

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi di dunia industri saat ini berjalan sangat cepat, terutama penggunaan mesin-mesin otomatis yang membantu mempercepat proses produksi (Prasetyo & Sutopo, 2018). Kemajuan teknologi berdampak langsung pada pertumbuhan industri di tanah air yang semakin meningkat. Hal ini terbukti dari data terbaru Badan Pusat Statistik (BPS) pada Triwulan III-2025, di mana sektor industri pengolahan menjadi penyumbang terbesar bagi ekonomi Indonesia, yaitu sebesar 19,15%, dengan pertumbuhan mencapai 5,26% dibandingkan tahun sebelumnya (BPS, 2025). Semakin banyaknya kegiatan produksi tentu menyebabkan kebutuhan listrik di pabrik-pabrik ikut melonjak. Sebagian besar listrik tersebut, yakni sekitar 70%, ternyata habis digunakan hanya untuk menggerakkan motor-motor listrik (Kulterer et al., 2022). Oleh karena itu, diperlukan cara yang tepat untuk mengatur kinerja motor tersebut agar energi yang dipakai lebih efisien dan hasil produksinya tetap maksimal.

Motor listrik yang banyak digunakan dalam dunia industri adalah motor induksi tiga fasa. Mengacu pada penelitian Diantoro et al. (2024), motor induksi tiga fasa banyak diaplikasikan untuk menggerakkan mesin vital seperti *blower*, kompresor, pompa, dan lain sebagainya karena keunggulannya dalam hal konstruksi yang kuat, desain sederhana, serta perawatan yang mudah. Meskipun demikian, motor induksi memiliki keterbatasan teknis, yaitu karakteristik kecepatannya yang bersifat linear atau konstan saat terhubung langsung ke sumber listrik yang pada umumnya menggunakan sumber tegangan dari PLN dengan frekuensi konstan 50 Hz (Suki et al., 2025). Kondisi tersebut menyulitkan pengaturan kecepatan saat beban produksi berubah-ubah, yang pada akhirnya memicu inefisiensi. Sebagai solusi atas permasalahan tersebut, Diantoro et al. (2024) menjelaskan penggunaan metode *Variable Frequency Drive* (VFD) yang berfungsi mengatur frekuensi sumber listrik agar kecepatan motor dapat dikendalikan sesuai kebutuhan. Supardi et al. (2022), juga menjelaskan bahwa *Programmable Logic Controller* (PLC) dapat dimanfaatkan sebagai otak sistem kendali yang dihubungkan dengan *Variable Frequency Drive*. Dalam konfigurasi ini, VFD berfungsi mengatur frekuensi daya listrik yang masuk ke motor, sehingga kecepatan putar motor dapat berubah-ubah secara fleksibel mengikuti perintah logika yang dikirimkan oleh PLC. Untuk mempermudah proses dalam mengendalikan motor induksi berbasis PLC, Supriadi et al. (2022) juga mengusulkan pemanfaatan layar sentuh sebagai piranti penghubung antara manusia dan mesin (*Human Machine Interface*). Melalui layar sentuh tersebut, operator dapat mempermudah melakukan perintah pengendalian sistem. HMI tersebut akan dihubungkan dengan PLC yang merupakan otak dari keseluruhan sistem kendali.

Meskipun sistem kendali otomatis tersebut menawarkan fleksibilitas, penerapannya di lapangan sering kali menghadapi tantangan terkait akurasi komunikasi data antara kontroler dan motor. Berdasarkan penelitian Huda et al. (2023) melaporkan hasil pengujian yang menunjukkan adanya selisih kecepatan rata-rata sebesar 1% hingga 4% antara perintah yang dikirim dengan kecepatan aktual motor. Penelitian tersebut diperkuat oleh Aswad et al. (2023) yang membuktikan bahwa perubahan frekuensi *input* VFD memiliki hubungan yang rumit dengan arus listrik motor, yang secara tidak langsung mempengaruhi kestabilan putarannya.

Berdasarkan permasalahan teknis tersebut, penelitian ini akan dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi frekuensi terhadap kecepatan motor induksi dengan fokus pada konfigurasi perangkat *Variable Frequency Drive* dan *Programmable Logic Controller* Siemens S7-300 yang diintegrasikan dengan *Human Machine Interface* (HMI) dan diprogram melalui *TIA Portal*. Penelitian ini bertujuan untuk menguji tingkat akurasi, linearitas, dan stabilitas respon motor ketika frekuensi dikendalikan secara otomatis oleh PLC. Metode analisis yang digunakan mencakup perbandingan antara kecepatan teoritis dan kecepatan aktual, perhitungan slip untuk melihat selisih antara nilai sinkron dan nilai pengukuran, serta analisis deviasi guna menilai ketelitian sistem kendali PLC–VFD. Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai performa pengaturan kecepatan berbasis PLC dan VFD yang terintegrasi dengan HMI, sekaligus menjadi referensi dalam peningkatan efektivitas sistem kendali motor pada aplikasi industri.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang dan mengintegrasikan perangkat keras serta perangkat lunak menggunakan *software Totally Integrated Automation (TIA) Portal* pada PLC Siemens S7-300 yang terintegrasi HMI untuk mengatur putaran motor induksi melalui VFD?
2. Bagaimana karakteristik hubungan antara perubahan frekuensi pada *Variable Frequency Drive* dengan kecepatan putaran motor induksi 3 fasa saat dikendalikan oleh PLC Siemens S7-300 yang terintegrasi *Human Machine Interface*?
3. Berapa besar persentase selisih antara kecepatan sinkron teoritis dengan kecepatan aktual motor yang terukur saat frekuensi divariasikan?
4. Bagaimana tingkat linearitas respon sistem kendali yang dirancang menggunakan *software TIA Portal* terhadap kecepatan motor induksi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Merancang sistem kendali yang mengintegrasikan perangkat keras serta perangkat lunak menggunakan *software TIA Portal* pada PLC Siemens S7-300, HMI TP700 *Comfort*, dan VFD untuk mengatur putaran motor induksi.
2. Menganalisis karakteristik respon kecepatan motor induksi tiga fasa terhadap perubahan frekuensi keluaran *Variable Frequency Drive* yang dikendalikan melalui PLC Siemens S7-300 terintegrasi *Human Machine Interface*.
3. Menganalisis tingkat akurasi sistem dengan menghitung persentase selisih kecepatan sinkron teoritis dan kecepatan aktual motor yang terukur saat frekuensi divariasikan?
4. Menganalisis linearitas sistem kendali antara *setpoint* frekuensi yang diperintahkan oleh perangkat lunak *TIA Portal* terhadap kecepatan putar motor yang dihasilkan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat signifikan, baik dari segi kontribusi akademis maupun aplikasi praktis bagi khalayak umum:

