

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam proses penyusunan tugas akhir, kajian terhadap berbagai sumber literatur dan penelitian terdahulu memegang peranan penting sebagai dasar pijakan ilmiah. Melalui tinjauan pustaka, penulis dapat memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai teori-teori yang berkaitan serta pendekatan teknis yang telah diterapkan dalam penelitian sebelumnya. Selain memberikan landasan teoritis yang kuat, tinjauan pustaka juga berfungsi untuk melihat perkembangan teknologi terkini dan inovasi yang telah dilakukan oleh peneliti lain pada bidang yang sejenis. Dengan begitu, penulis dapat mengidentifikasi ruang pengembangan, perbedaan pendekatan, serta keunikan dari sistem yang dirancang dalam tugas akhir ini.

Oleh karena itu, dalam bab ini akan disajikan berbagai referensi literatur yang relevan, baik berupa buku, artikel ilmiah, maupun laporan penelitian terdahulu, sebagai bahan acuan dan perbandingan dalam merancang sistem kendali prime mover berbasis ESP32 dan motor induksi tiga fasa

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka

No	Judul Jurnal	Pembahasan	Persamaan Dan Perbedaan
1	Sistem kontrol motor induksi 3 fasa berbasis PLC dan SCADA	Membahas tentang rancang bangun sistem kontrol motor induksi 3 fasa berbasis PLC dan SCADA. Tujuannya adalah untuk mengembangkan sistem kendali kecepatan motor induksi yang lebih efisien, presisi, dan dapat dipantau serta dikendalikan secara <i>real-time</i> maupun jarak jauh.	Mempunyai kesamaan dalam mengontrol motor induksi 3 fasa akan tetapi berbeda dalam kontrol nya,pada jurnal tersebut menggunakan PLC yang terintegrasi SCADA, sementara pada penelitian penulis menggunakan mikrokontroler ESP32 yang lebih sederhana dan ekonomis.
2	Speed Control of Induction Motor Using Variable Frequency Driver Method Based On Arduino Nano	penelitian ini membahas tentang mengatur kecepatan motor induksi dengan cara memanipulasi frekuensi fundamental sinyal output inverter (VFD). Mekanisme kontrol frekuensi dihasilkan oleh Arduino Nano yang menghasilkan sinyal SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation).	mempunyai kesamaan yaitu mengatur inverter untuk menggerakkan motor induksi 3 fasa tetapi berbeda dengan mikrokontroller yang digunakan, dan pada penelitian ini penulis menggunakan pwm to voltage untuk merubah sinyal pwm menjadi tegangan

Tabel 2. 2 Tinjauan Pustaka

No	Judul Jurnal	Pembahasan	Persamaan Dan Perbedaan
3	Variable Frequency Drives: Topology and it's Testing Procedure	membahas penggunaan, struktur topologi, dan prosedur pengujian <i>Variable Frequency Drive</i> (VFD)— komponen penting dalam sistem kontrol motor listrik industri modern. Penelitian ini menyajikan pemahaman menyeluruh tentang cara kerja VFD, komponen internalnya, serta pentingnya pengujian menyeluruh untuk menjamin keandalan operasi.	Jurnal tersebut berfokuskan teori, topologi, dan prosedur pengujian VFD secara umum, sedangkan penelitian penulis fokus kepada implementasi praktis dengan mengintegrasikan inverter schneider ATV312, mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali, modul PWM to voltage, serta HMI untuk memonitoring sistem

2.2 Catu daya

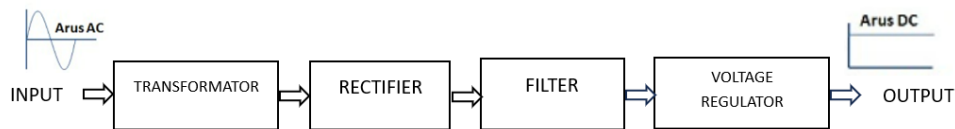
Catu daya, atau biasa disebut power supply, merupakan perangkat atau sistem yang berfungsi sebagai penyuplai energi Listrik untuk mengoperasikan berbagai peralatan elektronik. Catu daya berfungsi sebagai penyearah dan filter yang mengubah arus bolak balik (AC) menjadi arus searah (DC), catu daya dapat melindungi perangkat dari kerusakan, seperti mencegah lonjakan tegangan (*overvoltage*), arus berlebihan (*overcurrent*), dan panas berlebihan (*overheating*)

yang dapat merusak komponen. Catu daya dibagi menjadi dua macam utama berdasarkan cara kerjanya. Yaitu Catu daya linier (linier power supply) dan catu daya switching (SMPS-*Switching Mode Power Supply*)[8]

1. Catu daya linier adalah jenis catu daya yang merubah tegangan AC menjadi DC dengan cara yang linier, yaitu dengan transformator, penyearah filter, dan regulator, catu daya linier memiliki stabilitas yang tinggi, yang menjadikan alasan sangat cocok untuk perangkat analog dan aplikasi yang memerlukan tegangan yang bersih dan stabil, cara kerja dari catu daya linier yaitu menggunakan transformator untuk menurunkan tegangan AC, seperti contoh jaringan Listrik 220V diturunkan ke tegangan yang dibutuhkan oleh rangkaian, tahap selanjutnya yaitu terdapat penyearah gelombang (rectifier) yang merubah tegangan AC ke DC yang masih berfluktuasi pada tahap selanjutnya yaitu penyaringan (*filtering-capacitor*), lalu regulasi tegangan yaitu menstabilkan tegangan output agar tetap konstan meskipun beban atau output berubah, regulator liner biasa memakai LM7805,LM7812 lalu keluaran tegangan DC murni dengan ripple sangat rendah[9]
2. catu daya switching merupakan jenis power supply yang menggunakan Teknik switching frekuensi untuk mengubah dan menstabilkan tegangan Listrik secara efisien. Pada jenis ini, tegangan AC langsung disearahkan oleh rangkaian penyearah tanpa terlebih dahulu diturunkan oleh transformator frekuensi yang dilakukan untuk menyearah sangat tinggi, berkisar antara 10kHz hingga 1MHz, catu daya switching umumnya dilengkapi dengan rangkaian umpan balik untuk memastikan tegangan dan arus keluaran tetap terkontrol dengan akurat[10]

2.2.2 Prinsip Kerja DC Power Supply

DC power supply bekerja dengan mengubah tegangan Listrik bolak balik (AC), dari sumber PLN menjadi tegangan searah (DC) yang stabil dan siap digunakan oleh perangkat elektronik, proses untuk menstabilkan melibatkan beberapa tahapan utama seperti pada gambar 2. 1 [11]



Gambar 2. 1 Diagram Blok Sistem Kerja Catu Daya

Sebelum membahas lebih dalam mengenai cara kerja DC power supply, penting untuk terlebih dahulu mengetahui komponen-komponen utama yang Menyusun, yang terdapat pada diagram blok yang terdapat pada gambar 2.

1. Input arus AC sumber Listrik eksternal
2. Transformator bertugas menurunkan tegangan AC input dari sumber Listrik ke tegangan yang lebih rendah yang sesuai dengan kebutuhan rangkaian elektronika
3. Rectifier bertugas menyerap atau menyaring arus AC yang telah diturunkan oleh transformator menjadi arus DC rectifier dapat berupa half- wave rectifier yang menggunakan satu diode atau *full-wave rectifier* yang menggunakan dua dioda
4. Filter bertugas meratakan gelombang ripple atau fluktuasi yang masih ada setelah penyearah rectifier, agar menghasilkan arus DC yang lebih stabil, untuk menyimpan dan merilis energi dengan cepat, filter biasanya menggunakan kapasitor (kondensator)
5. Voltage regulator bertugas mengatur dan menjaga tegangan DC output agar tetap stabil, atau tidak terpengaruh oleh perubahan arus beban, suhu, dan tegangan input. Diode Zener atau IC biasanya digunakan oleh voltage regulator
6. Output berfungsi untuk menghasilkan tegangan DC yang stabil dan siap digunakan untuk memberi daya ke perangkat elektronik

2.3 ESP32 DevKit C V4

ESP32 DevKit C V4 merupakan versi terbaru dari development board ESP32 yang populer untuk proyek IoT, robotika, dan embedded systems, board ini

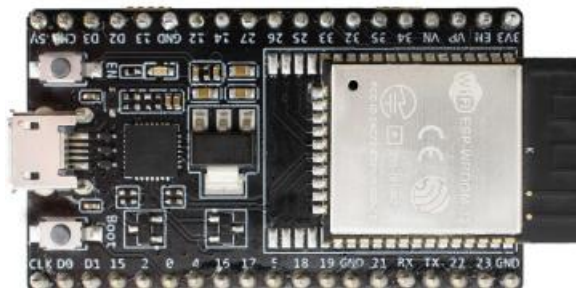
menggunakan modul ESP-WROOM-32 sebagai intinya dan memiliki beberapa peningkatan dibanding versi lamanya (V1), spesifikasi atau fitur ESP32 DevKit C V4 terdapat pada tabel 2. 1[12]

Tabel 2. 3 Spesifikasi ESP32 Devkit C V4

Kategori	Fitur
Prosesor	Dual-Core Xtensa LX6
Wireless	Wi-Fi 802.11 b/g/n Bluetooth 4.2
Memori	Flash 4MB RAM 520KB
GPIO	38 pin GPIO
Analog I/O	ADC 12-bit (18 channel) DAC 8-bit (2 channel)
Komunikasi	UART (2port) I2C I2S
USB & Power	USB-to-UART (CH340/CP2102) Input power: Micro-USB/Vin (5-12V)
Tombol & LED	Tombol BOOT + EN LED Indikator (2buah)

Seperti yang dijelaskan pada **Tabel 2.3** ESP32 DevKit C V4 menggunakan prosesor Dual_Core Xtensa LX6 dengan kecepatan 240MHz yang memungkinkan eksekusi multitasking yang efisien dan didukung sistem operasi *real-time* freeRTOS, board ini dilengkapi dengan Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4GHz) untuk koneksi internet dan Bluetooth 4.2 (BLE+ BR/EDR) untuk komunikasi jarak dekat dengan perangkat lainnya, ESP32 DevKit C V4 memiliki penyimpanan firmware 4MB dan RAM 520KB untuk operasi runtime, sangat cukup untuk proyek IoT menengah. ESP32 DevKit C V4 memiliki 38 pin GPIO multifungsi yang dapat digunakan

untuk PWM,I2C,SPI, atau UART, meskipun beberapa pin seperti GPIO 6-11 dan 34-39 memiliki Batasan penggunaannya. ESP32 DevKit C V4 menyediakan ADC 12-bit (18 channel) untuk membaca sensor analog dan DAC 8-bit (2 channel) untuk output sinyal analog, seperti audio sederhana, ESP32 DevKit C V4 mendukung 2 port UART,I2C, dan I2S, untuk memudahkan integrasi dengan sensor,display, atau modul komunikasi eksternal, ESP32 DevKit C V4 menggunakan USB-to-UART CH340/CP2102 untuk koneksi kekomputer dan dapat diberi daya dari Micro-USB atau pin vin (5-12V) dengan output stabil 3.3V. ESP32 DevKit C V4 dilengkapi dengan tombol BOOT untuk masuk mode flashing, tombol EN digunakan untuk reset, serta 2 LED indicator merupakan LED power dan LED GPIO 2 yang dapat deprogram.



