

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Alternator

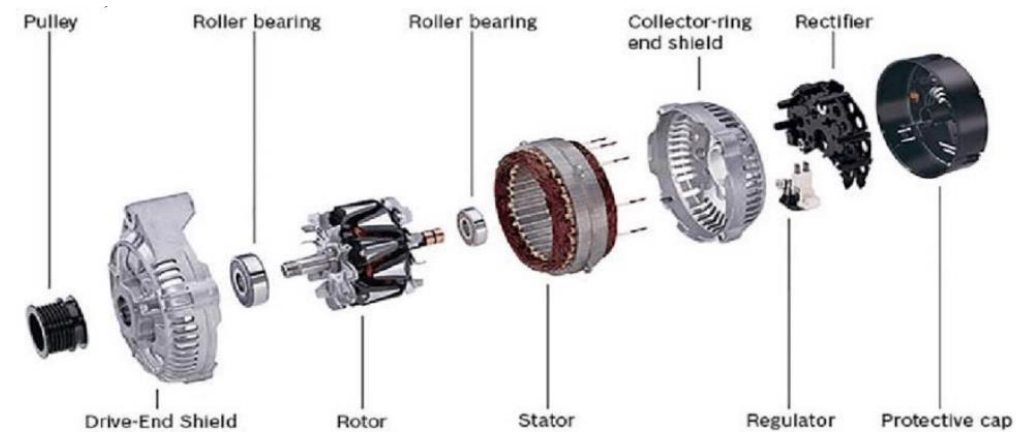
Alternator merupakan suatu perangkat elektromekanis yang berfungsi untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik berbentuk arus bolak-balik (AC). Berbeda dengan generator DC yang menghasilkan arus searah, alternator lebih efisien dalam menghasilkan daya output pada putaran mesin yang bervariasi dan memiliki sistem pengaturan tegangan otomatis melalui regulasi arus eksitasi yang sudah terapkan pada alternator. Prinsip kerja dari alternator ketika medan magnet pada rotor berputar, garis-garis fluks magnetiknya memotong kumparan jangkar di stator. Perubahan fluks magnetik menginduksi tegangan AC pada kumparan jangkar. Frekuensi tegangan AC yang dihasilkan bergantung pada kecepatan putar rotor dan jumlah kutub medan magnet[9]. Amplitudo tegangan AC yang dihasilkan sangat bergantung pada kekuatan medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan di rotor. Alternator merupakan alat dengan 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 2.2** :

- a) Rotor : Bagian berputar yang berfungsi sebagai medan magnet.
- b) Stator : Bagian diam berisi kumparan untuk menghasilkan tegangan AC.
- c) Diode Rectifier : Komponen yang mengubah tegangan AC menjadi DC.
- d) Voltage Regulator : Mengontrol arus eksitasi agar tegangan output tetap stabil.
- e) Brush dan Slip Ring : Menghubungkan arus eksitasi ke rotor.
- f) Roller Bearing : Komponen untuk dudukan batangan atau ash berputar
- g) Pulley : Komponen penghubung mesin penggerak dan alternator
- h) Shield : Komponen untuk melindungi lilitan stator dan sebagai titik tumpu bracket



Gambar 2. 1 Alternator Mobil 12V

(Sumber : Pribadi)



Gambar 2. 2 Detail Komponen Alternator[10]

Berikut spesifikasi dari alternator dengan menggunakan data uji coba langsung pada komponen alternator :

Tabel 2. 1 Spesifikasi Alternator 12V

| Parameter | Spesifikasi |
|--------------------|-------------------|
| Model / Seri | Denso 101211-1090 |
| Tegangan Regulator | 12 VDC |
| Tegangan Eksiter | 10-15 VDC |
| Arus Eksiter | 20 A |
| Resistansi Rotor | 2,5 Ohm |
| Resistansi Stator | 0,5 Ohm |

2.1.1 Frekuensi pada Alternator

Kecepatan putaran pada alternator akan mempengaruhi hasil dari output. Rotor alternator terdiri dari rangkaian elektromagnetis dengan input DC untuk membentuk medan magnet atau biasa disebut eksitasi[11]. Kecepatan putar dari medan magnet rotor dengan frekuensi pada stator dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$f_e = \frac{Nr \cdot p}{120} \quad (2.1)$$

Keterangan :

f_e = Frekuensi listrik output (Hz)

Nr = Kecepatan putar rotor (RPM)

p = Jumlah kutub magnet pada rotor

Dari rumus bisa disimpulkan frekuensi dipengaruhi oleh kecepatan putaran rotor dan jumlah kutub magnet. Beban yang bertambah akan mempengaruhi kecepatan rotor dan perubahan tersebut secara langsung mempengaruhi hasil dari frekuensi.

2.1.2 GGL Induksi pada Alternator

Gaya gerak listrik induksi pada alternator akan terinduksi jika stator menjadi lilitan atau kumparan jangkar dan jika rotor (kumparan medan magnet) berputar di daerah stator. Pada saat fluks magnetic berubah dan melewati kumparan dari stator maka akan timbul tegangan listrik AC, tegangan tersebut dipengaruhi oleh kecepatan putar rotor, jumlah lilitan dan kuat medan mangnet yang dihasilkan oleh arus eksitasi. Berikut persmaan dari GGL induksi, tegangan RMS (Root Mean Square) per fasa diinduksikan pada stator :

$$V_{ph} = 4.44 \cdot K_d \cdot K_p \cdot f \cdot \Phi \cdot N_{ph} \quad (2.2)$$

Atau

$$V_{ph} = K \cdot \Phi \cdot \omega$$

Keterangan :

V_{ph} = Tegangan RMS per Fasa

K_d = Faktor distribusi

K = Konstanta mesin

N_r = Kecepatan rotor

K_p = Faktor pitch, jarak antara sisi kumparan terhadap EMF

f = Frekuensi, ditentukan oleh kecepatan rotor dan jumlah kutub

Φ = Fluks magnet per kutub, fluks didapat dari arus eksitasi pada kumparan rotor

ω = Kecepatan sudut (Rad/s)

$N_p h$ = Jumlah lilitan per fasa, jumlah lilitan kumparan stator per fasa

2.2 Sistem Eksitasi

Pada generator atau alternator, terdapat sistem yang perannya sangat penting, sistem ini dikenal sebagai sistem eksitasi. Fungsinya sederhana namun krusial digunakan untuk menyuplai sejumlah arus listrik DC ke lilitan kawat pada bagian rotor yang berputar dan aliran arus inilah yang membangkitkan medan magnet. Tanpa medan magnet ini, alternator hanyalah sebuah benda berputar yang tidak menghasilkan listrik. Kekuatan atau besarnya medan magnet ini bisa diatur. Semakin besar arus eksitasi yang diberikan, semakin kuat medan magnetnya, dan semakin tinggi pula tegangan yang dihasilkan di output. Pada bagian ini regulasi tegangan digunakan, saat beban listrik seperti lampu atau mesin dinyalakan, tegangan output cenderung turun. Tugas dari sistem eksitasi adalah secara cerdas menaikkan arusnya untuk melawan penurunan tersebut dan menjaga tegangan tetap stabil[12].

Sistem lama pada sistem regulasi masih menggunakan metode analog yang sulit diatur, sulit untuk diubah dan kurang fleksibel dalam merespon berbagai jenis beban yang dengan penggunaan beban modern yang bersifat *non-linier*. Hal ini menjadikan alat yang sudah menggunakan digital ini jauh lebih cerdas dan efisien. Sensor tegangan PZEM-004T dianalogikan sebagai mata yang mengawasi tegangan output. Agar tidak terpengaruh oleh gangguan listrik sesaat ataupun *noise*, data dari mata ini dihaluskan menggunakan filter digital. Data yang sudah stabil ini kemudian dikirim ke "otak" sistem, yaitu mikrokontroler ESP32. Kontrol PID bekerja pada ESP32, di mana ESP32 tidak hanya melihat seberapa besar *error*, tetapi juga belajar dari kesalahan sebelumnya dan memprediksi grafik ke depan untuk membuat keputusan. Keputusan ini kemudian dieksekusi oleh sistem, yaitu driver daya BTS7960 yang efisien, yang secara presisi mengatur aliran daya (arus

eksitasi) ke alternator. Seluruh siklus memonitoring, memproses, dan bertindak ini terjadi puluhan kali setiap detik, menciptakan sebuah sistem regulator otomatis yang responsive dan presisi[13]. Untuk mencari suatu output dari penggunaan alternator dengan eksitasi DC maka dapat menggunakan rumus berikut :

$$E_{max} = N \cdot B \cdot A \cdot \omega \quad (2.3)$$

Keterangan :

N = Jumlah lilitan kawat pada stator

A = Luas area kumparan.

B = Kerapatan fluks magnet (seberapa kuat medan magnetnya).