1. Secara akademis, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur ilmiah di bidang sistem kendali dan otomasi industri, khususnya mengenai integrasi teknologi lintas *platform* (Siemens dan Lenze). Selain itu, data kuantitatif mengenai tingkat linearitas yang dihasilkan dapat menjadi referensi validasi teori bagi penelitian selanjutnya maupun pengembangan bahan ajar praktikum di laboratorium teknik elektro.
2. Bagi khalayak umum, penelitian ini dapat memberikan wawasan teknis kepada praktisi industri, teknisi, maupun mahasiswa mengenai karakteristik kinerja VFD dalam mengatur kecepatan motor, serta meningkatkan pemahaman masyarakat industri tentang pentingnya akurasi dalam sistem otomasi.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menjaga agar penelitian tetap fokus dan terarah, penelitian ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut:

1. Kontroler yang digunakan adalah PLC Siemens S7-300 yang terintegrasi dengan *Human Machine Interface* Siemens TP700 *Comfort*.
2. Inverter yang digunakan adalah *Variable Frequency Drive* Lenze 8400.
3. Perangkat lunak pemrograman yang digunakan adalah *TIA Portal* versi 14 dengan bahasa *Ladder Diagram*.
4. Motor induksi dioperasikan dalam kondisi tanpa beban (*no-load test*) untuk mengisolasi variabel gesekan beban luar.
5. Rentang frekuensi yang diuji adalah 5 Hz hingga 50 Hz dengan interval kenaikan 5 Hz.
6. Analisis penelitian ini dibatasi hanya meninjau pengaruh frekuensi terhadap kecepatan putar motor.

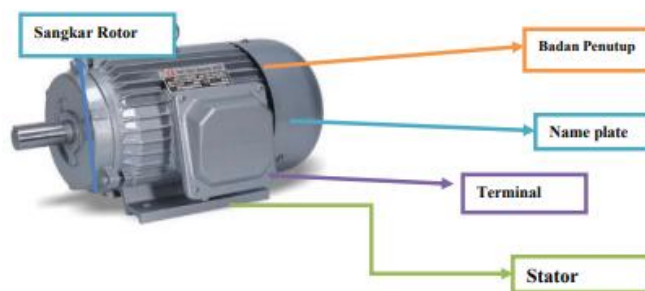
1.6 Kajian Pustaka

1.6.1 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan mesin listrik yang berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, di mana listrik yang digunakan sebagai sumber masukan adalah listrik tiga fasa. Motor jenis ini sering juga disebut sebagai motor asinkron. Dalam dunia industri, motor induksi 3 fasa sangat banyak digunakan untuk menggerakkan berbagai peralatan produksi. Pemilihan motor ini didasarkan pada keunggulannya, yaitu memiliki konstruksi yang sederhana, harga yang relatif lebih murah, serta mudah dalam perawatannya dibandingkan jenis motor lainnya. Pada dasarnya, karakteristik motor induksi 3 fasa memiliki kecepatan yang cenderung konstan, baik saat keadaan tidak berbeban (*zero/no-load*) maupun saat beban penuh (*full-load*). Hal ini menjadi tantangan tersendiri karena kecepatan motor induksi 3 fasa sangat bergantung pada frekuensi kerjanya, sehingga secara alami sulit untuk mengatur kecepatannya jika hanya mengandalkan sumber listrik konvensional tanpa alat bantu (Wiranata et al., 2024).

1.6.1.1 Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa

Secara umum, konstruksi motor induksi tiga fasa memiliki kemiripan dengan jenis motor listrik lainnya. Motor ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu stator sebagai bagian yang diam (*stationary*) dan rotor sebagai bagian yang bergerak (*rotating*). Antara permukaan stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara (*air gap*) yang sangat sempit, dengan jarak berkisar antara 0,4 mm hingga 4 mm.



Gambar 1 Konstruksi Motor Induksi 3 Fasa

Sumber: Muratno & Misdi (2020).