Gambar 2. 2 ESP32 Devkit C V4[12]

kekurangan dari ESP32 DevKit C V4 memiliki GPIO terbatas, karena beberapa pin tidak bisa dipakai, dan membutuhkan driver CH340 di windows (tidak *plug and play*) dan sangat memakan konsumsi daya yang tinggi daripada ESP8266 [13]

2.4 Arduino IDE

Arduino IDE merupakan software yang digunakan untuk membuat sketch pemrograman atau dengan kata lain Arduino IDE Adalah media untuk melakukan pemrograman pada bord yang ingin deprogram. IDE ini bersifat open-source, yang berarti siapa saja dapat menggunakannya secara gratis. Fitur utamanya Adalah kesederhanaan, menjadikannya pilihan ideal bagi pemula yang baru belajar pemrograman dan elektronika.[14]



Gambar 2. 3 Software Arduino IDE[14]

Struktur program di Arduino IDE memiliki struktur dasar yang terdiri dari dua fungsi utama: `setup()` dan `loop ()`

1. Fungsi `setup()` yaitu hanya dieksekusi satu kali saat papan Arduino pertama kali dinyalakan atau di reset bagian ini digunakan untuk inisialisasi seperti menetapkan mode pin, memulai komunikasi serial, dan inisialisasi variabel
2. Fungsi `loop ()` yaitu yang akan mengeksekusi secara berulang-ulang tanpa henti selama papan Arduino menyala, bagian ini berisi kode utama yang menjalankan tugas berulang. Seperti membaca sensor, mengendalikan aktuator dan melakukan kalkulasi atau, logika program

Arduino IDE menggunakan Bahasa pemrograman berbasis pada C++, tetapi disederhanakan dengan penambahan Pustaka library khusus Arduino. Dengan adanya Bahasa ini dapat mempermudah interaksi dengan perangkat keras tanpa perlu memahami detail teknis mikrokontroler yang rumit, beberapa elemen pentingnya meliputi: fungsi, variabel, konstanta, dan struktur kontrol[14]

Proses kerja Arduino IDE yang pertama yaitu :

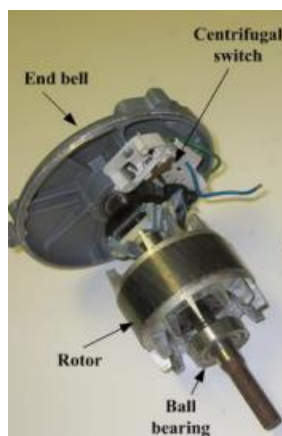
1. Menulis kode : dapat menulis program pada editor teks
2. Kompilasi : setelah selesai, dapat mengklik tombol “verify” atau “upload” proses ini mengubah Bahasa manusia menjadi Bahasa mesin yang dapat dimengerti oleh mikrokontroler

3. Mengunggah kode : setelah kode berhasil dikompilasi, proses *upload* mengirimkan file biner yang telah dikompilasi ke papan Arduino melalui koneksi USB
4. Eksekusi : setelah kode berhasil diunggah, mikrokontroler akan mulai mengeksekusi program tersebut

2.5 Motor Induksi 3 Fasa

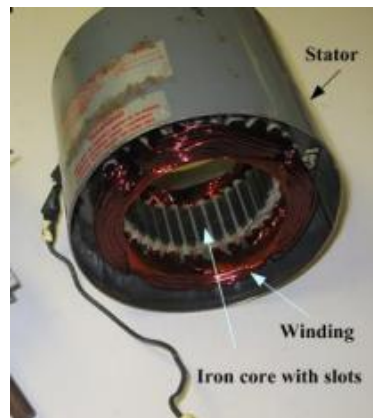
Motor Induksi 3 fasa adalah jenis motor Listrik yang menggunakan sumber daya arus bolak balik 3 fasa untuk menghasilkan medan magnet berputar, yang menggerakkan rotor. Motor induksi 3 fasa sangat efisiensi dalam penggunaannya, hall tersebut yang membuat motor 3 fasa ini sangat banyak digunakan, dan motor 3 fasa ini sering digunakan untuk menggerakkan peralatan industry. Motor 3 fasa memiliki struktur yang sederhana, murah, dan mudah perawatannya. Motor 3 fasa terdiri dari dua bagian utama, diantaranya yaitu stator dan rotor[15]

- a. Stator merupakan kumparan kawat yang dialiri arus Listrik, menciptakan medan magnet yang berinteraksi dengan rotor, medan magnet yang dihasilkan oleh stator akan mendorong dan menarik rotor, sehingga menghasilkan Gerakan mekanis, stator umumnya terbuat dari lapisan besi yang dilaminasi untuk meminimalkan kerugian akibat arus *eddy*, struktur stator terdiri dari rangka (frame), inti (core) dan lilitan kumparan (winding).[15]



Gambar 2. 4 Bagian Stator Pada Motor Induksi 3 Fasa[15]

- b. Rotor adalah bagian yang berputar seperti motor Listrik, fungsi dari rotor sendiri yaitu mengubah energi Listrik menjadi energi mekanik, jadi rotor memiliki peran yang penting dalam proses konversi energi atau menghasilkan Gerakan dalam perangkat[15]



Gambar 2. 5 Bagian Rotor Pada Motor Induksi 3 Fasa[15]

Motor 3 fasa dibagi menjadi 2 jenis yaitu motor induksi (*asynchronous motor*) dan motor sinkron (*synchronous motor*), dalam penelitian ini penulis menggunakan motor induksi, motor induksi memiliki prinsip kerja tidak berputar sinkron dengan medan magnet stator dan rotor digerakkan oleh induksi elektromagnetik tanpa sikat atau brushless, pada motor induksi tidak membutuhkan arus DC untuk eksitasi rotor. Kelebihan dari motor induksi 3 fasa sendiri yaitu lebih mudah dan murah dalam perawatannya dan tahan terhadap beban yang berubah-ubah [15]



Gambar 2. 6 Motor Induksi 3 Fasa [15]

2.5.1 Prinsip Kerja Motor Induksi 3 fasa

Motor 3 fasa memiliki prinsip kerja berdasarkan hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik dan hukum Lorentz tentang gaya elektromagnetik. Yaitu Ketika konduktor memiliki arus Listrik pada medan magnet, maka akan timbul gaya yang menggerakkan konduktor tersebut. Motor induksi 3 fasa bekerja dengan memanfaatkan medan magnet putar yang dihasilkan oleh arus listrik 3 fasa pada stator. Ketika stator dialiri arus 3 fasa (dengan fase R, S, dan T yang berselisih 120°), arus ini menciptakan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron. [16]

Medan magnet putar ini kemudian memotong konduktor rotor yang awalnya diam, sehingga berdasarkan Hukum Faraday, timbul GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi pada rotor. GGL ini menghasilkan arus rotor karena konduktor rotor terhubung singkat (pada rotor sangkar tupai) atau melalui resistor (pada rotor lilit). Arus rotor yang mengalir berinteraksi dengan medan magnet putar stator, menciptakan gaya Lorentz yang menghasilkan torsi sehingga rotor mulai berputar. Namun, rotor tidak pernah mencapai kecepatan sinkron medan stator karena jika kecepatannya sama, tidak akan ada lagi pemotongan fluks magnetik dan GGL induksi akan hilang. Perbedaan antara kecepatan rotor, yang biasanya berkisar 2-5% saat motor beroperasi normal. Semakin besar beban mekanik, semakin besar slip yang terjadi untuk mempertahankan torsi. [16]

Dengan demikian, prinsip kerja motor induksi 3 fasa dimulai dari pembangkitan medan magnet putar stator, induksi GGL dan arus pada rotor, interaksi magnetik yang menghasilkan torsi, hingga akhirnya rotor berputar dengan kecepatan sedikit di bawah kecepatan sinkron karena slip. [16]

Yang menjadi landasan prinsip kerja motor induksi 3 fasa adalah hukum Faraday, Di mana tegangan induksi dihasilkan akibat perubahan fluks magnetik pada belitan. Hukum ini dapat dinyatakan dengan rumus berikut:

$$\varepsilon = B \times l \times v \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

ε = Tegangan induksi (V)

B = Medan magnet (T)

l = Panjang konduktor (m)

v = Kecepatan medan magnet induksi konduktor (m/s)

Terdapat hukum Lorentz yang menjadi dasar prinsip kerja motor induksi, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$F = B \times i \times l \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

F = Gaya Lorentz (N)

B = Medan magnet (T)

I = Arus yang mengalir pada konduktor (A)

l = Panjang konduktor (m)

2.5.2 RPM (Revolutions Per Minute)

RPM pada motor induksi 3 fasa mengacu pada kecepatan rotasi rotor dalam motor, kecepatan ini dipengaruhi oleh frekuensi suplai Listrik, jumlah kutub motor, dan slip (selisih antara kecepatan medan putar stator dan kecepatan rotor). Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan bahwa motor induksi 3 fasa beroperasi sesuai dengan kecepatan yang ditargetkan pada masing-masing mode frekuensi yang diatur. Dalam pengukuran ini menggunakan HMI (*Human Machine Interface*) untuk memantau data yang dikirim oleh ESP. berikut rumus RPM : [17]

$$RPM = \frac{120 \times f}{p} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan :

RPM = Kecepatan putaran motor

f = Frekuensi input (HZ)

p = Jumlah kutub motor

2.5.3 Slip Motor

slip adalah perbedaan antara kecepatan rotor dan medan putar stator, semakin besar beban motor maka semakin besar nilai slip motor [18]

$$\text{Slip} = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

N_s = Kecepatan sinkron motor (RPM) yang dihitung berdasarkan frekuensi input

N_r = Kecepatan actual rotor

2.5.4 Penggerak utama (*Prime mover*)

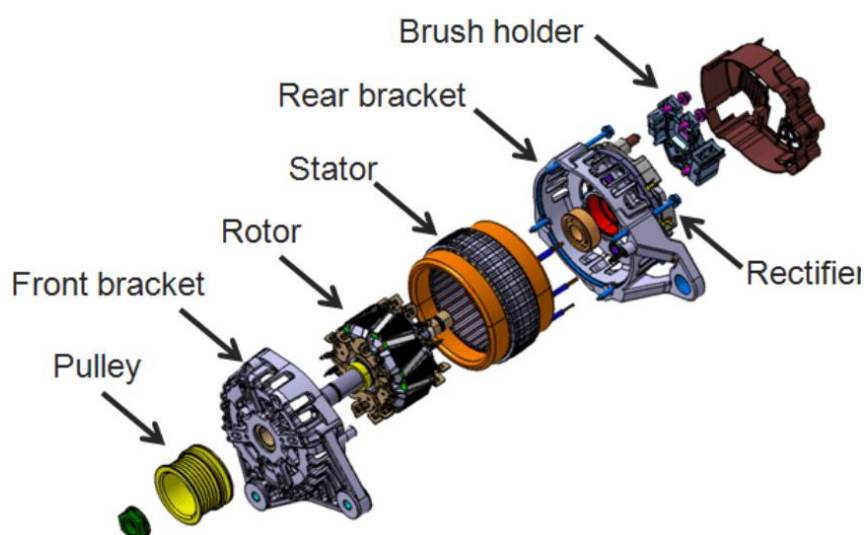
Prime mover atau biasa disebut penggerak utama, medan magnet yang berputar yang dihasilkan oleh stator adalah sumber energi mekanik awal yang menggerakkan rotor sebelum beroperasi penuh. Hasil dari putaran motor kemudian ditransmisikan ke alternator, sehingga rotor alternator berputar dan menghasilkan induksi elektromagnetik, pada proses ini mengubah energi mekanik menjadi energi Listrik pada *output* alternator [19]

Motor induksi 3 fasa adalah perangkat utama yang dikendalikan dalam sistem. ESP32 sebagai pusat kendali untuk mengatur frekuensi inverter, yang kemudian menentukan kecepatan putaran motor. Artinya, motor inilah yang secara langsung merespons perintah sistem berupa variasi frekuensi kerja.[20]

2.6 Alternator

Alternator merupakan suatu mesin Listrik yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi Listrik arus bolak balik (AC) melalui prinsip induksi elektromagnetik Energi mekanik yang diberikan kepada rotor menyebabkan terjadinya perubahan fluks magnet pada kumparan stator, sehingga menghasilkan tegangan induksi sesuai hukum Faraday. Rotor yang terdapat pada alternator biasanya berupa magnet permanen atau elektromagnet yang diberi arus eksitasi, sedangkan pada bagian stator terdiri dari kumparan-kumparan tiga fasa yang digunakan sebagai tempat penghasil tegangan AC. Keluaran output alternator

sangat dipengaruhi oleh stabilitas putaran rotor , semakin stabil stabil kecepatan putaran maka tegangan dan frekuensi yang dihasilkan semakin stabil juga. Hal ini yang merupakan peran utama alternator, Ketika digunakan sebagai sistem pembangkit yang digerakkan oleh sistem prime mover. Alternator memiliki cara kerja yang sedikit berbeda dengan generator yang memiliki output berbeda dengan cara kerja yang sama, berikut komponen pada alternator dan untuk bentuk komponen dapat dilihat pada **Gambar 2.7.** [21]



Gambar 2. 7 bagian pada alternator

Alternator memiliki beberapa komponen utama yang bekerja Bersama untuk menghasilkan Listrik, bagian pertama yaitu rotor, yaitu kumparan yang berputar dan berfungsi sebagai pembangkit medan magnet. Rotor ini mendapat arus eksitasi dari aki melalui dua buah brush yang menempel pada slip ring. Brush dan slip ring bekerja sebagai penghubung listrik antara bagian yang diam dan bagian yang berputar, sehingga arus bisa mengalir ke kumparan rotor tanpa terputus meskipun rotor terus berputar.[21]

Saat rotor berputar maka medan magnet yang dihasilkannya memotong kumparan pada stator, sehingga timbul arus Listrik AC. Karena kendaraan membutuhkan arus DC, maka arus D tersebut disearahkan oleh rectifier sebelum digunakan atau dialirkan ke aki. Tegangan yang dihasilkan kemudian akan diatur

oleh voltage regulator agar tetap pada kondisi aman, sehingga proses pengisian aki berlangsung stabil tanpa kelebihan atau kekurangan tegangan. Seluruh komponen alternator terpasang pada housing, housing sendiri berbahan aluminium yang juga membantu membuang panas pada saat alternator bekerja. Pada kedua ujung rotor terdapat bearing yang membuat rotor berputar dengan halus, untuk menggerakkan rotor.[21]



Gambar 2. 8 Alternator 12V

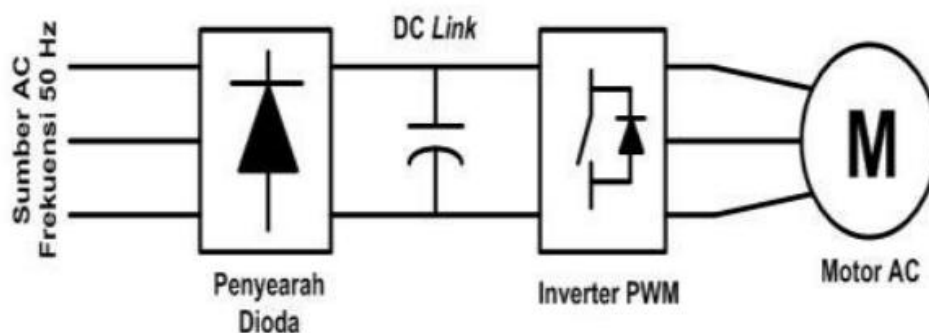
alternator dilengkapi dengan pulley yang terhubung ke mesin melalui belt, Ketika prime mover dihidupkan maka belt akan menggerakkan pulley lalu pulley akan memutar rotor, penempatan belt sendiri bisa dilihat pada **gambar 2.8**, posisi belt terhubung dengan motor induksi 3 fasa dan alternator

2.7 *Variable Frequency Driver* (VFD)

Variable frequency driver (VFD) adalah perangkat yang menghubungkan rectifier dan inverter. Rectifier berperan sebagai pengkonversi tegangan AC dengan frekuensi tetap menjadi tegangan DC, sedangkan inverter merubah tegangan DC Kembali menjadi AC dengan frekuensi yang ingin ditentukan. Fungsi dari *Variable frequency driver* (VFD dapat mengatur kecepatan motor yaitu menyesuaikan frekuensi input atau mengubah RPM motor, *Variable frequency driver* (VFD dapat menghemat energi dikarenakan mengurangi konsumsi daya saat

motor tidak perlu beroperasi saat kecepatan penuh, *Variable frequency driver* (VFD dapat mencegah lonjakan arus saat start atau stop, untuk memperpanjang umur motor, *Variable frequency driver* (VFD memiliki control yang presisi yang berguna dalam aplikasi seperti conveyor, pompa, dan kompresor. [22]

Struktur rangkaian VFD terdiri dari rectifier (penyearah), DC bus, dan inverter seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.9**



Gambar 2. 9 Prinsip Kerja Inverter VFD[20]

2.7.1 Prinsip Kerja VFD

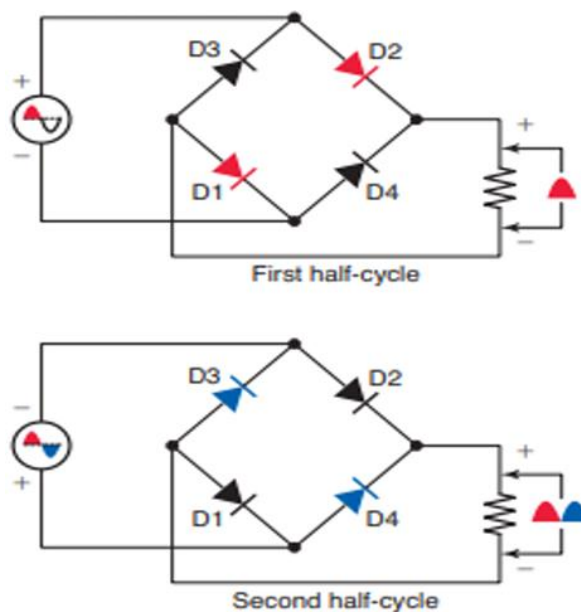
Prinsip kerja awal dari VFD adalah menerima sumber Listrik AC (contoh 380V 50Hz) sebagai input awal, kemudian rangkaian penyearah berbasis dioda menyearahkan daya AC menjadi DC, tegangan DC yang dihasilkan selanjutnya diratakan dan disaring oleh kapasitor pada bagian DC link untuk menghilangkan riak dan menyimpan energi sementara. Selanjutnya inverter yang menggunakan teknologi IGBT dengan modulasi PWM (Pulse Width Modulation) mengkonversikan kembali tegangan DC ini menjadi AC dengan frekuensi yang dapat diatur sesuai kegunaan, output AC variabel ini yang akan menggerakkan motor AC [23]

- a. Rectifier atau penyearah

Rectifier adalah rangkaian elektronika daya yang mengubah arus AC menjadi arus DC, komponen ini menjadi bagian kritis dalam sistem seperti power supply, VFD, charger baterai dan sistem tenaga berbasis DC lainnya.