ω (omega) = Kecepatan sudut dalam radian per detik

Sistem eksitasi merupakan hal penting dari sistem kendali tegangan generator. Fungsi dari sistem eksitasi adalah menyuplai arus DC (I_a) ke lilitan medan di rotor untuk menciptakan fluks magnet (Φ). Besarnya Gaya Gerak Listrik (GGL) atau tegangan internal (E_f) yang dibangkitkan di dalam generator berbanding lurus dengan fluks magnet dan kecepatan putaran (ω). Tegangan yang sampai di terminal keluaran generator akan selalu lebih kecil dari tegangan internal saat generator diberi beban[14]. Hal ini disebabkan oleh adanya penurunan tegangan akibat impedansi internal stator, yaitu perlawanan medan magnet dari stator terhadap medan magnet rotor saat arus beban mengalir. Berikut rumus untuk persamaan dasar generator ataupun alternator :

$$E_f = \sqrt{V_{ph} + I_a (R_a + X_s)} \quad (2.4)$$

Keterangan :

E_f = Tegangan Eksitasi

V_{ph} = Tegangan Output

I_a = Arus output tanpa beban

R_a = Resistansi rotor

X_s = Reaktansi lilitan stator

$V_t \cos \varphi$ = Komponen tegangan terminal drop aktif

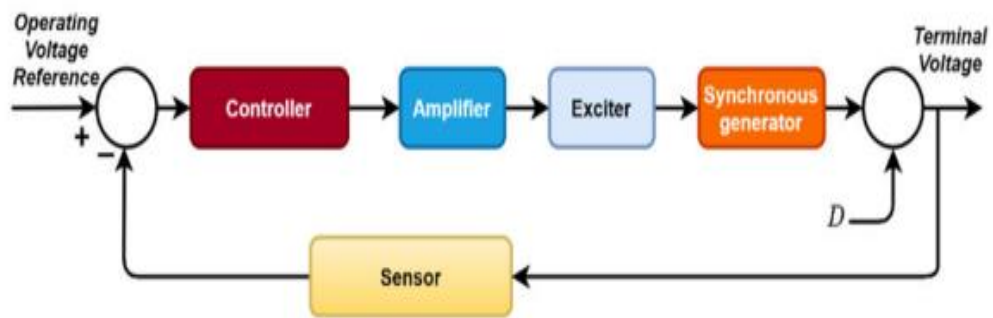
$V_t \sin \varphi$ = Komponen tegangan terminal drop reaktif

2.3 Automatic Voltage Regulator (AVR)

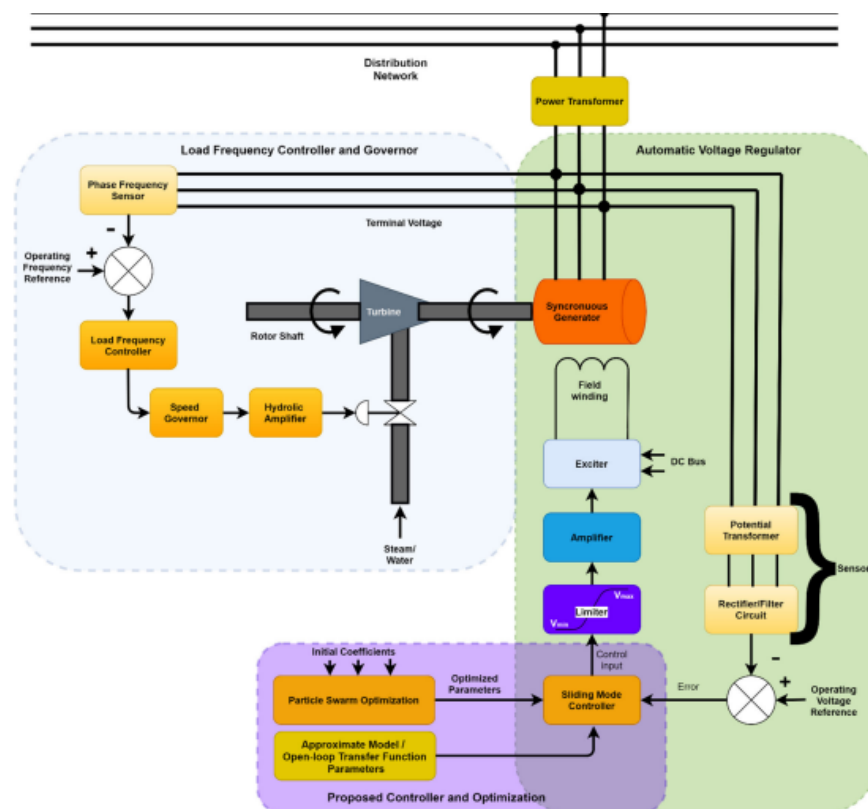
Automatic Voltage Regulator (AVR) merupakan perangkat yang berfungsi untuk menstabilkan suatu tegangan keluaran dari generator atau alternator terhadap perubahan beban ataupun perbedaan input. Cara kerja dari Automatic Voltage Regulator (AVR) ialah dengan mengatur arus eksitasi pada generator atau alternator untuk menstabilkan tegangan dalam batas sekitar ($\pm 1-5$ % dari nilai set point). Frekuensi dan tegangan diukur pada terminal dengan menggunakan pengendali frekuensi beban atau biasa disebut *Load Frequency Controller* (LFC) juga AVR pada outputnya[15]. Berikut prinsip kerja dari *Automatic Voltage Regulator*(AVR) secara singkat :

- a) Memonitoring atau mengukur tegangan keluaran pada generator atau alternator.
- b) Mengkomparasi tegangan yang diukur dengan setpoint yang ditetapkan.
- c) Dari komparasi menghasilkan sinyal *error* lalu mengatur arus eksitasi pada kumparan medan generator atau alternator.
- d) Mengubah tegangan eksitasi melalui sistem eksitasi atau eksiter untuk menyesuaikan tegangan output

Pada energi listrik yang dihasilkan dengan kebutuhan yang bervariasi menyebabkan output dari generator tidak stabil, oleh karena itu Automatic Voltage Regulator (AVR) digunakan untuk membaca *error* tegangan pada terminal dan mengoreksinya secara kontinyu[16]. Pengaruh *error* dapat menjadi parameter yang dapat dihitung untuk mendapatkan nilai *set point*, *error* dapat di ketahui jika nilai aktual atau nilai yang dibaca sensor diselisihkan dengan nilai set point yang prosesnya dapat dilihat setelah sensor membaca atau *feedback*, seperti pada **Gambar 2.3.**



Gambar 2. 3 Model Konvensional AVR[15]



Gambar 2. 4 Skematik Diagram Blok Mesin Sinkronus dengan Kontrol Eksitasi[15]

Tujuan utama dari sistem AVR ini menjaga output generator pada *setpoint* dengan menggunakan beberapa komponen penguat, eksitasi, sensor pada generator[17]. Pada Automatic Voltage Regulator (AVR) memiliki komponen seperti *voltage sensor* atau sensor tegangan yang berfungsi sebagai pengukur tegangan keluaran dari generator saat prime mover berputar. Sensor tersebut akan memonitoring keluaran dan akan di kirimkan pada rangkaian atau mikrokontroler untuk membandingkan tegangan langsung dan juga setpoint tegangan yang sudah ditetapkan. Untuk mengetahui suatu *error* atau selisih antara output terukur

dengan setpoint diperlukan *error amplifier* pada AVR, komponen tersebut memperkuat selisih antara tegangan terukur dengan *setpoint*. Pada *Automatic Voltage Regulator* (AVR) tegangan keluaran dari generator atau alternator memiliki hasil yang stabil, maka pada AVR ini biasanya menggunakan metode kontrol untuk membuat hasil yang baik dan stabil seperti menggunakan PID Controller. PID Controller berfungsi sebagai pengoptimal respon sistem dengan mengurangi *steady-state error* yang nantinya akan membuat dari output menjadi lebih stabil. Komponen utama lain dari AVR adalah sistem eksitasi dimana sistem eksitasi ini yang mengatur arus medan generator menggunakan thyristor ataupun transistor, dan sistem eksitasi memerlukan komponen penstabil untuk mencegah osilasi menggunakan *Power System Stabilizer* (PSS).

2.4 Kontrol PID

Sistem kontrol merupakan hal penting dalam planning suatu sistem, sistem kontrol ini bertujuan membuat output dapat sesuai dengan yang diinginkan. Istilah lain sistem kontrol adalah proses pengendalian terhadap suatu parameter sehingga pada suatu hasil atau *range* tertentu[18]. 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*[19]. Sedangkan sistem kontrol *close loop* atau tertutup merupakan sistem kontrol yang memiliki *feedback*, biasanya kontrol ini 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*.

Kontrol PID (Propotional-Integral-Derivative) adalah jenis kontrol umpan balik yang biasa digunakan dalam sistem di industri. Tujuan dari sistem kontrol PID ini bertujuan untuk menstabilkan arus eksitasi agar sesuai dengan nilai dari *setpoint*.

Cara kerja PID adalah dengan menghitung nilai kesalahan (*error*, $e(t)$). *Error* adalah selisih antara *setpoint* (SP) dan variabel proses yang diukur (*Process Variable*, PV) pada waktu tertentu t . Jadi, $e(t) = SP - PV(t)$. Setelah mendapatkan nilai *error* maka sistem PID akan memproses sinyal output atau sinyal kontrol $u(t)$ ke aktuator dalam penelitian ini menggunakan motor driver BTS7960. Sinyal output ini berguna untuk mengkoreksi variabel proses agar *error* menjadi lebih kecil. Koreksi ini didasarkan pada tiga buah "term" yaitu:

- a) Term Proporsional (P): Memberikan aksi kontrol berdasarkan besar error saat ini.
- b) Term Integral (I): Memberikan aksi kontrol berdasarkan akumulasi error dari waktu ke waktu.
- c) Term Derivatif (D): Memberikan aksi kontrol berdasarkan laju perubahan error.

2.4.1 Metode Ziegler Nichlos

Metode Ziegler-Nichols merupakan salah satu teknik tuning empiris yang dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols pada tahun 1942 untuk menetapkan parameter optimal pada kontroler Proportional-Integral-Derivative (PID). Metode ini terutama digunakan ketika model matematis dari sistem tidak diketahui, sehingga parameter kontroler harus ditentukan melalui eksperimen. Dalam konteks sistem kontrol arus eksitasi pada alternator, metode ini memungkinkan penyesuaian gain yang cepat dan efektif untuk mencapai respons dinamis yang diinginkan tanpa memerlukan pemodelan kompleks dari sistem alternator secara keseluruhan. Metode Ziegler-Nichols terdiri dari dua pendekatan utama:

a. Metode Kurva Reaksi

Metode ini dilakukan dengan memberikan sinyal step pada sistem dalam kondisi open-loop dan menganalisis respons transiennya. Parameter seperti delay time (L) dan time constant (τ) diekstraksi dari kurva respons berbentuk-S untuk menghitung nilai K_p , T_i , dan T_d

b. Metode Osilasi

Metode ini dilakukan dalam kondisi closed-loop dengan meningkatkan gain proporsional hingga sistem mencapai osilasi berkelanjutan. Nilai gain kritis (K_u) dan periode osilasi (T_u) yang dihasilkan digunakan untuk menurunkan parameter PID menggunakan tabel tuning yang telah ditetapkan. Kedua metode ini bertujuan untuk mencapai respons sistem dengan overshoot maksimum 25% dan penolakan gangguan yang optimal.