1. Stator merupakan bagian motor yang diam dan terdiri dari inti besi yang memiliki alur-alur (*slots*) sebagai tempat meletakkan lilitan atau kumparan. Kumparan stator ini berupa kawat penghantar terisolasi yang dihubungkan langsung dengan sumber tegangan listrik. Berdasarkan prinsip elektromagnetik, arus listrik yang mengalir pada lilitan stator akan menghasilkan fluks magnet pada inti besi tersebut.

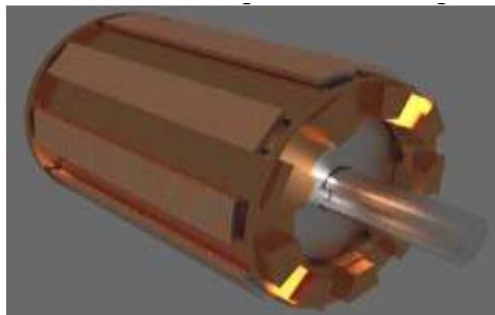
2. Rotor tersusun dari tumpukan laminasi besi tipis yang disatukan membentuk inti rotor. Di sekeliling inti ini terdapat batang-batang konduktor. Secara mekanik dan elektrik, ujung-ujung batang konduktor tersebut disatukan oleh cincin ujung (*end rings*). Inti rotor ini kemudian dipasang menyatu pada poros (*shaft*) utama motor agar dapat berputar (Muratno & Misdi 2020).



Gambar 2. Stator dan Rotor Motor Induksi

Sumber: Muratno & Misdi (2020).

Stator winding atau kumparan stator terdiri dari lilitan konduktor yang ditempatkan pada alur-alur (*slots*) inti stator. Fungsi utama dari kumparan ini adalah untuk membangkitkan fluks magnetik ketika dialiri arus listrik. Secara elektrik, ujung-ujung kumparan stator dapat dikonfigurasi membentuk rangkaian Bintang (*Star*) atau Segitiga (*Delta*). Pada umumnya, motor induksi dengan rotor sangkar tupai (*squirrel cage*) dioperasikan menggunakan rangkaian *Delta*, sedangkan motor jenis rotor belitan (*slip ring*) memiliki fleksibilitas untuk menggunakan salah satu dari kedua jenis konfigurasi tersebut (Muratno & Misdi, 2020).



Gambar 3. Rotor Sangkar Tupai

Sumber: Muratno & Misdi (2020)

Secara fisik, rancangan rotor ini menyerupai bentuk silinder bergerigi dengan banyak alur pada sisi luarnya. Alur-alur tersebut sengaja dibuat agak miring dan tidak lurus sejajar. Tujuan dari kemiringan ini adalah untuk menghasilkan putaran motor yang lebih halus, sekaligus berperan sebagai jalur konduktor. Pada kedua bagian

ujung susunan tersebut, dipasang sebuah cincin pengunci. Bahan baku yang paling umum dipakai untuk mencetak komponen ini adalah aluminium maupun tembaga. Model rotor ini menjadi pilihan yang paling banyak diaplikasikan dalam industri karena proses pabrikasinya cukup sederhana, serta sifatnya yang sangat fleksibel untuk dipasangkan dengan berapa pun jumlah kutub pada stator (Muratno & Misdi, 2020).

1.6.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi 3 Fasa

Meskipun stator dan rotor tidak bersentuhan secara fisik, keduanya berinteraksi melalui prinsip induksi elektromagnetik. Ketika kumparan stator dihubungkan ke sumber tegangan tiga fasa, arus akan mengalir dan menghasilkan Medan Magnet Putar (*Rotating Magnetic Field*) yang mengelilingi stator dengan kecepatan tertentu. Medan magnet ini akan memotong batang-batang konduktor pada rotor. Sesuai dengan Hukum Faraday, perpotongan fluks magnet ini menginduksikan tegangan (GGL) dan arus pada batang rotor (karena rotor adalah rangkaian tertutup). Interaksi antara arus induksi pada rotor dengan medan magnet stator ini kemudian menghasilkan Gaya Lorentz yang menciptakan torsi, sehingga rotor ikut berputar searah dengan putaran medan magnet stator (Barlian et al., 2024). Dalam kondisi ini, terdapat perbedaan antara kecepatan medan putar stator (n_s) dan kecepatan putar rotor (n_r). Perbedaan kecepatan ini disebut sebagai **Slip**. Adapun besarnya nilai slip pada motor induksi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (1)$$

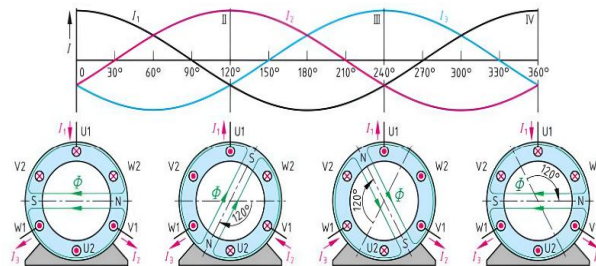
Di mana:

- n_s = medan putar stator
- n_r = kecepatan putar rotor (Sialen & Hutabarat, 2021).