Tegangan yang dihasilkan memiliki bentuk yang mirip dengan tegangan masukan, tetapi bagian negatif diubah menjadi positif. yang dihasilkan rectifier harusnya DC murni tetapi dalam kenyataannya masih terdapat riak pada tegangan keluarannya. [24]

Peran rectifier dalam *variabel frequency driver* (VFD) umumnya sebagai penyearah jembatan gelombang penuh, baik untuk sistem satu fasa maupun tiga fasa, untuk menghasilkan gelombang DC penuh, rectifier satu fasa menggunakan empat diode, selama siklus positif diode D1 dan D2 dalam kondisi bias maju, begitupun sebaliknya pada Dioda D3 dan D4. Sedangkan pada sistem tiga fasa, rectifier menerima tegangan AC tiga fasa dari suplai 380V sampai tegangan yang lebih tinggi, lalu mengkonversikan menjadi tegangan DC tetap atau dapat diatur. Tegangan DC dapat stabil dikarenakan kerja dari rectifier solid state, yang menjadikan perangkat ini komponen yang penting dalam sistem VFD[24]

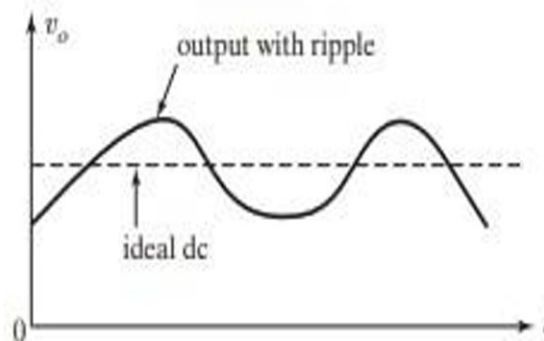


Gambar 2. 10 Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh Dengan Jembatan Dioda[20]

Penyearah 3 fasa umumnya diterapkan pada sistem daya tinggi, seperti yang ditampilkan pada **Gambar 2.10** Dalam sistem ini, sepasang diode akan menghubungkan arus saat memiliki tegangan line to line tertinggi pada suatu waktu. Keuntungan memakai VFD adalah kemampuannya mengoperasikan motor AC tiga fasa meskipun hanya menerima suplai AC 1 fasa, walaupun menerima tegangan suplai 1 atau 3 fasa, VFD tetap akan mengeluarkan output yang sama yaitu 3 fasa

b. DC Link

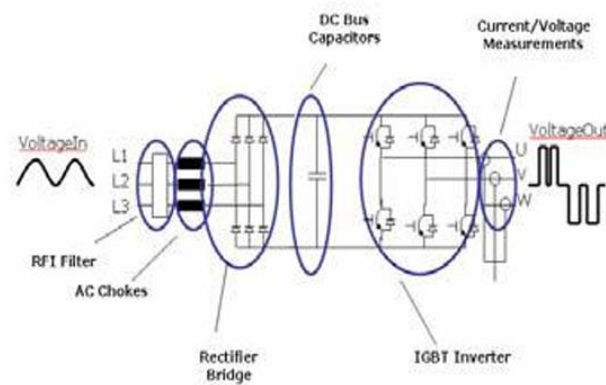
Gelombang yang dihasilkan oleh rectifier (penyearah) mengandung riak, fungsi dari DC link yaitu mengurangi riak (ripple) dan memastikan inverter atau beban DC mendapatkan tegangan yang stabil atau halus seperti pada gambar 2.11 [25]



Gambar 2. 11 Gelombang Yang Dihasilkan Oleh Rectifier[20]

c. inverter

inverter merupakan sebuah alat yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan motor dengan mengubah nilai frekuensi dan tegangan yang akan masuk ke motor, yang dimaksudkan mengatur frekuensi dan tegangan yaitu untuk mendapatkan kecepatan putaran dan torsi motor yang diinginkan atau sesuai dengan kebutuhan. Secara sederhana prinsip kerja inverter yaitu menurunkan frekuensi ke lebih kecil dan besar yaitu dengan mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC kemudian dijadikan AC lagi dengan frekuensi dan tegangan yang berbeda [26]



Gambar 2. 12 Diagram Blok Variable Frequency Drive[20]

Inverter terdapat beberapa sirkuit penting yaitu sirkuit converter (berfungsi mengubah daya komersial menjadi DC dan menghilangkan ripple) serta sirkuit inverter (yang dapat mengatur frekuensi nya), inverter juga terdapat sirkuit pengontrol[27]

2.7.2 Inverter Schneider ATV312HO35M2

Dalam penelitian ini menggunakan inverter dengan merk Scheneider ATV312HO35M2, karena memiliki spesifikasi seperti yang penulis butuhkan, spesifikasi inverter seperti pada gambar 2. 13 Yaitu seperti pada tabel 2. 2



Gambar 2. 13 Inverter Schneider ATV312

(Sumber : Pribadi)

Tabel 2. 4 Spesifikasi Inverter Schneider ATV312

<i>Range Of Product</i>	Schneider ATV312HO35M2
<i>Component Name</i>	ATV312HO35M2
<i>Motor Power kW</i>	0.75 kW
<i>Motor Power hp</i>	1 hp
<i>Rated Supply Voltage</i>	200–240 V AC ±10% (1-fasa input)
<i>Supply Frequency</i>	50/60 Hz ±5%
<i>Apparent Power</i>	~2 kVA
<i>Communication Port Protocol</i>	RS-485 (Modbus RTU)
<i>Network Number Of Fases</i>	3 fasa (Output)

Dalam penjelasan **Tabel 2.4** yaitu type dari inverter yang digunakan yaitu Schneider ATV312HO35M2 yang memiliki power daya sebesar 0.75 kW dan power 1 hp, inverter ini memiliki input 1 fasa dan output pada inverter ini yaitu 3 fasa, protokol komunikasi yang digunakan yaitu RS-485 (Modbus RTU), alasan memakai inverter type Schneider ATV312HO35M2 karena beban yang dikeluarkan digunakan untuk memutarakan motor 3 fasa, kemudian motor 3 fasa akan menggerakkan alternator, yang mana dengan menggunakan inverter dengan power daya 0.75 kW/ 1 hp sudah mencukupi.

Inverter tipe Variable Frequency Drive (VFD) bekerja dengan prinsip mengubah frekuensi suplai untuk mengatur kecepatan motor induksi. Pada penelitian ini, inverter Schneider ATV312 menggunakan input analog 0–10 V sebagai referensi frekuensi kerja. Artinya, tegangan analog yang masuk ke terminal kontrol inverter akan dikonversi secara linier menjadi frekuensi output. Hubungannya dapat dituliskan seperti rumus 2.5.

$$f = \frac{V_{out}}{10} \times 50 \dots\dots\dots (2.5)$$

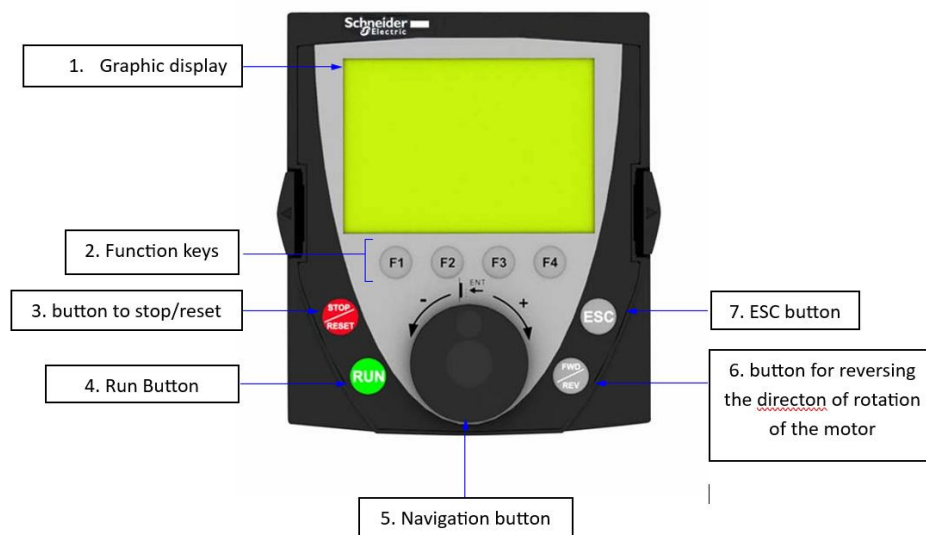
Keterangan :

f : Frekuensi Output Inverter (Hz)

V_{out} : Tegangan analog masukan inverter (Volt), hasil dari konversi sinyal PWM ESP32 melalui modul PWM to Voltage Converter

10 : Tegangan maksimum input analog inverter (Volt)

50 : Frekuensi nominal maksimum inverter (Hz)



Gambar 2. 14 Bagian Inverter Scheneider ATV312HO35M2

Pada gambar 2.14 menunjukkan beberapa komponen yang telah dikasih label, yang menjelaskan bahwa :

1. Graphic display yang berfungsi menampilkan informasi operasional seperti frekuensi output (Hz), tegangan/arus motor, pesan error dan mode operasi (manual/otomatis)
2. Function Keys berfungsi untuk mengakses menu parameter dan beralih antara mode operasi dengan contoh (V/F control, vector control)
3. Stop/Reset button berfungsi untu menghentikan motor dalam keadaan darurat atau normal stop, sedangkan reset berfungsi untuk mereset jika terjadi overload atau short circuit
4. Run Button berfungsi untuk memulai operasi motor sesuai parameter yang di-set seperti contoh: tekan “run” untuk jalankan motor pada 30Hz

5. Navigation Button berfungsi untuk menyesuaikan nilai frekuensi atau parameter, dan memindahkan antar menu atau digit saat programming
6. Reverse Rotation Button berfungsi membalikkan arah putaran motor (CW ke CCW atau sebaliknya, mungkin beberapa inverter perlu memprogram terlebih dahulu untuk mengaktifkan fitur ini
7. ESC button berfungsi untuk membatalkan input atau keluaran dari menu programming, atau Kembali ke layar utama dari sub-menu