Dalam sistem eksitasi alternator yang menggunakan ESP32, metode Ziegler-Nichols dapat diimplementasikan untuk mengatur suplai tegangan ke brush alternator. Kelebihan utama metode Ziegler-Nichols adalah sederhana dan kemampuan untuk menghasilkan respons sistem yang agresif terhadap gangguan. Namun, keterbatasan termasuk resiko *overshoot* yang tinggi pada sistem yang sensitif dan ketidakcocokan untuk sistem dengan dinamika integratif waktu dominan. Dalam aplikasi alternator, modifikasi seperti pengurangan gain (misalnya, K_p dikurangi 20-50%) sering diperlukan untuk menghindari osilasi tidak stabil akibat noise sensor atau non-linearitas brush. Karakteristik dinamis alternator yang melibatkan non-linearitas dan waktu tunda membuat metode ini cocok untuk tuning awal. Misalnya, dengan menerapkan metode osilasi, gain proporsional dinaikkan secara bertahap hingga arus eksitasi menunjukkan osilasi stabil. Nilai K_u dan T_u yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung parameter PID menggunakan rumus standar dan dapat dilihat pada **Tabel 2.2** sebagai formula metode Ziegler-Nichols :

$$K_p = 0.6 K_u \quad (2.5)$$

$$T_i = 0.5 T_u \quad (2.6)$$

$$T_d = 0.125 T_u \quad (2.7)$$

Tabel 2. 2 Formula Metode PID Ziegler Nichlos Untuk Variabel K_p , T_i dan T_d

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

2.4.2 Kontrol Proporsional (P)

Kontrol ini memiliki output yang sama dengan *error*. Jadi pada kontrol ini semakin besar *error* maka semakin besar sinyal koreksi dan sebaliknya. Rumus persamaan dari kontrol proporsional yaitu output dari propotional.

$$up(t) = Kp \cdot e(t) \quad (2.8)$$

Dimana $up(t)$ adalah output dari kontrol proporsional, Kp adalah konstanta proporsional atau biasa disebut *Gain* yang nantinya parameter tersebut akan di tuning, dan $e(t)$ adalah *error* dalam satuan waktu t . Pengaruh dari kontrol proporsional (Kp) adalah saat menaikkan nilai dari Kp maka akan meningkatkan respon sistem terhadap errornya. Jadi pada sistem kontrol proporsional ini lebih cepat dalam mengevaluasi koreksinya. Kekurangan dari kontrol proporsional ini adalah jika terlalu besar nilai Kp maka sistem akan menjadi tidak stabil dan output yang tidak *steady* atau osilasi yang tinggi sebelum mencapai *setpoint*.

2.4.3 Kontrol Integral (I)

Kontrol Integral (I) ini berfungsi untuk menghilangkan *steady-state error* yang tidak bisa diminimalisir oleh kontrol proporsional. Cara kerja dari kontrol integral ini dengan menjumlahkan nilai *error* dari waktu ke waktu, selama masih ada *error* maka kontrol integral akan terus menstabilkan output kontroler hingga *error* menjadi nol[20]. Rumus persamaan dari kontrol integral yaitu

$$ui(t) = Ki \int_0^t e(T)dT \quad (2.9)$$

Dimana $ui(t)$ adalah output dari kontrol integral. Ki adalah konstana integral atau *Integral Gain*, parameter ini yang nanti akan di tuning. Ki bisa ditulis dengan $\frac{Kp}{Ti}$, dimana Ti sebagai *Integral Time* atau waktu reset. $\int_0^t e(T)dT$ adalah integral dari *error* terhadap waktu, dari waktu 0 hingga waktu yang ditentukan. Pengaruh dari kontrol integral Ki adalah untuk menghilangkan *steady-state error*, jika menaikkan nilai dari Ki ataupun Ti maka akan mempercepat untuk menurunkan *steady-state error*. Namun jika nilai dari Ki terlalu besar maka *overshoot* akan semakin besar atau variable proses melebihi *setpoint* sebelum *setpoint* stabil.

2.4.4 Kontrol Derivatif (D)

Kontrol Derivatif (Kd) adalah kontrol yang didasarkan perubahan *error* ($\frac{de(t)}{dt}$) dengan Tujuan untuk mengantisipasi hasil *error* kedepan. Jika *error* berubah maka kontrol derivate akan memberikan hasil koreksi yang lebih besar untuk menstabilkan output dan jika *error* berubah lebih lambat maka kontrol derivatif nya menjadi kecil[20]. Rumus persamaan dari kontrol derivative yaitu

$$u_D(t) = Kd \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.10)$$

Dimana $u_D(t)$ adalah output dari kontrol derivative, Kd adalah konstanta derivative atau *Derivative Gain*. Gain tersebut yang akan di *tuning* dan Kd bisa di cari dengan $Kp.Td$, dimana Td adalah waktu derivative. Untuk $\frac{de(t)}{dt}$ adalah turunan derivative dari *error* terhadap waktu yang menunjukkan laju perubahan *error*. Pengaruh dari kontrol derivative pada output yaitu dengan memberikan *damping* atau redaman pada respon sistem, maka *overshoot* dan waktu yang dibutuhkan hingga *steady state* atau *settling time* akan berkurang. Kontrol derivative sangat dipengaruhi oleh noise atau gangguan frekuensi tinggi. Jika sinyal *error* memiliki *noise*, maka laju perubahan noise akan semakin besar dan menyebabkan output kontroler tegangan menjadi tidak stabil.

2.4.5 Persamaan Kontrol PID Ideal

Persamaan kontrol PID yang ideal adalah gabungan antara ketiga konstanta Kp, Ki dan Kd . Sinyal keluaran kontroler $u(t)$ adalah penjumlahan dari semua *output* dari kontrol proposional, integral dan derivative $u(t) = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t)$ [21]. Maka jika disubstitusikan akan menjadi :

$$u(t) = Kp e(t) + Ki \int_0^t e(T)dT + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

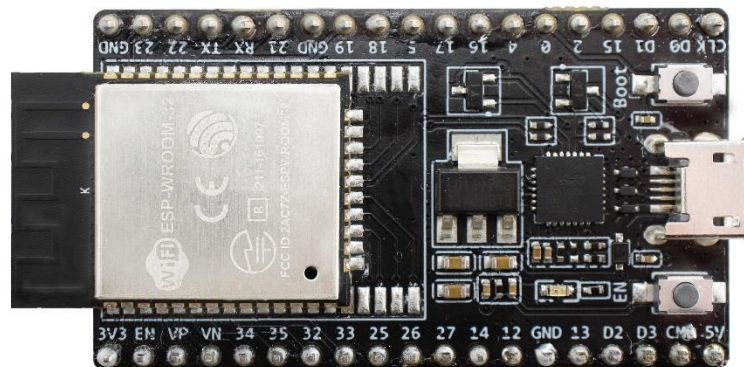
Keterangan :

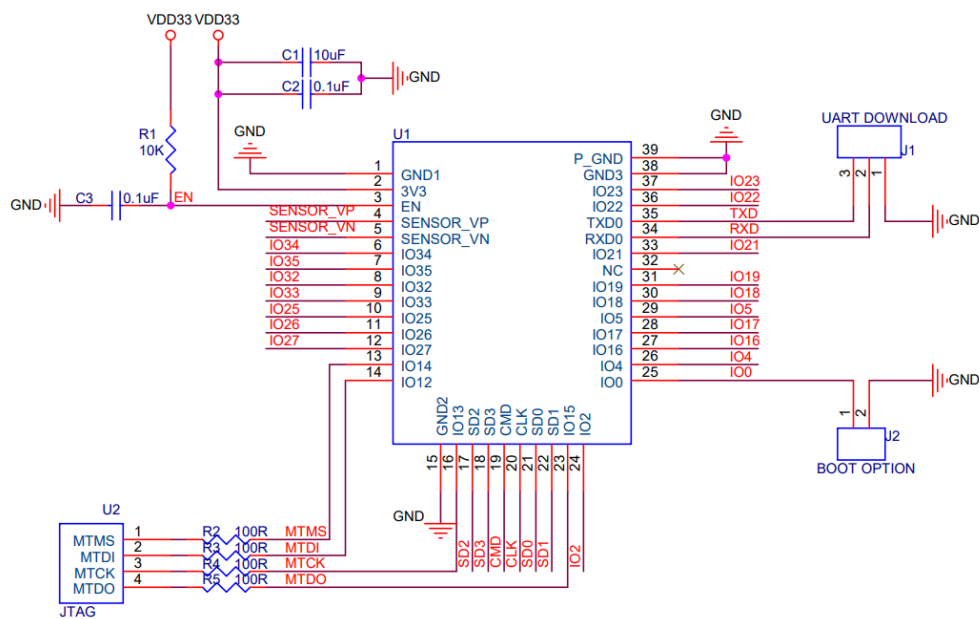
- $u(t)$: Sinyal output dari kontroler PID pada waktu t
- $e(t)$: Error pada waktu t, yaitu $SP - PV(t)$.
- Kp : Konstanta gain proposional.
- Ki : Konstanta gain integral.
- Kd : Konstanta gain derivatif.

- $\int_0^t e(T)dT$: Integral dari error (waktu 0 hingga t).
- $Kd \frac{de(t)}{dt}$: Derivatif (laju perubahan) dari error waktu t.