Ketika kumparan stator dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa, arus listrik akan mengalir pada lilitan stator dan menghasilkan *fluks* magnetik yang berfluktuasi terhadap waktu. Interaksi resultan *fluks* dari ketiga fasa tersebut menciptakan medan magnet yang berputar mengelilingi stator. Pergerakan medan putar ini dapat dianalisis berdasarkan perubahan sudut fasa arus listrik sebagai berikut:

1. Kondisi Sudut 0° : Pada posisi ini, arus I_1 bernilai positif, sedangkan I_2 dan I_3 bernilai negatif. Berdasarkan kaidah tangan kanan, arus pada belitan V2, U1, dan W2 meninggalkan pembaca (tanda silang), sementara arus pada V1, U2, dan W1 menuju pembaca (tanda titik). Kondisi ini membentuk garis fluks magnetik dengan kutub Selatan (S) dan Utara (N) pada posisi horizontal.
2. Kondisi Sudut 120° : Arus I_2 menjadi positif, sementara I_1 dan I_3 negatif. Konfigurasi arah arus berubah sehingga resultan garis fluks magnetik (kutub S dan N) bergeser sejauh 120° dari posisi awal.

3. Kondisi Sudut 240° : Arus I_3 bernilai positif, sedangkan I_1 dan I_2 negatif. Hal ini menyebabkan medan magnet kembali bergeser sejauh 120° dari posisi sebelumnya.
4. Kondisi Sudut 360° : Siklus kembali ke titik awal 0° , di mana kutub magnet kembali ke posisi semula, menandakan satu putaran penuh gelombang listrik (Fakhri et al., 2024).



Gambar 4. Timbulnya Medan Putar Stator

Sumber: Fakhri et al. (2022).

Kecepatan putar medan magnet stator tersebut dikenal sebagai kecepatan sinkron (N_s). Nilai kecepatan ini menjadi acuan batas maksimal putaran motor dan memiliki hubungan yang berbanding lurus dengan frekuensi sumber listrik (f) serta berbanding terbalik dengan jumlah kutub magnet motor (P). Hubungan matematis ini dinyatakan dalam persamaan:

$$N_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (2)$$

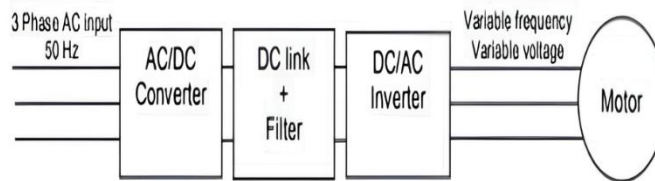
Di mana:

- f adalah frekuensi dalam satuan Hertz (Hz) dan
- P adalah jumlah kutub (*pole*).

Berdasarkan persamaan tersebut, terlihat jelas bahwa perubahan nilai frekuensi akan berdampak langsung dan linier terhadap perubahan kecepatan putaran (rpm). Prinsip inilah yang diterapkan dalam penggunaan *Variable Frequency Drive*. VFD bekerja dengan memanipulasi frekuensi tegangan *input* yang masuk ke motor, sehingga kecepatan putaran motor dapat dinaikkan atau diturunkan secara presisi sesuai kebutuhan proses (Sumarta & Aini, 2024).

1.6.2 Variable Frequency Drive (VFD)

Variable Frequency Drive adalah alat yang terdiri dari rangkaian elektronika (dioda, kapasitor dan transistor) yang berfungsi untuk mengendalikan kecepatan motor listrik (AC) dengan cara mengatur frekuensi daya listrik yang di pasok ke motor (Fakhri et al., 2024). *Variable Frequency Drive* atau yang biasa disebut konverter frekuensi memiliki dua fungsi utama, yaitu untuk mentransfer bentuk gelombang arus dari satu frekuensi ke frekuensi lainnya serta berguna mengontrol *input* frekuensi. Secara sederhana prinsip kerja VFD dapat dilihat melalui diagram blok pada Gambar 5. Berdasarkan diagram blok tersebut, menunjukkan bahwa prinsip kerja VFD sebagai berikut:



Gambar 5. Diagram Blok VFD

Sumber: Maulana et al. (2024).

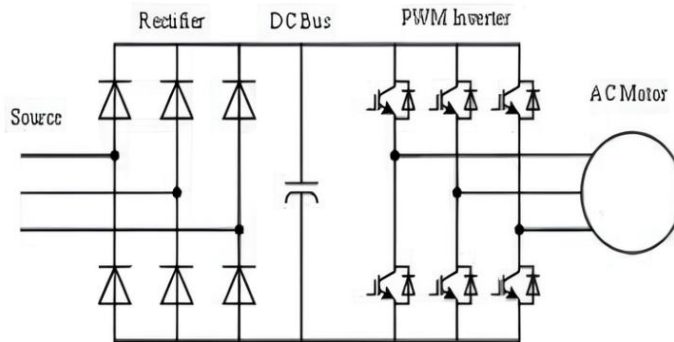
1. Awalnya tegangan *input* 220/380 Volt dengan frekuensi 50 Hz dikirimkan ke *board rectifier* untuk mengubah tegangan *Alternating Current* (AC) menjadi tegangan *Direct Current* (DC).
2. Kemudian agar tegangan DC lebih stabil, tegangan diumpankan ke rangkaian *DC link* di mana pada rangkaian tersebut terdapat kapasitor dan induktor yang akan berfungsi menstabilkan tegangan DC yang kemudian akan diolah oleh *inverter*.
3. Arus searah tersebut selanjutnya akan dialirkan ke rangkaian *inverter* yang kemudian akan dikonversi menjadi arus AC kembali dengan frekuensi yang telah memenuhi persyaratan. Dalam proses konversi menjadi arus AC, komponen yang digunakan ialah komponen semikonduktor aktif seperti MOSFET atau *Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT) (Fakhri et al., 2022).