2.8 Kontrol PID

Sistem kontrol merupakan hal penting dalam suatu sistem, sistem kontrol ini biasanya digunakan untuk menghasilkan output yang diinginkan. Dalam istilah lainnya adalah proses pengendalian terhadap suatu parameter sehingga mengeluarkan suatu hasil atau range tertentu. Cara kerja dari sistem kontrol ini dengan membandingkan antara keluaran atau output aktual dengan output yang diharapkan atau setpoint, dimana dari komparasi tersebut menghasilkan selisih error. Dalam suatu sistem kontrol biasanya terdapat sensor, aktuator dan controller dalam prosesnya. Sistem kontrol memiliki dua macam jenis yaitu sistem kontrol Open Loop dan Close Loop. Pada sistem kontrol open loop atau terbuka memiliki ciri khas yaitu tidak memiliki feedback atau umpan balik, dimana umpan balik tersebut bertujuan untuk memproses kembali data agar sesuai dengan setpoint. Sedangkan sistem kontrol close loop atau tertutup merupakan sistem kontrol yang memiliki feedback, biasanya kontrol ini yang akan mengambil data yang bisa diolah ataupun untuk dimonitoring. Kelebihan dari sistem close loop ini yaitu akurasi lebih baik dan dapat meminimalisir gangguan, hal ini dikarenakan umpan balik atau feedback yang terus memproses suatu data yang error untuk diubah hingga nilai setpoint.[28]

Dalam pemrosesan nilai error terdapat 3 aksi utama yaitu aksi proportional (P), integral (I), dan derivative (D) untuk menghasilkan sinyal kendali yang akan dikirimkan ke aktuator agar sistem mencapai kondisi yang diinginkan dengan stabil, untuk menyesuaikan respon sistem terhadap perubahan nilai error maka

ketiga parameter ini saling bekerja. Dengan penalaan parameter yang tepat maka sistem dapat mencapai kestabilan dan kecepatan respon yang optimal[29]

2.8.1 Kontrol Propotional (P)

Bagian yang memberikan sinyal kendali yang sebanding dengan besar kecilnya error. Jika semakin besar error, maka semakin besar aksi koreksi yang dihasilkan. Biasanya kontrol P tidak mampu menghilangkan *error* secara total karena selalu meninggalkan steady-state error[28]. Rumus persamaan dari kontrol proposional yaitu output dari propotional.

$$u_p(t) = K_p \cdot e(t) \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana $u_p(t)$ merupakan sinyal output dari kontrol proposional, K_p adalah konstanta penguat proporsional (Proportional Gain). Nilai yang menentukan seberapa agresif respons kontroler terhadap kesalahan, dan $e(t)$ adalah kesalahan *error* sesaat pada satuan waktu t . [28]kekurangan dari kontrol proporsional ini yaitu jika terlalu besar nilai K_p maka sistem nantinya akan menjadi tidak stabil dan output yang tidak *steady*.

2.8.2 Kontrol Integral (I)

Kontrol *I* bekerja dengan mengakumulasi error dari waktu ke waktu yang bertujuan untuk menghilangkan error sisa yang tidak dapat dihilangkan oleh kontrol *P*, jadi jika terjadi error kecil tapi terjadi terus menerus maka kontrol integral akan menambahkan koreksi sampai error benar-benar hilang. [28]Rumus persamaan dari kontrol integral yaitu

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(T)dT \dots \dots \dots (2.7)$$

Dimana $u_i(T)$ merupakan output dari kontrol integral pada waktu t . Nilai ini merupakan hasil dari kalkulasi integral yang nantinya dijumlahkan dengan komponen P dan D untuk menjadi sinyal kendali akhir. K_i merupakan penguat gain untuk bagian integral, jadi semakin besar maka semakin kuat aksi integral bekerja atau bekerja untuk mengatur seberapa cepat integral menumpuk koreksi untuk menghilangkan *error* sisa. Sedangkan $\int_0^t e(T)dT$ ini adalah integrasi dari error

sejak waktu awal (0) sampai waktu sekarang (t) yang artinya sistem “menjumlahkan” besar error selama periode waktu dan semakin lama error masih ada maka semakin besar nilai integral dan jika eror kecil tapi berlangsung lama maka nilai integral tetap bertambah besar.

2.8.3 Kontrol Derivative (D)

Besar output dari pengontrol memiliki kesamaan seperti operasi diferensial pada umumnya, pengontrol ini menggunakan kecepatan perubahan sinyal kesalahan sebagai parameter pengontrol[28]. Apabila tidak terdapat perubahan sinyal error, maka output dari kontrol derivative tidak akan berubah. Persamaan kontrol derivative dirumuskan sebagai berikut

$$u(t) = Kd \frac{d}{dt} e(t) \dots \dots \dots (2.8)$$

$u(t)$ merupakan sinyal kendali yang dihasilkan oleh aksi turunan (D), nilai ini yang akan ditambahkan Bersama komponen P dan I untuk menghasilkan sinyal kontrol total. Dan Kd merupakan konstanta penguat bagian derivative yang berfungsi untuk mengatur seberapa sensitif sistem terhadap perubahan error, jika ingin sistem lebih cepat meredamkan overshoot maka Kd diperbesar sebaliknya jika terlalu bergetar maka Kd diperkecil. Untuk $\frac{d}{dt} e(t)$ merupakan kontrol inti D, yang berfungsi menghitung seberapa cepat error berubah, jadi jika error meningkat cepat maka nilai turunan besar, sebaliknya jika error stabil atau pelan maka nilai turunan kecil. Jika error mulai mengecil maka derivative akan memberi peringatan untuk memperlambat koreksi

2.8.4 Metode Tuning Empiris

Metode tuning empiris merupakan pendekatan penentuan parameter pengendali PID yang dilakukan dengan pengamatan secara langsung terhadap respon sistem nyata tanpa memerlukan model matematis sistem atau proses simulasi. Dalam metode ini, konstanta PID ditentukan melalui proses penyesuaian bertahap dengan mengamati karakteristik respon sistem terhadap perubahan setpoint maupun gangguan eksternal.

Pendekatan empiris berbeda dengan metode tuning berbasis analitik seperti Ziegler–Nichols atau Cohen–Coon yang memerlukan identifikasi parameter sistem terlebih dahulu. Pada metode empiris, sistem diuji secara langsung, kemudian parameter pengendali diubah secara bertahap hingga diperoleh respon yang memenuhi kriteria performa tertentu, seperti kestabilan sistem, waktu tunak yang memadai, dan kesalahan keadaan tunak yang minimal.

Berbagai penelitian terkini menunjukkan bahwa meskipun telah berkembang metode tuning berbasis optimasi dan kecerdasan buatan, pendekatan empiris tetap relevan dan banyak digunakan pada aplikasi industri karena kemudahannya dalam implementasi langsung pada perangkat keras serta kemampuannya menghasilkan parameter yang sesuai dengan kondisi aktual sistem. Metode ini dinilai efektif terutama pada sistem yang memiliki karakteristik nonlinier atau parameter yang berubah terhadap waktu.

2.9 Nextion Editor

Nextion editor merupakan perangkat lunak berbasis graphical user interface (GUI) yang dirancang khusus untuk mengembangkan antarmuka pengguna bagi layar HMI nextion, terdapat beberapa desain visual yang memungkinkan perancang dapat membuat tampilan interaktif seperti tombol, text, angka, gauge & waveform, slider dan elemen visual lainnya, terdapat fitur simulator yang digunakan untuk melihat hasil desain secara langsung sebelum diunggah ke perangkat HMI fisik, sehingga dapat mengurangi kesalahan saat implementasi diperangkat nyata. Perancangan antarmuka pengguna pada HMI Nextion cukup mudah dan tidak memerlukan pemrograman yang kompleks. Proses pembuatan tampilan dilakukan menggunakan Nextion Editor dengan cara menambahkan komponen antarmuka seperti:[30]

a) Button (tombol)

Button adalah elemen antarmuka yang dapat ditekan oleh pengguna untuk memerintah suatu sistem.

b) Text (Teks)

teks digunakan untuk menampilkan informasi statis atau dinamis di layar, seperti label, nilai numerik, atau instruksi.

c) Slider (Penggесer)

Slider digunakan untuk memilih atau menyesuaikan nilai dalam rentang tertentu dengan cara menggeser penanda

d) Numeric / Number Display

Numeric digunakan khusus untuk menampilkan angka secara dinamis, yang bisa berupa integer atau desimal.

e) Picture (Gambar / Ikon)

Picture digunakan untuk menampilkan ikon, latar, atau tanda visual lainnya

f) Page (Halaman)

Nextion Editor mendukung multiple page sehingga antarmuka dapat dibagi menjadi beberapa layar.

g) Event & Touch Interaction

Digunakan untuk menghasilkan kode atau perintah saat terdapat sentuhan pada elemen



Gambar 2. 15 Nextion Editor

2.10 HMI Nextion NX4832F035

Nextion merupakan modul Human–Machine Interface (HMI) terintegrasi berupa layar TFT sentuh yang telah dilengkapi dengan prosesor dan memori internal. Keberadaan prosesor on-board ini memungkinkan Nextion menjalankan berbagai objek antarmuka grafis seperti teks, angka, tombol, waveform, progress bar, dan komponen GUI lainnya secara mandiri. Dengan konsep tersebut, proses

rendering tampilan tidak lagi dibebankan pada mikrokontroler utama, sehingga kinerja sistem secara keseluruhan menjadi lebih ringan dan stabil. Perancangan antarmuka pengguna pada Nextion dilakukan menggunakan Nextion Editor, yaitu perangkat lunak berbasis GUI WYSIWYG (What You See Is What You Get) yang mendukung metode drag-and-drop. Melalui software ini, pengguna dapat dengan mudah menyusun tampilan HMI tanpa perlu pemrograman grafis tingkat rendah. File hasil desain kemudian dikompilasi dan diunggah (di-flash) ke modul Nextion, biasanya melalui USB to TTL. Dalam sistem embedded yang menggunakan ESP32, komunikasi antara mikrokontroler dan modul Nextion dilakukan melalui antarmuka UART (Universal Asynchronous Receiver–Transmitter). ESP32 hanya bertugas mengirim dan menerima perintah singkat berupa instruksi teks untuk mengubah nilai tampilan atau membaca event sentuhan dari pengguna. Antarmuka UART pada Nextion umumnya menggunakan pin RX, TX, VCC (5 V), dan GND, sehingga koneksi dapat dilakukan secara langsung dan sederhana. Koneksi langsung ini umum dipraktikkan pada proyek ESP32 stabil untuk tampilan status dan kendali menu seperti pada **Gambar 2.16**[30]



