (2.14)$$

Selisih pengukuran adalah selisih pengukuran antara sensor proximity dengan tachometer. Hasil selisih pengukuran tersebut akan dibagi dengan nilai pengukuran dari tachometer lalu dikali 100% supaya didapatkan nilai %*error*.

2) Rumus perhitungan *error* saat mengalami *overshoot*

Untuk mengetahui presentasi *error* yang terjadi ketika motor induksi tiga fasa mengalami *overshoot* digunakan rumus perhitungannya sebagai berikut:

$$\%error = \frac{\text{selisih nilai RPM dari setpoint}}{\text{nilai setpoint}} \times 100\% \quad (2.15)$$

Selisih nilai RPM dari *setpoint* adalah selisih antara RPM yang terbaca oleh sensor proximity dengan nilai *setpoint*. Hasil selisih pengukuran tersebut dibagi dengan nilai *setpoint* lalu dikali 100% supaya menghasilkan nilai %*error*.