1.6.2.1 Konstruksi Variable Frequency Drive (VFD)

Variable Frequency Drive tersusun dari beberapa komponen yang disusun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

1. Pada bagian *input* terdapat konverter yang terdiri dari enam dioda yang berfungsi untuk mengubah daya AC tiga fasa menjadi daya DC.
2. Kemudian pada bagian bus DC, berfungsi menerima tegangan DC tetap di mana terdapat induktor (L) dan kapasitor yang berfungsi sebagai *filter* untuk mengurangi riak yang terbentuk dari proses konversi AC ke DC sehingga bentuk gelombang DC yang dihasilkan lebih halus.

3. Pada bagian akhir *drive* terdapat *inverter* yang berfungsi membalikkan tegangan DC kembali ke AC. Komponen yang digunakan sebagai *inverter* ialah *Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT) (Surianto, 2020).



Gambar 6. Konstruksi VFD

Sumber: Maulana et al. (2024).

Inverter menghasilkan tegangan *output* yang berasal dari proses pensaklaran menggunakan 6 buah saklar semikonduktor. Biasanya *inverter* bekerja menggunakan teknik *Pulse Width Modulation* (PWM). Agar keluaran yang dihasilkan lebih ideal di mana gelombang arus yang dihasilkan memiliki distorsi harmonik yang rendah, pada sistem tiga fasa digunakan 6-pulse-(three-leg) *Bridge inverter* karena lebih ekonomis (Laili et al., 2023).

1.6.2.2 Pengaturan Frekuensi Inverter Melalui PLC

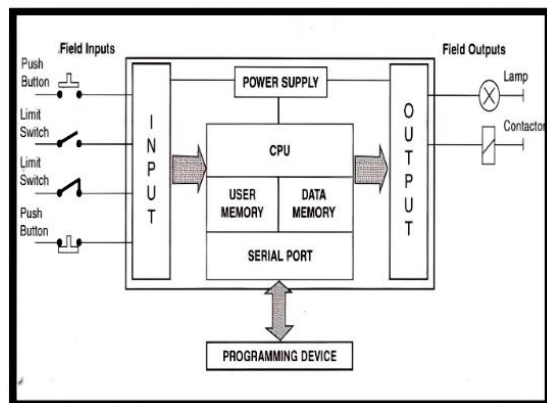
Untuk mengatur putaran motor induksi 3 fasa, digunakan *analog input*, *analog output* dan *digital output* dari *Programmable Logic Controller* yang dihubungkan melalui terminal *inverter* yang diatur menggunakan fungsi *Move* dan *Binary multiply* yang kemudian akan dikirim ke *input* PLC. Perintah *Move* digunakan untuk mengatur frekuensi dan untuk *reset setting* frekuensi ke 0 setelah motor mati. *Binary multiply* digunakan untuk membaca *input* analog dan juga *output*. Inverter yang dimaksud ialah pengendali motor AC bisa dikendalikan menggunakan PLC, di mana Pengaturan *inverter* dapat dijalankan dengan memanfaatkan koneksi serial atau melalui pemberian instruksi berupa sinyal digital dan analog. Pada prinsipnya, PLC mengatur kinerja *inverter* melalui jalur penghubung *Input/Output* (I/O) digital dan analog. Oleh karena itu, modul tambahan yang diperlukan pada sistem ini meliputi keluaran digital (*digital output*), masukan analog (*analog input*), serta keluaran analog (*analog output*). Dalam rangkaian kendali ini, PLC bertindak sebagai pusat pemroses utama yang mengerjakan seluruh tahapan operasi mesin. Tugas tersebut mencakup proses penerimaan sinyal masukan, pengolahan data atau perhitungan, penentuan langkah kendali, hingga pengiriman perintah keluaran (Evalina et al., 2018).

1.6.3 Programmable Logic Controller (PLC)

Programmable Logic Controller umumnya dianggap sebagai jantung dari sistem kontrol. PLC dapat diprogram dengan menggunakan aplikasi kemudian disimpan dalam memori. PLC merupakan perangkat pengendali digital berbasis mikroprosesor yang dirancang khusus untuk menjalankan fungsi otomatisasi pada berbagai sistem operasional. Prinsip kerja utama PLC diawali dengan menerima dan membaca sinyal masukan (*input*) dari berbagai sensor, yang kemudian data tersebut diolah secara internal mengacu pada logika program yang tersimpan di dalam memorinya. Hasil pemrosesan data tersebut selanjutnya dikonversi menjadi sinyal keluaran (*output*) yang berfungsi untuk menggerakkan komponen aktuator, seperti menyalakan motor listrik, mengatur bukaan katup, ataupun mengaktifkan lampu indikator sesuai dengan algoritma kendali yang diinginkan (Pradana & Rahmaniari, 2025).

1.6.3.1 Komponen Utama PLC

Programmable Logic Controller terdiri dari berapa komponen utama yang ditunjukkan pada Gambar 7. Berdasarkan gambar tersebut, terdapat 4 komponen utama yang menyusun sebuah PLC. Semua komponen tersebut bekerja sama untuk menjalankan fungsi PLC dengan baik dan normal. Perangkat Keras PLC terdiri dari:



Gambar 7. Komponen utama PLC

Sumber: Rezaputra & Cahyono. (2021).