2.5 ESP32 DevKitC V4

Sistem Espressif mengembangkan seri ESP32 yang merupakan penerus dari modul ESP8266, dimana merupakan mikrokontroler System on a Chip (SoC) murah dan berdaya rendah. Dengan integrasi Wi-Fi (802.11 b/g/n) dan Bluetooth (Classic dan BLE v4.2) pada satu chip dan ini adalah pilihan yang ideal untuk sistem kontrol terdistribusi dan proyek Internet of Things (IoT) [22]. ESP32 dilengkapi dengan prosesor dual-core Tensilica Xtensa LX6 yang lebih baik daripada esp8266, dapat memproses data yang kompleks dan *multitasking* yang efektif, selain konektivitas nirkabel[23]. Espressif sistem menciptakan ESP32 DevKitC V4 untuk memfasilitasi pembuatan prototipe dan pengembangan aplikasi berdasarkan modul ESP32-WROOM. Papan pengembangan V4 untuk memfasilitasi pembuatan prototipe dan pengembangan aplikasi berdasarkan modul ESP32 - WROOM . Versi 38 - pin adalah salah satu yang biasa digunakan dengan akses mudah ke pin I / O terbesar pada modul ESP32 -WROOM . Beberapa beberapa karakteristik ESP32 sangat penting untuk aplikasi yang menggunakan metode PID dan Driver BTS7960 untuk mengendalikan *output* generator. GPIO (General Purpose Input/Output), pin ini dapat dikonfigurasi sebagai *input* digital (untuk memantau status) atau output (untuk mengendalikan perangkat lain). Dalam konteks ini, GPIO digunakan untuk memberikan sinyal kontrol ke Driver kontrol (BTS7960). Pin GPIO dapat dikonfigurasi untuk ADC dan PWM [24].





Gambar 2. 5 ESP32 DevKitC V4 Wroom 32 Dan Skematik[25]

ESP32 dilengkapi dengan berbagai fitur *Analog to Digital Converter* (ADC), umumnya dengan resolusi 12 bit[26] dan kelebihan yang berbeda dengan ESP32 versi V4 yaitu dengan fitur daya 5V seperti pada **Gambar 2.5**. ADC memiliki peran krusial dalam sistem kontrol ini untuk menganalisis data analog dari sensor arus yang mengukur arus generator. ADC ini berperan sebagai umpan balik untuk algoritma kontrol PID. Resolusi 12-bit mendukung berbagai aplikasi pengendalian. ESP32 juga memiliki unit pengontrol LED PWM yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan sinyal PWM di pin GPIO. Sinyal PWM sangat krusial untuk mengatur duty cycle dari elemen *switching* (seperti MOSFET) dalam DC Converter ataupun driver. Dengan mengubah siklus kerja PWM[23], tegangan keluaran dari konverter dapat disesuaikan dan dapat mengatur arus eksitasi generator. Berikut adalah lembar data spesifikasi dari ESP32 DevKitC V4 pada **Tabel 2.3**:

Tabel 2.3 Tabel Spesifikasi ESP32 WROOM

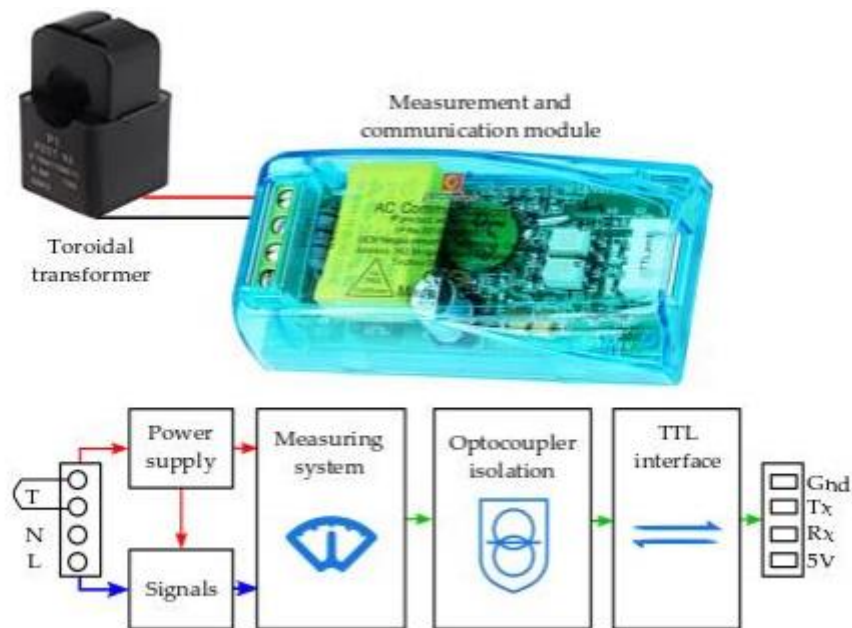
| Parameter | Data Spesifikasi |
|-----------|--|
| Prosesor | Dual-core Xtensa LX6 dengan kecepatan hingga 240 MHz |
| RAM | 520 KB SRAM internal |
| Flash | memori flash eksternal hingga 16 MB |

| Parameter | Data Spesifikasi |
|---------------------------|--|
| Wi-Fi | Mendukung 802.11 b/g/n |
| Bluetooth | Versi 4.2 dan BLE |
| Tegangan Operasional | 3.0–3.6V |
| Mode Konsumsi Daya Rendah | Mendukung mode deep sleep ($\leq 10 \mu\text{A}$) |
| Pin ADC | ADC1 (GPIO 32–39), ADC2 (GPIO 0, 2, 4, 12–15, 25–27) |
| Pin DAC | GPIO 25 (DAC1) dan GPIO 26 (DAC2). |
| PWM | Semua GPIO dapat digunakan sebagai pin PWM. |
| UART | GPIO 1 (TXD), GPIO 3 (RXD), GPIO 16, dan GPIO 17 |
| SPI | GPIO 18 (CLK), GPIO 19 (MISO), GPIO 23 (MOSI), GPIO 5 (CS) |
| I2C | GPIO 21 (SDA) dan GPIO 22 (SCL). |
| Touch Sensor | GPIO 0, 2, 4, 12–15, 27, 32–33 |
| Wi-Fi | Mendukung mode AP, STA, dan AP+STA. |
| Bluetooth | Konektivitas BLE dan Bluetooth Klasik. |

2.6 PZEM-004T 100A

PZEM-004T 100A adalah modul pengukuran listrik AC satu fase yang mengintegrasikan pembagi tegangan untuk V_{rms} dan CT eksternal 100 A untuk I_{rms} . 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. Arus beban diturunkan oleh current transformer (CT) 100 A menjadi arus sekunder yang aman; tegangan diambil oleh pembagi tegangan. 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% [27]. Pada implementasi praktis, jalur sinyal diisolasi dengan optocoupler sebelum data dikirim via TTL dan isolasi ini penting untuk keselamatan dan mengurangi gangguan ke mikrokontroler (ESP32).



Gambar 2. 6 PZEM-004T Dan Blok Komponen PZEM-004T [28]

Secara temporal, pembacaan PZEM cukup stabil namun tidak ultra-cepat dengan *sampling time* datanya 200 ms, yang pada praktiknya memberi laju update ~ 5 Hz. Kesimpulannya PZEM sangat cocok sebagai umpan balik tingkat sistem (supervisory) untuk menjaga tegangan terminal, memantau faktor daya, serta log energi/kWh, tetapi tidak terlalu rekomendasi untuk inner loop PID dengan bandwidth tinggi. Integrasi dengan ESP32-WROOM dilakukan melalui UART (HardwareSerial) dan moving average dapat diintegrasikan agar lebih robust terhadap noise beban. Pada aplikasi kontrol eksitasi menjadikan V_{out} alternator dari PZEM sebagai referensi/constraint bagi PID arus eksitasi, dan dapat melog energi untuk evaluasi performa jangka panjang. Dengan akurasi yang cukup tinggi sekitar 96% ini cukup untuk monitoring dan pengambilan keputusan operasional secara akurat dalam keputusan dengan mencari variabel *error* [29]. Sementara itu dalam beberapa kasus menunjukkan manfaat penting PZEM untuk pencatatan energi yang

tetap berjalan meski komunikasi mikrokontroler terputus dan juga error energi hanya ~0,73% dalam pemantauan secara berkelanjutan di area rumah[28].