Gambar 2. 16 HMI Nextion NX4832F035

Pada sistem yang dirancang, HMI Nextion berfungsi untuk menampilkan parameter kelistrikan utama, seperti tegangan dan arus yang diukur oleh modul PZEM-004T pada sisi keluaran trafo step-up, dan frekuensi pada inverter. Informasi ini ditampilkan secara real-time sehingga pengguna dapat memantau kondisi operasi sistem selama proses pengujian maupun pengoperasian. Selain sebagai monitoring, HMI Nextion juga digunakan untuk memasukkan nilai setpoint, khususnya nilai tegangan referensi yang diinginkan pada mode otomatis. Nilai

setpoint tersebut dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 melalui komunikasi serial dan digunakan sebagai acuan dalam sistem kendali PI. Dengan demikian, HMI berperan langsung dalam proses pengendalian sistem. HMI Nextion terdapat mode operasi, yaitu mode manual dan mode otomatis. Pada mode manual, pengguna dapat mengatur frekuensi inverter secara langsung, sedangkan pada mode otomatis, sistem bekerja berdasarkan algoritma kendali PI untuk menjaga tegangan keluaran sesuai dengan setpoint yang ditentukan

Tabel 2. 5 Spesifikasi LCD Nextion NX4832F035

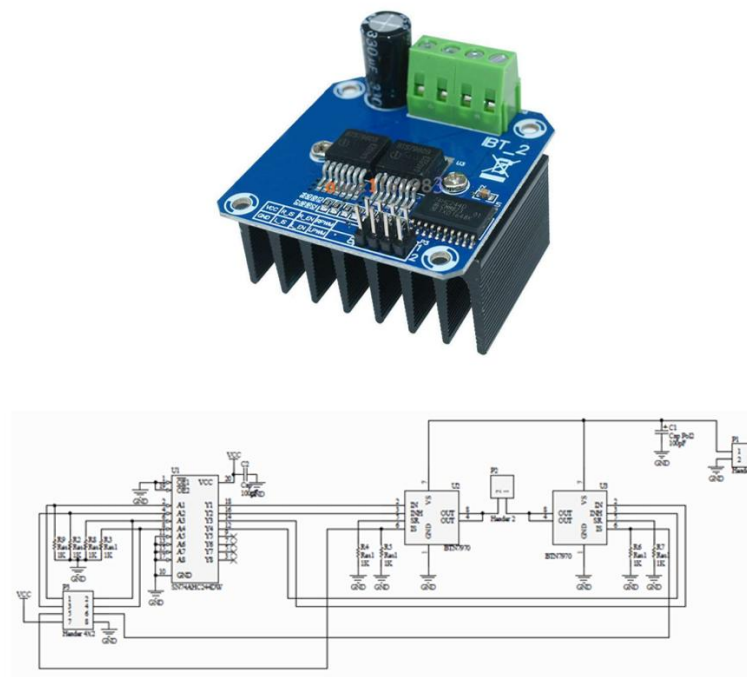
Parameter	Spesifikasi
Seri	NX4832F035 / Discovery
Ukuran Layar	3,5" TFT LCD
Resolusi	480 × 320 piksel (dapat diset 320 × 480)
Area Aktif (A.A.)	73,44 mm × 48,96 mm
Memori Flash	16 MB
SRAM	3.584 byte
Instruction Buffer	1.024 byte
Warna Tampilan	65K (65.536 warna)
Jenis Sentuh	Resistive (RTP)
Tegangan Suplai	~300 nit
Arus Operasi (tipikal)	~105 mA (brightness maksimum); mode sleep ~4,5 mA

2.11 Driver BTS7960

BTS7960 merupakan modul driver arus besar berbasis rangkaian H-bridge yang menggunakan dua IC BTS7960 dalam satu modul. BTS7960 umumnya digunakan untuk mengendalikan motor DC torsi tinggi, tetapi dapat juga digunakan dimanfaatkan untuk mengatur arus eksitasi (arus DC) pada rotor alternator. Arus eksitasi ini sangat menentukan besar atau kecilnya tegangan output alternator. Keunggulan dari driver BTS7960 yaitu input logika kompatibel

mikrokontroler, PWM hingga ~ 25 kHz dan paket proteksi (over-temperature/over-/under-voltage, over current, short-circuit).

Eksitasi memerlukan arus DC ke brush, besarnya arus menentukan fluks rotor dan pada akhirnya tegangan terminal alternator. Dengan PWM, tegangan rata-rata pada kumparan medan dikendalikan dengan duty-cycle. Freewheeling dan dead 24 time internal pada BTS7960 menjaga arus saat komutasi sehingga ripple lebih rendah dan EMI tereduksi. Pada praktik, frekuensi PWM puluhan hingga belasan kHz yang dihasilkan dapat membuat proses lebih halus. Bentuk dari komponen dapat dilihat pada **Gambar 2.17**.



Gambar 2. 17 Driver BTS7960 Dan Skematik Modul HW-89

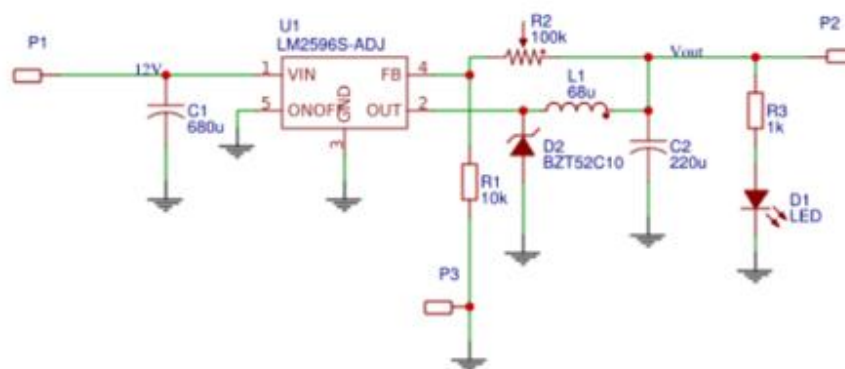
Dalam rancangan ini, ESP32-WROOM mengirim sinyal PWM dengan nilai sesuai yang dibutuhkan Pin yang digunakan pada modul BTS7960 ini yaitu RPWM/LPWM, EN_R/L, VCC (3V3), dan GND (keseluruhan)

Tabel 2. 6 Spesifikasi Driver BTS7960

Parameter	Nilai Spesifikasi
Suplai Motor (B+)	6 – 27 V DC
Arus Maksimum	≈ 43 A (puncak)
Frekuensi PWM	hingga ≈ 25 kHz
Mode Kontrol	PWM
Level Input Logika (Vcc)	Input kompatibel 3,3–5 V
Konsumsi Arus Diam (Iq)	7 μ A pada 25°C
Pin Kendali Tipikal	RPWM, LPWM, R_EN, L_EN, Vcc, GND
Fitur Lain Modul	Heatsink, freewheeling aktif, proteksi suhu/arus/tegangan

2.12 Modul Step Down LM 2596

Modul step-down LM2596 adalah rangkaian regulator DC-to-DC buck converter siap pakai yang menggunakan IC LM2596 untuk menurunkan tegangan input DC menjadi tegangan output DC yang lebih rendah secara efisien. Modul ini sangat populer dalam elektronika dan proyek mikrokontroler seperti Arduino, ESP32, STM32, karena mudah digunakan, efisien, dan bisa diatur outputnya menggunakan potensiometer. Fungsi utama yaitu menurunkan tegangan input tinggi (misalnya 12V/24V DC) menjadi output yang lebih rendah (misalnya 5V atau 3.3V).



Gambar 2. 18 Modul Step Down LM 2596

Tabel 2. 7 Spesifikasi Modul Step Down LM 2596

Spesifikasi	Nilai
Tegangan Input	4V - 40V DC
Tegangan Output	1.25V - 35V DC (adjustable)
Arus Output Max	2A – 3A (tergantung heatsink)
Efisiensi	Hingga 92%
Frekuensi Switching	150 KHz

Modul LM2596 merupakan regulator tegangan DC to DC tipe step-down (buck converter) yang dirancang untuk menurunkan tegangan input menjadi tegangan output yang lebih rendah. Modul ini memiliki rentang tegangan input dari 4 volt hingga 40 volt DC, sehingga dapat digunakan dengan berbagai sumber daya seperti

adaptor 12V, 24V, atau baterai. Tegangan output dari modul ini dapat diatur (adjustable) mulai dari 1.25 volt hingga 35 volt DC, tergantung kebutuhan pengguna. Penyesuaian tegangan dilakukan dengan memutar potensiometer kecil yang tersedia di papan modul. Untuk daya output, LM2596 mampu memberikan arus hingga 2 ampere dalam kondisi standar, dan bisa mencapai 3 ampere jika dilengkapi dengan heatsink yang memadai untuk mengatasi panas berlebih. Oleh karena itu, penggunaan heatsink sangat disarankan ketika modul bekerja pada beban tinggi secara terus-menerus. Dari segi efisiensi, modul ini tergolong sangat efisien, yakni mencapai hingga 92%, yang berarti hanya sebagian kecil energi yang hilang dalam bentuk panas. Ini menjadikan LM2596 jauh lebih hemat energi dibandingkan regulator linier seperti 7805. Selain itu, modul ini bekerja pada frekuensi switching sebesar 150 kHz, yang memungkinkan penggunaan komponen pasif berukuran kecil (seperti induktor dan kapasitor) namun tetap mampu menghasilkan output tegangan yang stabil dan cepat merespons perubahan beban. Dengan spesifikasi tersebut, modul step-down LM2596 sangat cocok digunakan dalam sistem mikrokontroler, sensor, serta proyek-proyek elektronika dan otomasi industri skala kecil hingga menengah

2.13 PWM-to-Voltage Converter Module

PWM-to-Voltage Converter Module merupakan suatu komponen yang berfungsi untuk mengubah sinyal digital PWM (Pulse Width Modulation) menjadi sinyal tegangan analog yang berkelanjutan, dalam rentang 0 hingga 10 volt. Modul ini biasa digunakan untuk project yang menggunakan mikrokontroler (misalnya ESP32 atau Arduino) yang ingin mengatur perangkat yang hanya menerima masukan berupa tegangan analog, seperti yang dilakukan pada penelitian ini yaitu inverter (VFD)[31]

Konversi dilakukan dengan cara menyaring pulsa-pulsa PWM menggunakan rangkaian *low-pass filter*, yang biasanya terdiri dari resistor dan kapasitor, sehingga pulsa-pulsa tersebut berubah menjadi tegangan rata-rata (DC). Keluaran nilai tegangan biasanya tergantung duty cycle dari sinyal PWM; jadi semakin tinggi duty cycle, maka semakin tinggi tegangan yang dihasilkan. Misalnya, jika duty

cycle sebesar 50%, maka tegangan keluaran berada di sekitar 5 volt pada sistem 0–10 volt[31]