1. *Power supply* atau catu daya digunakan untuk memberikan daya pada semua komponen pada PLC.
2. *Central Processing Unit* (CPU) merupakan otak dari PLC yang berfungsi menjalankan operasi matematika dan logika otak PLC dan menyimpan data atau mengirim data.
3. *Programing Device* adalah sebuah alat atau *tools* yang dapat berfungsi untuk berkomunikasi pada sistem PLC.
4. Modul *input/output* merupakan komponen sebagai antarmuka (*interface*) yang mengoneksikan PLC dengan peralatan *input/output* pada sistem operasi PLC (Rezaputra & Cahyono, 2021).

Pemrograman PLC biasanya menggunakan bahasa khusus yaitu diagram tangga (*ladder diagram*). Diagram tangga atau *ladder diagram* adalah turunan dari teknologi *relay* konvensional, sehingga memudahkan operator dalam menggunakan PLC (Evalina et al., 2018).

1.6.3.2 Modul *Analog Input* dan *Output* pada PLC Siemens S7-300

Sistem otomasi industri tingkat lanjut tidak hanya mengandalkan sinyal digital diskrit, tetapi juga memerlukan pengolahan sinyal kontinu untuk mengendalikan parameter fisik yang berubah secara dinamis. Pada perangkat PLC Siemens S7-300, fungsi tersebut dijalankan oleh modul *Analog Input* (AI) dan *Analog Output* (AO) yang bekerja dengan standar sinyal industri. Berdasarkan standar instrumentasi, modul analog pada kontroler tersebut umumnya dikonfigurasi untuk beroperasi pada rentang tegangan 0 hingga 10 Volt DC (Fadlioni & Purwanto, 2023).

Prinsip kerja dan fungsi dari kedua modul tersebut dapat diuraikan sebagai berikut.

- *Analog Input*
Modul ini berfungsi untuk menerima sinyal fisik berupa tegangan 0–10V DC dari perangkat luar seperti sensor atau potensiometer. Di dalam modul, terjadi proses *Analog-to-Digital Conversion* (ADC) yang mengubah tegangan fisik tersebut menjadi nilai digital bilangan bulat (integer) agar dapat diolah oleh algoritma program PLC (Hasan, 2024).
- *Analog Output*
Modul ini bekerja dengan cara menerima instruksi data digital dari program PLC, misalnya melalui instruksi *MOVE*, kemudian melakukan proses *Digital-to-Analog Conversion* (DAC). Hasil konversi tersebut berupa sinyal tegangan fisik murni dengan rentang 0 hingga 10 Volt DC (Fadlioni & Purwanto, 2023).

Dalam aplikasi pengaturan motor induksi, sinyal tegangan keluaran 0-10V DC dari modul *Analog Output* dikirimkan menuju terminal masukan analog pada perangkat *Variable Frequency Drive*. Perangkat VFD selanjutnya akan membaca fluktuasi nilai tegangan tersebut dan menerjemahkannya secara linier menjadi variasi frekuensi, misalnya pada rentang 0 Hz hingga 50 Hz. Mekanisme tersebut memungkinkan sistem untuk mengatur kecepatan putaran motor induksi secara presisi dan stabil sesuai dengan parameter yang ditentukan melalui antarmuka kendali (Fadlioni & Purwanto, 2023).

1.6.3.3 Sistem Pengalamatan (*Addressing*) pada PLC Siemens

Sistem pengalamatan merupakan metode untuk menentukan lokasi memori atau terminal fisik yang digunakan dalam program PLC. Pada standar Siemens (*TIA Portal*), alamat diawali dengan simbol persen (%) sebagai penanda alamat absolut. Pengalamatan ini dibagi berdasarkan jenis area memori dan ukuran data yang digunakan (Ardiansyah & Risfendra, 2020).

1. Pengenal Area Memori (I, Q, M)

Setiap terminal atau memori internal memiliki kode identitas unik untuk membedakan fungsinya:

- "I" (*Input*): Merupakan alamat untuk terminal masukan fisik. Sinyal dari perangkat luar seperti tombol tekan atau sensor dibaca oleh PLC melalui alamat ini (misalnya %I0.0).
- "Q" (*Output*): Merupakan alamat untuk terminal keluaran fisik. PLC mengirimkan sinyal untuk mengaktifkan aktuator seperti kontaktor atau *relay* melalui alamat ini (misalnya %Q0.0).
- "M" (*Memory/Bit Memory*): Sering disebut sebagai *Marker*. Ini adalah memori internal yang digunakan sebagai relai pembantu untuk menyimpan status logika sementara di dalam program tanpa terhubung langsung ke terminal fisik eksternal (Ananda dkk., 2023).

2. Pengenal Ukuran Data (B, W, D)

Setelah simbol area memori (I, Q, atau M), terdapat pengenal ukuran data yang menentukan berapa banyak bit yang diakses:

- Tanpa pengenal (*Bit*): Jika langsung diikuti angka *bit* (misal %I0.0), maka PLC hanya mengakses 1 bit (status 0 atau 1).
- "B" (*Byte*): Mengakses 8 bit data (misal %MB10).
- "W" (*Word*): Mengakses 16 bit data. Dalam pengontrolan VFD atau proses analog lainnya, pengalamatan "W" sangat krusial. Alamat %IW (*Input Word*) digunakan untuk membaca besaran nilai analog, sedangkan %QW (*Output Word*) digunakan untuk mengirimkan referensi kecepatan atau tegangan dalam bentuk bilangan bulat 16-bit (Ardiansyah & Risfendra, 2020).
- "D" (*Double Word*): Mengakses 32 bit data, biasanya digunakan untuk perhitungan matematika tingkat tinggi atau data desimal (*Real*).