Tabel 2. 4 Tabel Komponen PZEM-004T 100A

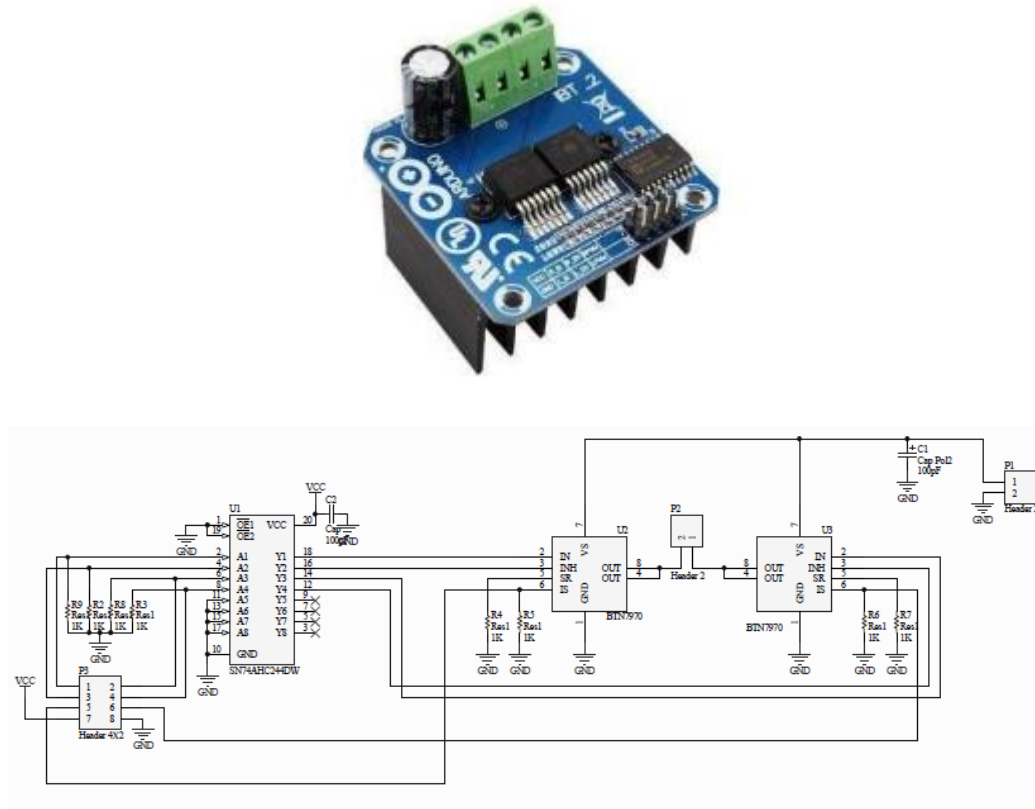
| Parameter | Nilai / Rentang | Resolusi | Akurasi |
|-----------------------|-----------------------|-----------|---------|
| Tegangan terukur (AC) | 80–260 V | 0,1 V | ±0,5% |
| Arus terukur | 0–100 A | 0,001 A | ±0,5% |
| Daya aktif | 0–23 kW | 0,1 W | ±0,5% |
| Energi aktif | 0–9999,99 kWh | 1 Wh | ±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 | 5 V DC (TTL pasif) | - | - |
| Suhu kerja | -20 °C s.d. +60 °C | - | - |

2.7 Driver BTS7960

BTS7960 merupakan half-bridge arus tinggi dengan (p-MOSFET high-side + n-MOSFET low-side + driver terintegrasi). 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). Dalam dua chip BTS7960 yang biasanya dikenal (IBT-2) membentuk H-bridge sehingga dapat mengatur besar dan arah arus beban DC[30]. Pada konteks brush alternator (beban induktif), keunggulan ini ideal sebagai aktuator yang menyalurkan energi ke kumparan medan secara aman, sambil menahan lonjakan transien berkat jalur freewheel.

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-

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 2.7**.



Gambar 2.7 Driver BTS7960 Dan Skematik Modul HW-89 [31]

Dalam rancangan ini, ESP32-WROOM menghasilkan PWM yang didapatkan dari keluaran PID (mengatur tegangan/arus eksitasi) dengan penambahan PWM agar menuju *set point*. Pin yang digunakan pada modul BTS7960 ini yaitu RPWM/LPWM, EN_R/L, VCC (3V3), dan GND (keseluruhan) [31]. Untuk loop arus eksitasi, sensor tegangan memberi umpan balik cepat ke PID. Untuk outer-loop tegangan terminal, sinyal tegangan misalnya dari sensor tegangan aktual dan tegangan referensi mengoreksi *setpoint* arus dan tegangan sehingga tegangan keluaran stabil saat beban berubah sesuai spesifikasi pada **Tabel 2.5**.

Kapasitas arus modul BTS7960 pada aplikasi *switching* daya modul motor driver BTS7960 mampu bekerja sampai dengan arus 43A dan hal tersebut sesuai dengan spesifikasi modul tersebut[31]. Peran BTS7960 sebagai penerima sinyal

PWM untuk aktuasi dengan output sistem berupa sinyal PWM akan diterima oleh driver BTS7960 untuk menggerakkan motor atau beban dengan menaikkan tegangan dan arus. Dari beberapa fitur ada hal yang harus di perhatikan bagi sistem eksitasi ialah *decoupling* yang memadai dekat suplai BTS7960, pembatas *duty & soft-start* untuk mencegah lonjakan saat start atau step perubahan beban, serta *anti-windup* pada PID untuk menghindari saturasi ketika tegangan terminal turun drastis.

Tabel 2. 5 Tabel 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 μA pada 25°C |
| Pin kendali tipikal | RPWM, LPWM, R_EN, L_EN, Vcc, GND |
| Fitur lain modul | Heatsink, freewheeling aktif, proteksi suhu/arus/tegangan |

2.8 HMI Nextion NX4832F035

Nextion adalah Human–Machine Interface (HMI) terintegrasi: layar TFT sentuh dengan prosesor & memori on-board atau terpasang langsung pada board HMI yang menjalankan objek-objek GUI (text, number, button, waveform, progress bar, dsb) sehingga beban rendering tidak membebani MCU utama. Desain UI dibuat di Software Nextion Editor berbasis GUI WYSIWYG (What You See Is What You Get) secara drag-and-drop, lalu file HMI di-flash ke modul [32]. Dalam komunikasinya ESP32 cukup mengirim atau menerima perintah pendek dengan UART. Nextion memakai UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*) dengan pin RX, TX, VCC (5 V), GND [33]. Koneksi langsung ini umum dipraktikkan pada proyek ESP32 stabil untuk tampilan status dan kendali menu

seperti pada **Gambar 2.8**, dimana penggunaan pin yang lebih sedikit dibanding menggunakan LCD TFT seri ILI.



Gambar 2. 8 LCD Nextion NX4832F035 [34]

Di konteks eksitasi, Nextion bertindak sebagai panel HMI yang menampilkan Vout alternator, If eksitasi, duty PWM BTS7960, serta memberi input setpoint. Pada display Nextion sendiri dapat dibuat menjadi beberapa page atau halaman, page “monitor waveform dan variabel” (numerik + waveform)[34]. Nextion tidak menyuplai tegangan ke brush, aktuator suplai dan switching tetap dikerjakan oleh driver BTS7960. HMI memberi visibilitas dan kontrol tanpa mengganggu loop PID dan membantu untuk menampilkan data dan grafik secara realtime. Dalam konteks sistem kontrol, HMI seperti Nextion menjembatani interaksi antara operator (manusia) dengan proses yang dikendalikan oleh mesin (alternator). Untuk keandalan pin ground dibuat menambung satu sama lain pada GND komponen lainnya, panjang kabel UART pendek, baud 9600, dan isolasi. Contoh nyata penggunaan UART Nextion di kampus juga menegaskan pola RX dan TX + 5 V yang sederhana dan efektif.

Tabel 2. 6 Spesifikasi LCD Nextion NX4832F035

| Parameter | Spesifikasi |
|-------------------------------------|---|
| Model / Seri | NX4832F035 / Discovery |
| Ukuran Layar | 3,5" TFT LCD |
| Resolusi | 480 × 320 piksel (<i>dapat diset 320 × 480</i>) |
| Area Aktif (A.A.) | 73,44 mm × 48,96 mm |
| Dimensi Papan (Layout/Outside size) | 100,5 mm × 54,94 mm × 5,55 mm (tebal) |

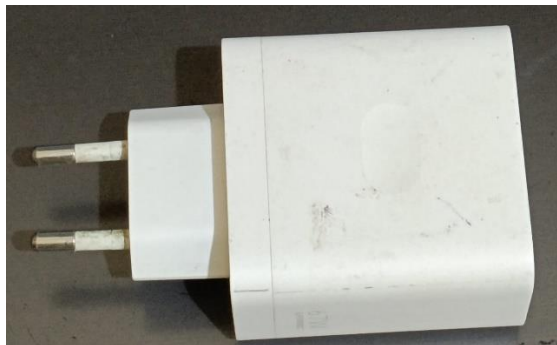
| Parameter | Spesifikasi |
|------------------------|---|
| MCU On-board | STM32G0 ARM® Cortex-M0+ @ 64 MHz |
| Memori Flash | 16 MB |
| SRAM | 3.584 byte |
| Instruction Buffer | 1.024 byte |
| Warna Tampilan | 65K (65.536 warna) |
| Jenis Sentuh | Resistive (RTP), daya tahan sentuh > 1 juta kali |
| Kecerahan | ~300 nit |
| Tegangan Suplai | 4,5–6,0 V DC (rekomendasi 5 V, saran catu 500 mA) |
| Arus Operasi (tipikal) | ~105 mA (brightness maksimum); mode <i>sleep</i> ~4,5 mA |

Nextion HMI berkomunikasi ke mikrokontroler via UART (TX/RX), sehingga alur dasarnya sederhana seperti berikut:

- a) User menekan *manual button keypad* numerik di layar HMI.
- b) Nextion menyusun *buffer* teks (mis. “220” untuk *setpoint* atau “120” untuk PWM).
- c) Pada saat tombol INPUT ditekan, Nextion mengirim *string* ASCII melalui UART (contoh: SP=220 atau PWM=120 diakhiri terminator 0xFF 0xFF 0xFF).
- d) Mikrokontroler membaca *string* yang terkirim, mem-parse kata kunci dan nilai, lalu memperbarui variabel *setpoint* atau manual PWM. Keunggulan dengan metode ini ialah beban GUI yang dibebankan di panel Nextion menjadi ringan, *wiring* minim dengan menggunakan 5V, GND, TX, RX. An dengan cara ini dapat menjadi mudah diperluas untuk tombol/halaman baru tanpa mengubah protokol dasar. Implementasi HMI-UART berbasis Nextion dengan pola serupa, keyboard atau masukan numerik lalu dikirim data ke mikrokontroler dan akan menghasilkan aksi kontrol kendali.

2.9 Adaptor Supply 5V 2A

Adaptor supply 5V 2A merupakan modul catu daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan AC 220 VAC menjadi tegangan Direct Current (DC) sebesar 5 Volt dengan arus maksimum 2 Ampere. Perangkat ini termasuk dalam kategori Switched-Mode Power Supply (SMPS) yang menggunakan teknologi switching frekuensi tinggi untuk konversi daya yang optimal, efisiensi modul ini berada pada rentang 80-85% [35]. Secara struktural, adaptor 5V 2A terdiri dari beberapa bagian utama yaitu bridge rectifier yang berfungsi menyearahkan tegangan AC input, kapasitor input sebagai filter awal, transistor switching (biasanya MOSFET) 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. Desain ini memungkinkan adaptor menghasilkan tegangan output yang stabil meskipun terjadi fluktuasi pada tegangan input maupun variasi beban.