Rumus yang dipakai dalam proses scaling agar inverter dapat menerima tegangan sesuai perintah dari ESP yaitu menggunakan rumus V_{out} seperti yang terdapat pada rumus 2.9.

$$V_{out} = \frac{PWM}{255} \times 10 \dots \dots \dots (2.9)$$

keterangan :

V_{out} : Tegangan Output PWM to voltage converter

PWM : Nilai Duty Cycle Dari Sinyal PWM ESP32

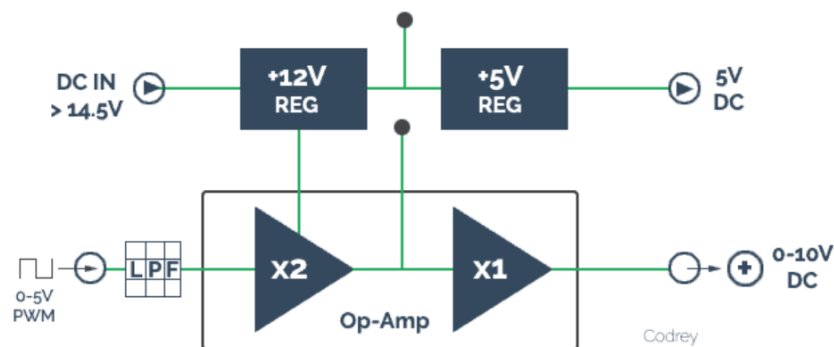
10 : Tegangan Maksimum (Volt) Dari Modul PWM To Voltage Converter

modul PWM-to-Voltage dilengkapi dengan op-amp yang berfungsi sebagai penguat sinyal dan potensiometer yang berguna untuk mengakuratkan nilai keluaran saat dilakukan kalibrasi. Modul ini umumnya memiliki input PWM 3.3V atau 5V, dan membutuhkan catu daya tambahan (biasanya 12–24V) agar mampu menghasilkan tegangan output hingga 10V. Dengan demikian, PWM-to-Voltage Converter Module merupakan solusi yang sederhana dan ekonomis untuk menjembatani komunikasi antara sistem digital dan perangkat analog dalam aplikasi otomasi industri.[31]



Gambar 2. 19 Modul PWM to Volatage Converter

(Sumber : Pribadi)



Gambar 2. 20 Blok Diagram Modul PWM to Voltage Converter

Tabel 2. 8 Spesifikasi Modul PWM To Voltage Converter

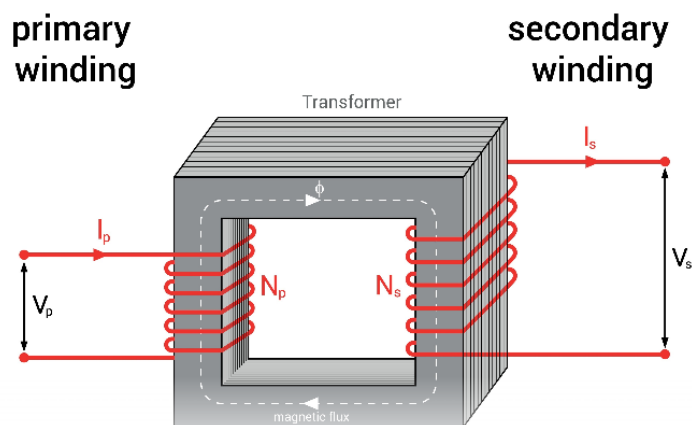
Parameter	Nilai
Input PWM Voltage	3.3V / 5V / 12V (opsi tergantung versi modul)
Input PWM Frequency	1 kHz – 10 kHz (optimal di 1-3 kHz)
Duty Cycle Range	0% - 10%
Output Voltage Range	0V – 10V DC (tergantung pada Vcc dan konfigurasi)
Tegangan Catu Daya	12V – 24V DC (tergantung tipe modul)
Resolusi Konversi	< 0.1V (tergantung filter & komponen operasional)
Linearitas	±1%
Waktu Respon	< 20 ms
Impedansi Output	< 1 KΩ
Tegangan Output Maksimum	~Vcc (jika dirancang tanpa referensi pengatur)
Ukuran Modul	±50mm × 25mm × 15mm
Parameter	Nilai
Konektor	Terminal screw (input PWM, Vcc, GND, Vout)

Modul ini dapat menerima sinyal PWM dengan level tegangan 3.3V, 5V, atau 12V tergantung versi modul yang digunakannya, seperti yang digunakan pada penelitian ini untuk ESP32 yang mempunyai sinyal PWM dengan level tegangan 3.3V. frekuensi sinyal PWM yang dapat diterima berada pada rentang [32]

konverter ini adalah komponen interfacing, yang mengubah bahasa digital dari mikrokontroler menjadi sinyal yang dapat dipahami oleh perangkat analog seperti inverter. Tanpa konverter ini, ESP32 tidak dapat langsung mengontrol inverter, karena inverter tidak dapat membaca sinyal PWM secara langsung. Dalam sistem konvensional, kecepatan motor dikendalikan dengan potensiometer analog yang memberikan tegangan variabel ke inverter. Dalam penelitian ini, potensiometer tersebut digantikan oleh PWM to Voltage Converter, sehingga pengaturan menjadi otomatis dan terprogram melalui ESP32[32]

2.14 Transformator Non CT 5A

Transformator (trafo) merupakan komponen elektronika yang krusial dalam sistem tenaga Listrik dengan fungsi utamanya yang mengubah level tegangan AC tanpa mengubah frekuensinya, Trafo bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk memindahkan energi Listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya. Transformator memiliki dua gulungan kawat yang disebut kumparan primer dan kumparan skunder seperti yang terdapat pada **Gambar 2.21**[33]



Gambar 2. 21 Kumparan Sekunder Dan Kumparan Primer Pada Transformator

Jika jumlah lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, maka tegangan keluaran akan meningkat (step-up) begitupun sebaliknya, jika lilitan sekunder lebih sedikit, maka tegangan akan turun (step-down).[33]



Gambar 2. 22 Transformator Non-CT 5A
(Sumber : Pribadi)

Transformator non-CT (Non-Center) adalah jenis trafo yang lilitan sekundernya hanya memiliki dua ujung terminal keluaran, sehingga hanya menghasilkan satu nilai tegangan AC. Transformator non-CT 5A memiliki perbedaan dengan transformator tegangan, transformator arus, karena merupakan Transformator non-CT 5A jenis transformator arus (current transformer) yang dirancang tanpa titik Tengah (non center tap / non-CT) dan memiliki arus sekunder sebesar 5 ampere. Pada transformator non-CT 5A, kumparan sekundernya tidak memiliki sambungan tap Tengah sehingga hanya memiliki dua terminal keluaran. Terminal sekunder positif dan terminal sekunder negatif. Arus yang dikeluarkan dari kumparan sekunder selalu setara dengan rasio perbandingan arus dari kumparan primer, di mana arus primer biasanya sangat besar (misalnya ratusan ampere), dan diturunkan menjadi nilai standar 5A pada sisi sekunder.[34]

Spesifikasi 5A pada sebuah trafo merujuk pada arus maksimum yang dapat dialirkan secara kontinu oleh lilitan sekunder tanpa menyebabkan panas berlebihan (overheating) atau kerusakan. Daya semu (apparent power) sebuah trafo, yang dinyatakan dalam satuan Volt-Ampere (VA), dapat dihitung dengan mengalikan

tegangan sekundernya dengan arus sekundernya. Sebagai contoh, jika sebuah trafo Non-CT 5A memiliki tegangan output 12V, maka daya maksimumnya adalah:

$$P = V_s \times I_s = 12 \times 5 = 60 \text{ VA} \dots \dots \dots (2.10)$$

Untuk mencari keterkaitan tegangan, arus, dan jumlah lilitan pada trafo ideal dapat dijelaskan melalui persamaan berikut, di mana efisiensinya dianggap 100%:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan :

V_p = Tegangan Primer

V_s = Tegangan Sekunder

N_p = Jumlah Lilitan Primer

N_s = Jumlah Lilitan Sekunder

I_p = Arus Primer

I_s = Arus Sekunder

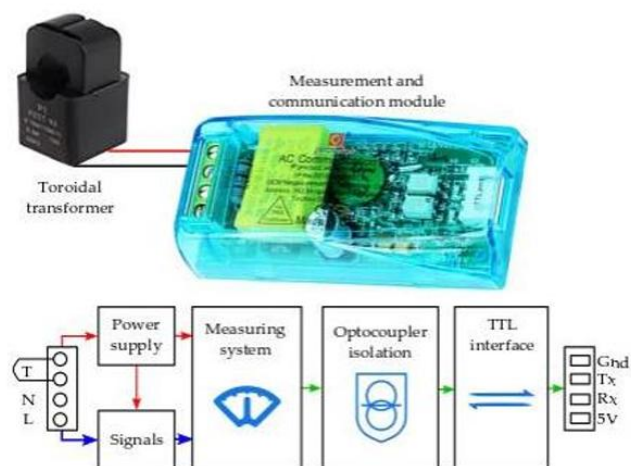
Dalam penerapannya, transformator Non-CT 5A berperan sebagai elemen penting dalam berbagai sistem catu daya linier, pengisi daya aki, hingga rangkaian suplai daya untuk perangkat audio yang memerlukan arus cukup besar. Transformator ini bekerja sebagai penurun tegangan (step-down), yakni mengkonversi tegangan AC jaringan listrik PLN—misalnya 220 volt—menjadi tegangan AC yang lebih rendah dan lebih aman, seperti 12 V, 18 V, atau 24 V. Setelah proses penurunan tegangan tersebut, keluaran AC kemudian diteruskan ke rangkaian penyearah, penyaring, serta pengatur tegangan untuk menghasilkan tegangan DC yang stabil dan bersih.