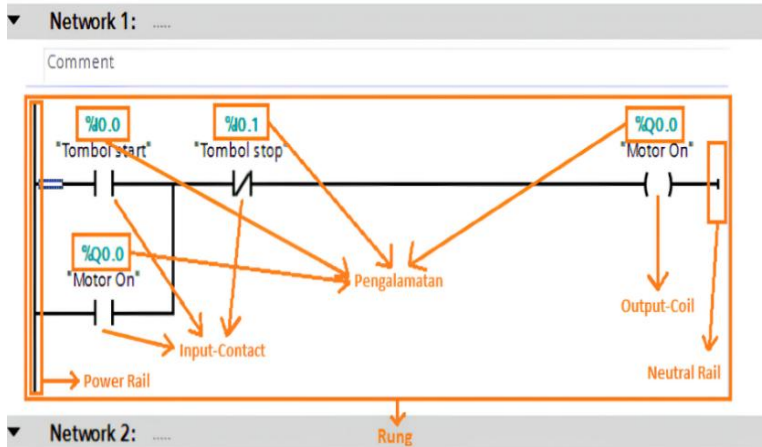
Sistem pengalamatan ini memastikan bahwa setiap instruksi dalam *ladder diagram* beroperasi pada lokasi memori yang tepat, sehingga tidak terjadi tumpang tindih data (*overlap*) yang dapat menyebabkan kegagalan sistem pada instrumen otomasi yang terintegrasi (Ananda dkk., 2023).

1.6.4 Ladder Diagram (LAD)

Ladder Diagram atau diagram tangga merupakan bahasa pemrograman PLC yang paling populer dan paling banyak digunakan di dunia industri. Kepopuleran ini disebabkan karena struktur bahasanya yang mengadopsi skema rangkaian relai kontrol konvensional (*relay logic*), sehingga mudah dipahami oleh teknisi listrik tanpa latar belakang pemrograman komputer yang mendalam (Ihtisan, 2020).

Secara visual, *ladder diagram* terdiri dari dua garis vertikal di sisi kiri dan kanan yang disebut sebagai *power rail* (jalur sumber tegangan) dan *neutral rail*. Di antara kedua garis tersebut terdapat garis-garis horizontal yang disebut sebagai *rung* (anak tangga). Aliran logika program berjalan layaknya arus listrik, mengalir dari rel kiri ke rel kanan melalui komponen-komponen utama, yaitu:

1. *Contact* (Kontak): Merepresentasikan sinyal masukan (*Input*), baik berupa sakelar, sensor, atau variabel internal.
2. *Coil* (Koil): Merepresentasikan sinyal keluaran (*Output*) untuk mengaktifkan aktuator seperti motor, lampu, atau solenoid.



Gambar 8. Contoh *Ladder Diagram*

Sumber: Ihtisan. (2020).

Secara sederhana Gambar 8 akan menunjukkan *ladder diagram* yang dirancang menggunakan *software TIA Portal*. Berdasarkan *ladder diagram* tersebut, terdapat bagian-bagian utama seperti bagian *contact (input)* dan *coil (output)*. Pengalamatan pemrograman tergantung dari PLC yang digunakan. Pada dasarnya pengalamatan digunakan untuk merepresentasikan *input* ataupun *output* yang digunakan.

Selain *contact* dan *coil*, pada *ladder diagram* dikenal pula logika *latching* dan *interlock*. *Latching* atau *self-holding* adalah teknik pemrograman yang membuat suatu *output* atau *bit* memori tetap aktif walaupun tombol *start* sudah dilepas, dan kondisi tersebut baru berubah ketika ada perintah *stop* atau *reset*. Dengan demikian, *latching* sangat penting pada sistem kendali motor karena memungkinkan motor tetap bekerja setelah tombol *start* hanya ditekan sesaat (Muchtar et al., 2024).

Adapun *interlock* merupakan logika pengunci yang berfungsi mencegah dua kondisi atau dua *output* yang saling bertentangan aktif secara bersamaan. Dalam praktik *ladder diagram*, *interlock* digunakan untuk meningkatkan keamanan dan keandalan sistem, misalnya agar hanya satu mode operasi yang boleh aktif pada satu waktu. Pada studi kasus *basic ladder logic*, kondisi keluaran dipertahankan setelah tombol dilepas, sedangkan keluaran lain dicegah untuk aktif selama keluaran pertama masih menyala; pola ini menunjukkan fungsi *latching* dan *interlock* bekerja secara bersama dalam satu rangkaian kendali (Muchtar et al., 2024).