Gambar 2. 9 Adaptor Supply 5V 2A

(Sumber : Pribadi)

Karakteristik dari adaptor 5V 2A yaitu regulasi tegangan (voltage regulation) $\leq \pm 5\%$, ripple and noise ≤ 100 mVp-p, dan respons transien yang cepat terhadap perubahan beban. Proteksi yang umum terintegrasi seperti over-current protection (OCP), short-circuit protection (SCP), dan over-voltage protection (OVP), yang membantu operasional lebih baik untuk adaptor sendiri maupun perangkat yang disuplai. Berbeda dengan modul LM2596 yang merupakan non-isolated buck converter dan rentan terhadap noise dari sumber daya upstream, adaptor 5V 2A menyediakan isolasi galvanic seperti pada **Gambar 2.9** penuh yang efektif mencegah transfer noise dari SMPS 12V ke subsistem digital. Hal ini terbukti

mengatasi masalah HMI Nextion yang tidak dapat menampilkan data ketika menggunakan LM2596, meskipun dari sisi efisiensi konversi LM2596 memiliki nilai yang lebih tinggi ($\pm 90\%$). Untuk spesifikasi singkat dari modul adaptor ini dapat dilihat pada **Tabel 2.7** :

Tabel 2.7 Spesifikasi Modul SUpilai 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 |
| Proteksi | Short-circuit dan over-current protection |

2.10 SMPS 12V 5A



Gambar 2. 10 SMPS 12V 5A

(Sumber : Pribadi)

SMPS (Switched-Mode Power Supply) merupakan komponen catu daya yang dapat mengubah tegangan listrik menggunakan metode *switching* frekuensi tinggi untuk menghasilkan output yang stabil. Fungsi dari SMPS ini untuk memberikan

daya input sumber DC pada BTS7960 sebesar 12V sesuai dengan kebutuhan sistem eksitasi. Cara kerja SMPS yaitu dengan mengkonversi tegangan AC menjadi DC menggunakan dioda bridge. Hasilnya di *chopping* / potong ataupun di filter menggunakan kapasitor dan mentransformasikan menggunakan saklar yaitu transistor (MOSFET/IGBT) [36]. Hasil dari tegangan yang keluar akan memiliki frekuensi yang tinggi karena proses switchingnya. Pada SMPS memiliki 5 pin yang terdiri dari input AC L, N dan GND dan dari output ada V- dan V+ seperti pada **Gambar 2.10. Switching Power Supply** bisa disebut catu daya mode saklar atau SMPS merupakan catu daya yang memiliki kontrol sesuai dengan permintaan tegangan keluaran. Converter daya mengirimkan daya tanpa kehilangan daya sumber ke beban ideal[37]. Fungsi utama converter ialah untuk mendapatkan output yang lebih besar atau kecil dari tegangan inputnya. Berikut fungsi fungsi utama dari komponen SMPS:

2.10.1 Komponen Utama SMPS

Pada SMPS memiliki banyak komponen utama untuk menjadikan tegangan bolak balik menjadi tegangan searah dan penstabilan pada saat pengaturan tegangan. Berikut komponen utama dari SMPS :

a) Rectifier Dioda

Rectifier dioda merupakan komponen yang berfungsi mengubah arus bolak balik (AC) sumber menjadi arus searah (DC). Proses ini bekerja dengan sifat dari dioda yang hanya mengalirkan arus dalam satu arah. Dari proses tersebut maka gelombang bolak balik dipotong menjadi *Half Wave* ataupun *Full Wave* dalam siklusnya.

b) Kapasitor Input/Output

Kapasitor input pada SMPS berfungsi sebagai filter pada tegangan yang dihasilkan rectifier. Pada bagian output kapasitor berfungsi sebagai filter bagi keluaran agar mengurangi riak atau *ripple*.

c) Transistor Saklar (MOSFET/IGBT)

Transistor saklar yang merupakan fungsi dari MOSFET / IGBT bisa digunakan untuk memotong tegangan DC untuk mengubah frekuensi menjadi lebih tinggi. MOSFET memiliki kelebihan kecepatan switching tinggi dan rugi rugi konduksi yang lebih rendah. Pada kinerja MOSFET yang memiliki switching

yang sangat cepata maka dibutuhkan pendingin pasif agar lebih handal dalam prosesnya[38].

d) Transformator Ferit

Fungsi transformator adalah untuk mengatur tegangan DC yang telah *switching*. Ferit ditentukan oleh sifat magnetiknya, stabil pada frekuensi tinggi dan kehilangan energi minimal karena histeresis. Desain transformator ini harus memperhitungkan jumlah lilitan yang dibutuhkan untuk mendeteksi saturasi.

e) Induktor dan Kapasitor Filter

Induktor dan kapasitor pada SMPS merupakan satu rangkaian yang biasa disebut LC filter yang berguna untuk mengurangi noise frekuensi tinggi dari output transformator. Induktor merupakan lilitan yang berfungsi untuk menyimpan energi dalam medan magnet dan mengubah besaran arus. Kapasitor merupakan komponen yang berfungsi untuk menyimpan muatan listrik dan untuk meratakan (filter) tegangan[39]. Kedua antara induktansi dan kapasitansi dengan frekuensi *switching*nya.

f) IC PWM

Tujuan dari IC PWM (Pulse Width Modulation) adalah untuk mengendalikan siklus duty cycle transistor. Dalam prinsip kerjanya IC ini menggunakan umpan balik (feedback) output untuk memastikan bahwa tegangan stabil pada 110V dan pada saat terjadi beban atau fluktuasi input. Contoh IC yang biasa digunakan untuk membuat SMPS adalah TL494 dan SG3525.

2.11 Transformator Non CT 5A

Transformator (trafo) adalah komponen elektronika yang krusial dalam sistem tenaga listrik dengan fungsi utamanya untuk mengubah level tegangan AC tanpa mengubah frekuensinya. Prinsip kerja dasar dari transformator mengacu pada hukum induksi elektromagnetik Faraday, bahwa perubahan fluks magnetik pada suatu kumparan akan menginduksikan gaya gerak listrik (GGL) atau tegangan pada kumparan yang berada di dekatnya[40]. Sebuah trafo terdiri dari dua lilitan kawat yang terisolasi, yaitu lilitan primer (input) dan lilitan sekunder (output), keduanya dililitkan pada sebuah inti besi (core). Ketika lilitan primer dihubungkan ke sumber tegangan AC, arus bolak-balik akan mengalir dan menciptakan fluks magnetik yang

berubah-ubah pada inti besi. Fluks magnetik langsung menginduksi tegangan AC pada lilitan sekunder, sehingga terjadi transfer daya dari sisi primer ke sekunder secara magnetis[41]. Berikut **Gambar 2.11** Yang merupakan Trafo Non-CT 5A :



Gambar 2. 11 Transformator Non-CT 5A

(Sumber : Pribadi)

Transformator Non-CT (Non-Center Tapped) adalah jenis trafo yang lilitan sekundernya hanya memiliki dua ujung terminal keluaran, sehingga hanya menghasilkan satu nilai tegangan AC. Hal ini berbeda dengan trafo jenis CT yang memiliki sadapan tengah pada lilitan sekundernya, sehingga menghasilkan dua tegangan yang berlawanan fasa dengan satu terminal bersama (ground) [42]. Karakteristik trafo Non-CT membuatnya sangat ideal untuk digunakan dalam rangkaian penyearah gelombang penuh (full-wave rectifier) yang menggunakan konfigurasi jembatan dioda (diode bridge). Dalam konfigurasi ini, kedua terminal output dari trafo Non-CT dihubungkan ke input jembatan dioda untuk mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC, yang kemudian dapat diratakan lebih lanjut oleh kapasitor filter.

Spesifikasi 5A pada sebuah trafo merujuk pada arus maksimum yang dapat dialirkan secara kontinu oleh lilitan sekunder tanpa menyebabkan panas berlebih (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:

$$P = V_s \times I_s = 12 \times 5 = 60 \text{ VA} \quad (2.12)$$

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

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.13)$$

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 implementasinya, trafo Non-CT 5A menjadi komponen fundamental dalam pembuatan berbagai perangkat catu daya linier, pengisi daya (charger) aki, hingga sumber tenaga untuk perangkat audio yang membutuhkan arus cukup besar. Fungsinya adalah sebagai "penurun tegangan" (step-down transformer) yang mengubah tegangan jala-jala listrik PLN (misalnya 220V AC) menjadi tegangan AC yang lebih rendah dan aman (misalnya 12V, 18V, atau 24V AC). Setelah tegangan diturunkan, barulah tegangan tersebut diproses lebih lanjut oleh rangkaian penyearah, filter, dan regulator untuk menghasilkan tegangan DC yang stabil dan bersih. Kemampuannya menyediakan arus hingga 5A membuatnya cocok untuk aplikasi yang menuntut daya menengah, seperti menyuplai daya untuk amplifier kecil, rangkaian mikrokontroler dengan banyak periferal, atau proyek elektronika lainnya yang membutuhkan pasokan arus yang andal.