Kemampuan transformator Non-CT dengan kapasitas arus sekunder hingga 5 ampere membuatnya sangat sesuai digunakan pada sistem dengan kebutuhan daya tingkat menengah, seperti catu daya untuk penguat audio berdaya kecil, rangkaian

mikrokontroler dengan banyak periferal, maupun aplikasi elektronik lain yang membutuhkan suplai arus yang andal dan konsisten.[34]

2.15 PZEM-004T 100A

PZEM-004T 100A merupakan modul pengukuran Listrik AC yang digunakan untuk memonitor beberapa parameter kelistrikan seperti tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Modul ini bekerja pada sistem dan menggunakan transformator arus (Current Transformer/CT) eksternal agar dapat mengukur arus hingga 100 A tanpa harus mengalirkan arus langsung ke rangkaian elektronik. Modul menghitung daya aktif ($P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos\phi$), energi ($\int P \cdot dt$), frekuensi, dan faktor daya. Data dikirim melalui UART-TTL atau biasanya menggunakan pin RX dan TX atau modbus-RTU. Di dalam modul, sinyal diubah ke bentuk digital dan diproses untuk menghasilkan parameter RMS, daya, energi, PF, dan f. resolusi pada tegangan adalah sebesar 0,1V, arus 0,001A, dan daya 0,1W dan Tingkat akurasi dari daya yaitu 0,5%. Pada implementasi praktis, optocoupler meng isolasi jalur sinyal sebelum dikirimkan data dikirim via TTL dan isolasi ini penting untuk keselamatan dan mengurangi gangguan ke mikrokontroler (ESP32)[35]



Gambar 2. 23 Komponen PZEM-004T 100A

Secara temporal, modul PZEM menunjukkan kestabilan pembacaan yang baik meskipun tidak dirancang untuk respons sangat cepat; hal ini tampak dari *sampling*

time sekitar 200 ms yang secara praktis menghasilkan frekuensi pembaruan data kira-kira 5 Hz. Dengan demikian, PZEM lebih tepat diaplikasikan sebagai sensor umpan balik pada level pengawasan (supervisory) untuk menjaga kestabilan tegangan terminal, mengamati faktor daya, serta melakukan pencatatan energi dalam satuan kWh. Namun, modul ini kurang direkomendasikan untuk digunakan sebagai elemen umpan balik pada *inner loop* PID yang membutuhkan *bandwidth* tinggi.[35]

Integrasi dengan ESP32-WROOM umum dilakukan melalui komunikasi UART (HardwareSerial), dan penerapan *moving average* dapat ditambahkan agar sistem lebih tangguh terhadap derau beban. Dalam konteks pengendalian eksitasi, data tegangan keluaran alternator dari PZEM dapat dijadikan referensi atau batasan (constraint) bagi pengatur PID arus eksitasi, sekaligus dimanfaatkan untuk pencatatan energi dalam analisis performa jangka panjang. Dengan tingkat akurasi sekitar 96%, modul ini telah memadai untuk keperluan pemantauan dan penentuan keputusan operasional secara kuantitatif, terutama ketika variabel *error* menjadi parameter penting dalam evaluasi sistem. Selain itu, sejumlah studi memperlihatkan bahwa PZEM tetap mampu menyediakan data energi yang konsisten meskipun terjadi gangguan komunikasi dengan mikrokontroler; penyimpangan energi yang tercatat hanya berada pada kisaran $\pm 0,73\%$ selama pemantauan kontinu pada lingkungan domestik.pada **Tabel 2.6** merupakan spesifikasi dari PZEM-004T.[36]

Tabel 2. 9 Spesifikasi PZEM-004T

Parameter	Nilai / Rentan	Resolusi	Akurasi
Tegangan	80-260 V	0,1 V	±0,5%
Arus terukur	0-100 A	0,001 A	±0,5%
Daya aktif	0-23 kW	0,1 W	±0,5%
Energi aktif	0-9999,99 kWh	1 Wh	±0,5%
Faktor daya (PF)	0,00-1,00	0,01	±1%
Frekuensi	45-65 Hz	0,1 Hz	±0,5%
Antarmuka	UART-TTL (Modbus RTU)	-	-
Alarm daya lebih	Threshold setel	1 W (LSB)	-
Catu daya logika	5V DC (TTL pasif)	-	-
Suhu kerja	-20 °C s.d +60 °C		

2.16 Pulley dan V belt

Pulley dan V belt merupakan suatu komponen mekanik yang menggunakan gesekan sebagai daya Tarik putar belt terhadap pulley. Untuk menghasilkan rasio 1:1 maka pulley dan belt harus memiliki ukuran yang sama. Pada pulley biasanya diaplikasikan pada shaft rotor dan menggunakan pengunci spie. V Belt memiliki bentuk V atau dengan sudut V untuk bagian dalam pulley, hal tersebut yang bertujuan agar tidak terjadi slip saat pulley berputar yang bisa dilihat pada **gambar 2.24**. [37]



Gambar 2. 24 V Belt

Jadi pada penelitian ini prime mover yang menggunakan motor induksi 3 fasa sebagai sistem penggeraknya akan berputar dan memutar pulley yang dibagian motor induksi dan setelah itu belt akan menstransmisikan gaya putar ke pulley dari alternator dengan perbandingan 1:1 Pada rotor yang berada pada prime mover dan alternator memiliki perbedaan putaran jika diameter luar dari pulley berbeda. Untuk

mengetahui perbedaan putaran, maka bisa menggunakan persamaan berikut untuk menghitung putaran pulley:[37]

$$i = \frac{n_1 D_2}{n_2 D_1} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan :

i =Velocity ratio

D_1 = Diameter pulley penggerak (mm)

D_2 = Diameter pulley yang digerakkan (mm)

n_1 = Putaran pulley penggerak (rpm)

n_2 = Putaran pulley yang digerakkan (rpm)

Dalam putaran dari belt bisa dicari kecepatannya dengan menggunakan persamaan berikut:

$$V = \frac{(\pi.D.n)}{60.1000} \dots\dots\dots(2.13)$$

Keterangan :

V = Kecepatan keliling belt (m/s)

D = Diameter pulley (mm)

n = Putaran motor (rpm)

Persamaan tersebut digunakan untuk menentukan kecepatan linier belt ketika bergerak sepanjang mekanisme transmisi antara pulley dan belt. Nilai kecepatan keliling ini sangat berpengaruh terhadap efisiensi perpindahan daya, performa mekanik, serta stabilitas keseluruhan sistem. Diameter pulley yang lebih besar atau putaran motor (rpm) yang lebih tinggi akan menghasilkan kecepatan belt yang lebih besar pula. Perhitungan ini didasarkan pada asumsi bahwa tidak terjadi slip antara pulley dan belt, sehingga kecepatan linier belt dapat disetarakan dengan kecepatan keliling permukaan pulley. Asumsi tanpa slip penting untuk memastikan bahwa perhitungan kecepatan transmisi daya bersifat akurat. Jika slip terjadi, belt akan bergerak lebih lambat daripada kecepatan teoritis, sehingga dapat menurunkan efisiensi dan menyebabkan kehilangan daya. Persamaan ini menjadi dasar dalam perancangan sistem V-belt, agar belt tidak mengalami kecepatan berlebih (over-

speeding) atau slip yang berlebihan. Slip yang terlalu besar dapat menyebabkan peningkatan temperatur, keausan dini pada belt, dan bahkan kegagalan sistem jika dibiarkan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, pemilihan diameter pulley, jenis belt, dan kecepatan operasi harus dirancang dengan mempertimbangkan batasan mekanis dan karakteristik material belt.[37]

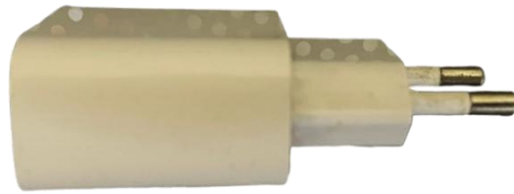


Gambar 2. 25 Pulley Diameter 3 Inch

(Sumber : Pribadi)

2.17 Adaptor Supply 5V 2A

Adaptor supply 5V 2A merupakan modul catu daya yang berfungsi mengubah tegangan AC220 VAC menjadi tegangan direct current (DC) sebesar 5 volt dengan arus maksimum 2 ampere. Modul ini memiliki efisiensi pada rentan 80-85%. Adaptor supply 5V 2A termasuk dalam kategori switched mode power supply (SMPS) yang menggunakan switching frekuensi tinggi untuk konversi daya yang optimal. Komponen ini terdiri dari beberapa bagian utama yaitu bridge rectifier yang berfungsi menyearahkan tegangan AC input, kapasitor input sebagai filter awal, transistor switching yang dikendalikan oleh IC PWM controller, transformator ferit berfrekuensi tinggi untuk isolasi dan penyesuaian level tegangan, dioda output dan kapasitor filter untuk menghasilkan DC yang stabil, serta rangkaian feedback untuk regulasi tegangan output. Dengan desain seperti ini memungkinkan adaptor menghasilkan tegangan output yang stabil meskipun terjadi fluktuasi pada tegangan input



Gambar 2. 26 Adaptor Supply 5V 2A
(Sumber : Pribadi)

Adaptor 5V 2A memiliki beberapa karakteristik utama, antara lain regulasi tegangan dengan toleransi $\leq \pm 5\%$, ripple dan noise yang rendah (≤ 100 mVp-p), serta respons transien yang cepat terhadap perubahan beban. Selain itu, adaptor ini umumnya sudah dilengkapi dengan sistem proteksi seperti over-current protection (OCP), short-circuit protection (SCP), dan over-voltage protection (OVP) yang berfungsi untuk meningkatkan keamanan dan keandalan, baik bagi adaptor itu sendiri maupun perangkat yang disuplai.

Berbeda dengan modul LM2596 yang merupakan buck converter non-isolated dan cenderung lebih rentan terhadap noise dari sumber daya sebelumnya, adaptor 5V 2A menyediakan isolasi galvanik seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.26**. Isolasi ini efektif dalam mencegah perambatan noise dari SMPS 12V ke subsistem digital. Kondisi tersebut

terbukti dapat mengatasi permasalahan pada HMI Nextion yang sebelumnya tidak mampu menampilkan data saat menggunakan modul LM2596. Meskipun demikian, dari sisi efisiensi konversi daya, LM2596 masih memiliki keunggulan dengan efisiensi sekitar $\pm 90\%$. Spesifikasi singkat dari modul adaptor ini selanjutnya disajikan pada **Tabel 2.10**

Tabel 2. 10 Spesifikasi Modul Supply Adaptor

Parameter	Spesifikasi Umum
Tegangan Input	100-240 VAC
Tegangan Output	5 VDC \pm 5%, 2A maksimal
Arus Output	2A
Efisiensi	\geq 80%
Frekuensi Switching	50/60 Hz