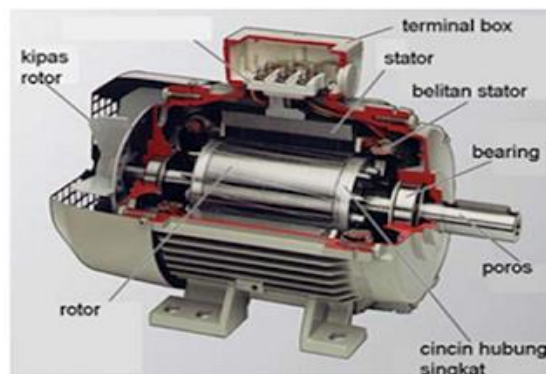
2.12 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi 3 fasa adalah jenis motor listrik arus bolak blaik (AC) yang biasa digunakan di lingkup industri karena kontruksi yang sederhana, kuat dan perawatan yang mudah. Dalam penelitian ini motor induksi digunakan sebagai penggerak atau *prime mover*. Prinsip kerja dari motor induksi ialah pada induksi elektromagnetik antara medan magnet putar yang dihasilkan stator dan arus listrik yang terinduksi pada rotor yang membuat berputar. Ketika kumparan stator 3 fasa dihubungkan dengan sumber, arus 3 fasa mengalir pada kumparan stator. Arus tersebut menghasilkan medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron. Kecepatan sinkron ditentukan oleh frekuensi sumber (f) dan jumlah kutub motor (P), dimana rumus mencari kecepatan sinkron menjadi :

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \text{ (RPM)} \quad (2.14)$$

Medan magnet yang berputar pada stator memotong batang konduktor pada rotor, belitan pada stator dapat dilihat pada **Gambar 2.12**. Dalam hukum Faraday, perpotongan medan magnet berputar menginduksi GGL dan menyebabkan arus mengalir pada batang konduktor rotor yang terhubung. Arus yang mengalir pada rotor menghasilkan medan magnet rotor. Hubungan antara medan magnet putar stator dan medan magnet rotor menghasilkan gaya Lorentz yang menghasilkan torsi putar pada rotor. Arah putar pada rotor mengikuti arah putaran medan magnet stator [43]. Pada setiap motor induksi yanb berputar memiliki slip (s) atau perbedaan antara kecepatan medan putar stator (N_s) dan kecepatan putar rotor (N_r), nilai *slip* tidak boleh besar dan biasanya di angka 1-5%. Untuk mencari nilai dari slip yaitu :

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad (2.15)$$



Gambar 2. 12 Motor Induksi 3 Fasa [44]

2.13 Pulley dan V belt

Pulley dan V Belt adalah suatu komponen mekanik yang menggunakan gesekan sebagai daya tarik putar belt terhadap pulley[45]. Pulley dan belt harus memiliki ukuran yang sama untuk dapat berfungsi dengan baik dalam rasio 1:1 dengan kecepatan motor penggerak. 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 bertujuan untuk agar saat pulley berputar maka tidak ada slip yang dapat dilihat pada **Gambar 2.13**. Penggunaan penggerak rotor ini memiliki kehandalan tersendiri dan lebih mudah dalam pengaplikasian dibandingkan menggunakan sistem coupling antara as rotor motor induksi dengan as rotor dari alternator atau generator[45].



Gambar 2. 13 V Belt

(Sumber : Pribadi)

Jadi pada penelitian ini prime mover yang merupakan motor induksi akan berputar dan memutar pulley yang dibagian motor induksi dan setelah itu belt akan mentransmisikan gaya putar ke pulley dari alternator dengna perbandingan putaran pulley prime mover dan alternator 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 :

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (2.16)$$

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:

$$V = \frac{(\pi \cdot D \cdot n)}{60 \cdot 1000} \quad (2.17)$$

Keterangan :

V = Kecepatan keliling belt (m/s)

D = Diameter pulley (mm)

n = Putaran motor (rpm)

Persamaan kecepatan keliling belt digunakan untuk menghitung seberapa cepat belt bergerak pada sistem transmisi pulley dan belt. Kecepatan keliling ini sangat berpengaruh terhadap efisiensi perpindahan daya dan kestabilan sistem. Semakin besar diameter pulley atau semakin tinggi putaran (rpm) motor, maka kecepatan gerak belt juga akan meningkat. Perhitungan ini mengasumsikan bahwa tidak ada slip antara pulley dan belt, sehingga kecepatan linier belt dapat dianggap sama dengan kecepatan keliling permukaan pulley. Persamaan ini menjadi dasar merancang sistem transmisi V-belt agar belt tidak mengalami over-speeding atau slip berlebih yang dapat menyebabkan keausan dini[46].



Gambar 2. 14 Pulley Diameter 3 Inch

(Sumber : Pribadi)

2.14 Output Beban

Dalam sistem tenaga listrik, pembebanan pada sebuah sumber daya seperti transformator secara fundamental akan menentukan karakteristik output tegangan dan arus. Karakteristik beban ini sangat dipengaruhi oleh sifat komponen pasif utamanya, yaitu resistansi (R), induktansi (L), dan kapasitansi (C). Untuk analisis pada laporan ini, fokus diberikan pada dua jenis beban yang paling umum: beban resistif murni dan beban yang bersifat induktif. Perbedaan mendasar antara kedua beban ini terletak pada faktor daya (power factor), yaitu sebuah nilai yang merepresentasikan seberapa efisien daya listrik dimanfaatkan oleh beban. Faktor daya didefinisikan sebagai kosinus dari sudut fasa (ϕ) antara gelombang tegangan dan gelombang arus[47]. Memahami sifat beban ini krusial karena ia secara langsung memengaruhi daya total yang harus disuplai oleh transformator dan stabilitas tegangan outputnya.

Beban resistif murni adalah jenis beban yang hanya terdiri dari elemen hambatan (resistance), seperti lampu bohlam pijar atau elemen pemanas. Sifat utama dari beban ini adalah gelombang arusnya yang mengalir sefasa dengan gelombang tegangannya [48]. Ini berarti puncak dan lembah dari kedua gelombang terjadi pada waktu yang bersamaan, sehingga sudut fasa antara keduanya (ϕ) adalah 0° . Akibatnya, faktor daya ($\cos \phi$) pada beban resistif bernilai 1 (unity), yang merupakan kondisi paling ideal. Dalam kondisi ini, seluruh daya yang ditarik dari sumber adalah daya aktif (Real Power, P), yaitu daya yang benar-benar diubah menjadi bentuk energi lain seperti panas atau cahaya. Daya ini dihitung dengan rumus sederhana:

$$P = V \times I \quad (2.18)$$

Beban induktif adalah beban yang mengandung komponen lilitan/kumparan (induktor), seperti motor listrik, solenoida, dan bahkan transformator itu sendiri. Sifat dasar induktor adalah menentang perubahan arus yang melaluinya dengan menciptakan medan magnet. Efek ini menyebabkan gelombang arus tertinggal (lagging) dari gelombang tegangannya, sehingga menciptakan sudut fasa (ϕ) antara 0° dan 90° . Akibatnya, faktor daya pada beban induktif selalu kurang dari 1 (misalnya 0,8 lagging). Beban induktif mengonsumsi dua jenis daya:

a) Daya Aktif (P – Watt)

Sama seperti pada beban resistif, ini adalah daya yang melakukan kerja nyata. Dalam sistem satu fasa daya aktif dapat dicari dengan rumus berikut:

$$P = V_{LN} \times I_{LN} \cos \varphi \quad (2.19)$$

b) Daya Semu (S – VA)

Secara matematis, nilai daya semu dalam suatu sistem kelistrikan dapat dihitung dengan mengalikan tegangan efektif (V) dengan arus efektif (I). Berikut persamaan dari daya semu :

$$S = V_{LN} \times I_{LN} \quad (2.20)$$

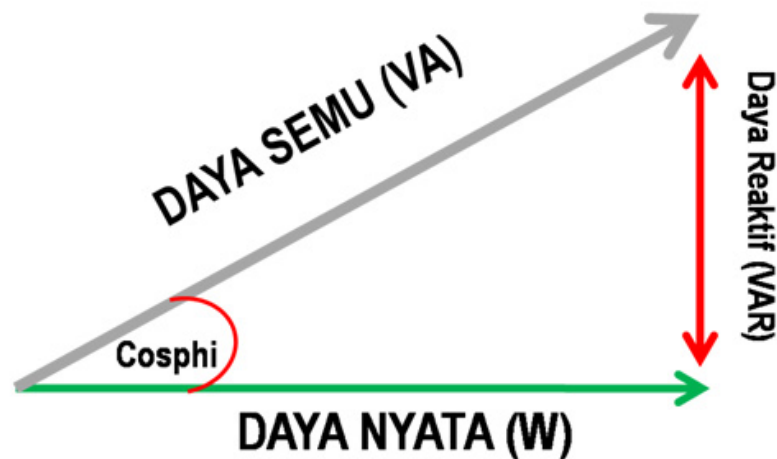
c) Daya Reaktif (Q – VAR)

Ini adalah daya yang "terbuang" namun diperlukan untuk membangkitkan dan mempertahankan medan magnet pada kumparan. Daya ini tidak melakukan kerja, tetapi tetap membebani sumber. Persamaan dari daya reaktif dapat dicari dengan rumus berikut :

$$Q = V_{LN} \times I_{LN} \sin \varphi \quad (2.21)$$

d) Segitiga Daya

Hubungan matematis antara daya semu, daya aktif, dan daya reaktif dapat digambarkan dalam sebuah model segitiga yang perhitungannya didasarkan pada prinsip trigonometri.



Gambar 2. 15 Segitiga Daya [49]

2.15 Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) adalah sebuah software cross-platform yang digunakan untuk proses pemrograman mikrokontroler. Meskipun awalnya dibuat untuk papan Arduino, software ini berkembang untuk mendukung berbagai jenis papan mikrokontroler lain, termasuk seri ESP32 melalui penambahan board manager. Arduino IDE dapat menggabungkan editor teks sederhana dengan kemampuan kompilasi dan pengunggahan kode dalam satu klik, sehingga secara signifikan menurunkan kesulitan bagi para pemula maupun peneliti untuk memulai proyek. Pengguna bahasa yang digunakan Arduino IDE yaitu dengan bahasa C++ yang telah disederhanakan dengan struktur dan library khas Arduino. Editor kodenya menyediakan fitur dasar seperti penyorotan sintaks (syntax high lighting) untuk memudahkan penulisan. Ketika pengguna mengklik tombol "Upload", IDE secara otomatis memanggil kompiler di latar belakang (seperti xtensa-esp32-elf-gcc untuk ESP32) untuk mengubah kode C++ yang dapat dibaca manusia menjadi kode mesin biner yang dapat dieksekusi oleh mikrokontroler. Setelah kompilasi berhasil, uploader akan mengirimkan file biner tersebut ke papan mikrokontroler melalui koneksi serial USB[50]. Selain itu, Library Manager adalah fitur yang memungkinkan pengguna untuk menginstal dan menggunakan ribuan pustaka kode yang sudah jadi untuk berbagai sensor, modul, dan protokol komunikasi, yang sangat mempercepat proses pengembangan[51]. Berikut logo dari software Arduino IDE yang dapat dilihat pada **Gambar 2.16**



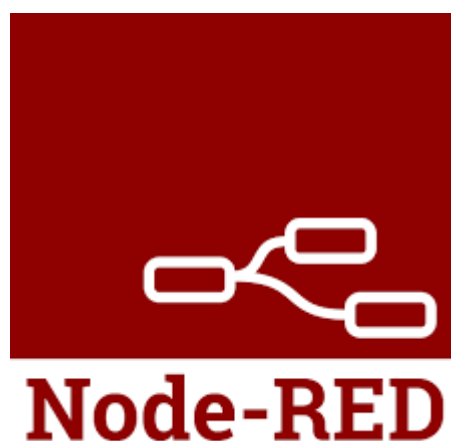
Gambar 2. 16 Software Arduino IDE

(Sumber : Pribadi)

Pada penelitian ini, Arduino IDE digunakan untuk penelitian memungkinkan fokus lebih pada pengembangan logika kontrol PID dan integrasi sistem. Fitur Serial Monitor dan Serial Plotter menjadi alat diagnostik yang tak ternilai selama proses tuning dan pengujian. Serial Plotter sangat berguna dalam memvisualisasikan respon sistem secara real-time, seperti saat melakukan tuning PID dengan metode Ziegler-Nichols atau saat menganalisis voltage dip pada uji beban. Dukungan komunitas yang banyak dan ketersediaan library menjadikan Arduino IDE platform yang ideal untuk prototipe cepat dan pengembangan proyek akademis.

2.16 Node-Red

Node-RED adalah platform pemrograman visual berbasis flow yang dikembangkan oleh IBM untuk menghubungkan perangkat keras, API, dan layanan online dalam integrasi Internet of Things (IoT). Platform ini menggunakan model "node" yang merepresentasikan fungsi seperti input, output dan pemrosesan dan dihubungkan secara grafis untuk membentuk aliran data[52]. Dalam konteks sistem kontrol arus eksitasi alternator, Node-RED berfungsi sebagai otak pemrosesan data yang menerima informasi dari sensor arus atau tegangan melalui ESP32, memprosesnya dengan algoritma PID, dan mengirimkan sinyal kontrol ke driver BTS7960 untuk mengatur suplai tegangan ke brush alternator. Berikut logo dari software Node-Red sebagai *dashboard* IoT sistem pada **Gambar 2.17**.



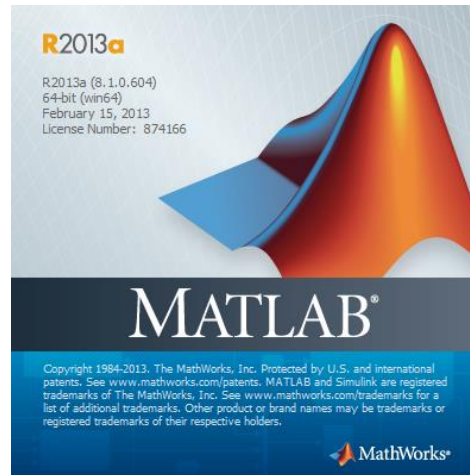
Gambar 2. 17 Logo Node-Red

Node-RED dijalankan pada komputer atau server yang berkomunikasi dengan ESP32 WROOM melalui protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) atau Serial Communication. ESP32 bertindak sebagai Remote Terminal Unit (RTU) yang mengumpulkan data sensor dan menjalankan perintah kontrol dari Node-RED. Keunggulan integrasi ini yaitu Node-RED dapat menangani pemrosesan data kompleks (seperti kalkulasi PID), sementara ESP32 fokus pada akuisisi data dan eksekusi kontrol waktu nyata.

Dalam rancangan, Node-RED tidak menyuplai tegangan ke brush alternator. Tugas suplai dan pengaturan arus eksitasi dilakukan oleh aktuator daya (mis. BTS7960) yang menerima PWM dari ESP32 hasil keluaran PID. Node-RED berperan sebagai panel operator dengan menampilkan tegangan terminal (V), arus eksitasi (If), daya, PF, serta memberi display variabel setpoint, atau dapat mentuning Kp-Ki-Kd secara aman (dengan validasi nilai) dengan topic perintah[53].

2.17 MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) adalah lingkungan komputasi numerik dan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh MathWorks, dirancang khusus untuk memudahkan penyelesaian masalah matematis, analisis data, dan pengembangan algoritma. Awalnya diciptakan pada akhir 1970-an oleh Cleve Moler, seorang profesor di University of New Mexico, untuk memberikan akses mudah ke rutinitas matriks (LINPACK dan EISPACK). Salah satu keunggulan MATLAB adalah dapat melakukan analisis matematis dan grafik secara interaktif melalui Command Window dan Editor. Pengguna dapat menulis skrip . Untuk mengotomatisasi analisis data, simulasi, atau komputasi numerik. *Toolbox* pendukung seperti *Signal Processing Toolbox* sangat membantu untuk analisis sinyal, pemrosesan citra, dan pembelajaran mesin, di mana setiap *toolbox* menyediakan fungsi khusus untuk memperdalam dan memperluas analisis . Hal ini membuat MATLAB berbeda karena dapat langsung menghasilkan visualisasi dan hasil analisis melalui fungsi-fungsi built-in maupun GUI yang interaktif. Berikut logo dari software pengujian MATLAB 2013 pada **Gambar 2.18** :



Gambar 2. 18 Software MATLAB 2013

(Sumber : Pribadi)

Keunggulan utama MATLAB adalah kemudahan penggunaan, lingkungan yang ramah, dan ekosistem *toolbox* lengkap untuk berbagai aplikasi teknis. Visualisasi hasil juga bisa dilakukan dengan cepat dan perhitungan numerik yang lebih akurat[54]. Namun, biaya lisensi yang relatif tinggi menjadi hambatan bagi sebagian institusi dan pengguna individu. MATLAB ialah suatu platform pemrograman untuk mencari nilai matematis yang rumit dan untuk mensimulasikan sistem yang ingin dibuat dan dijalankan. Program ini dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kecepatan, dan keakuratan perhitungan dalam pembuatan aljabar linier sehingga waktu yang diperlukan untuk mengerjakan lebih efisien dan hasil yang diperoleh lebih akurat dibandingkan dengan perhitungan yang dilakukan secara manual[55].

2.18Nextion Editor

Nextion Editor adalah lingkungan pengembangan terintegrasi atau Integrated Development Environment (IDE) resmi yang digunakan khusus untuk memprogram dan mendesain antarmuka pengguna grafis (GUI) pada semua seri layar HMI Nextion. Perangkat lunak ini berjalan di sistem operasi Windows dan menyediakan pendekatan What You See Is What You Get (WYSIWYG). Artinya, apa yang dirancang di layar editor seperti tata letak tombol, teks, gambar, dan gauge akan sama persis dengan apa yang tampil di layar fisik HMI Nextion. Ini memungkinkan pengembang untuk fokus pada aspek visual dan fungsionalitas antarmuka tanpa perlu menulis kode grafis yang kompleks dari nol. Terdapat

canvas atau area desain utama tempat komponen visual diletakkan. Di sisi lain, tersedia *toolbox* yang berisi berbagai komponen siap pakai (*pre-built components*) seperti:

- a) **Tombol (Button):** Untuk memicu aksi atau perintah.
- b) **Teks (Text):** Untuk menampilkan data statis atau dinamis (misalnya, nilai arus).
- c) **Angka (Number):** Khusus untuk menampilkan data numerik.
- d) **Gauge & Waveform:** Untuk visualisasi data analog seperti grafik atau meteran jarum.
- e) **Slider:** Untuk input pengguna yang bersifat variabel (misalnya, mengatur *setpoint* PID).



Gambar 2. 19 Logo Nextion Editor

Proses pengembangan antarmuka menggunakan Nextion Editor mengikuti alur kerja yang sistematis, memisahkan tugas desain GUI dari logika kontrol utama di mikrokontroler.

a) **Desain & Konfigurasi**

Pengguna merancang seluruh halaman antarmuka di dalam editor, menambahkan komponen, dan mengatur propertinya. Pada tahap ini, setiap komponen interaktif diberi nama atau ID yang nantinya akan digunakan oleh ESP32 untuk berkomunikasi.

b) **Kompilasi**

Setelah desain selesai, proyek "dikompilasi" (compile) untuk memeriksa kesalahan. Jika berhasil, editor akan menghasilkan sebuah file dengan ekstensi .tft. File ini berisi semua aset grafis dan logika antarmuka yang siap diunggah.

c) **Unggah (Upload)**

File .tft kemudian diunggah ke memori Flash internal layar HMI Nextion. Proses ini bisa dilakukan menggunakan adaptor USB-to-serial atau melalui kartu microSD.

d) **Integrasi dengan Mikrokontroler**

Setelah file .tft berada di layar Nextion, tugas ESP32 menjadi sangat sederhana. ESP32 hanya perlu mengirim perintah serial dalam format teks untuk memperbarui nilai komponen (misalnya, "n0.val=25") atau mendengarkan perintah balasan dari layar saat pengguna menyentuh tombol.