Pada perangkat lunak *TIA Portal*, standar identifikasi atau pengalamatan untuk terminal masukan (*input*) dan keluaran (*output*) memiliki format penulisan tersendiri. Alamat untuk terminal masukan selalu diawali dengan simbol *%I* yang dirangkai

bersama dua digit angka sebagai penunjuk lokasi spesifik *port* pada PLC (sebagai contoh: %I0.0). Sebaliknya, identifikasi untuk terminal keluaran menggunakan prefiks %Q yang juga diikuti oleh dua digit angka lokasi *port* pengeluaran (contohnya: %Q0.0). Lebih lanjut, berdasarkan ilustrasi *ladder diagram* sebelumnya, terdapat sejumlah prinsip dasar yang wajib diperhatikan dalam membaca maupun merancang diagram tangga, yaitu:

- Alur pembacaan dan eksekusi logika selalu beroperasi secara sekuensial, yakni dari arah kiri menuju kanan, dan berlanjut dari baris teratas ke bawah.
- Pada satu baris instruksi atau *rung*, jalur logikanya tidak diizinkan untuk berujung pada lebih dari satu komponen keluaran secara langsung.
- Seluruh simbol perangkat masukan dan keluaran selalu direpresentasikan dalam keadaan normalnya, yakni pada saat komponen tersebut tidak dialiri arus listrik (*de-energized*).
- Pengenalan dan pemetaan setiap elemen I/O pada program mutlak bergantung pada spesifikasi alamat operasional yang telah didaftarkan (Ihtisan, 2020).

1.6.5 *Totally Integrated Automation (TIA)*

TIA *Portal* adalah *platform* perangkat lunak terpadu yang dikembangkan oleh Siemens untuk keperluan pemrograman dan konfigurasi sistem otomasi. Sebagai evolusi dari perangkat lunak pendahulunya, Simatic Step7, TIA *Portal* menawarkan antarmuka pemrograman dasar yang serupa dengan Simatic S7 namun dengan fitur integrasi yang jauh lebih luas.



Gambar 9. *Software TIA Portal V14*

Sumber: Surianto. (2020).

Keunggulan utama TIA *Portal* terletak pada kemampuannya menyatukan berbagai fungsi rekayasa dalam satu lingkungan kerja (*framework*). Perangkat lunak ini mengintegrasikan pemrograman PLC Siemens dengan konfigurasi Simatic *Human Machine Interface* untuk keperluan visualisasi dan *monitoring plant*. Dengan menyatukan berbagai *software* yang sebelumnya terpisah, TIA *Portal* memungkinkan proses pengembangan, pemrograman, dan komisioning sistem berjalan secara lebih cepat dan intuitif. Hal ini memberikan dampak positif berupa efisiensi waktu dan biaya operasional dalam perancangan sistem otomasi (Sugianto et al., 2016).

Selain fungsi pemrograman inti menggunakan bahasa seperti *ladder diagram*, TIA *Portal* juga dilengkapi dengan fitur simulasi yang kuat, yaitu PLCSIM. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk melakukan pengujian logika program secara virtual tanpa memerlukan perangkat keras fisik, sehingga risiko kesalahan pada saat implementasi nyata dapat diminimalisir. Dalam konteks pengendalian motor induksi,

TIA *Portal* memfasilitasi pengaturan parameter frekuensi dan tegangan pada VFD melalui instruksi-instruksi khusus yang dikirimkan dari modul PLC, serta menyediakan visualisasi *real-time* mengenai status operasional mesin melalui antarmuka grafis pada layar HMI (Surianto, 2020).

1.6.6 Human Machine Interface (HMI)

Human Machine Interface berperan sebagai jembatan komunikasi interaktif antara operator manusia dengan sistem operasi mesin. Secara fungsional, perangkat ini memfasilitasi pengendalian sekaligus pemantauan status alat secara langsung (*real-time*), baik melalui instrumen fisik maupun representasi visual di layar monitor (Hardana & Aribowo, 2022). Kinerja sistem HMI berlangsung secara sinkron dengan cara membaca aliran data yang ditransmisikan oleh kontroler utamanya. Proses pertukaran informasi tersebut pada umumnya memanfaatkan berbagai jalur komunikasi atau *port Input/Output* (I/O), seperti *port* COM, USB, RS232, maupun antarmuka serial.

HMI berfungsi untuk merepresentasikan kondisi teknologi dan sistem kerja mesin ke dalam bentuk visual yang nyata. Fleksibilitas dalam merancang tata letak HMI bertujuan untuk menyederhanakan dan meringankan beban kerja operator di lapangan. Secara esensial, sistem ini dirancang untuk mengoptimalkan kualitas interaksi antara pengguna dan mesin, sekaligus menjamin ketersediaan informasi operasional secara cepat. Pada sektor industri manufaktur, HMI umumnya diwujudkan dalam format *Graphic User Interface* (GUI). Antarmuka grafis ini tidak hanya menyajikan data operasional, tetapi juga menyediakan elemen kendali visual interaktif seperti tombol tekan, *slider*, dan indikator yang memungkinkan operator untuk mengatur dan menjalankan mesin sesuai dengan kebutuhan (Haryanto & Hidayat, 2021).

1.6.6.1 HMI Siemens TP700 Comfort

Siemens TP700 Comfort merupakan *Human Machine Interface* yang berfungsi sebagai antarmuka antara pengguna dengan mesin untuk melakukan interaksi pada sistem otomatisasi. Dengan layar sentuh warna 7 inci yang jernih dan beresolusi tinggi, TP700 *Comfort* memungkinkan pengguna dengan mudah mendesain sistem, menampilkan data proses, dan mengontrol peralatan dengan cepat dan efisien.



Gambar 10. HMI TP700 *Comfort*

Sumber: Fikram & Anggara. (2024).

Lebih dari itu, perangkat HMI tersebut memiliki fleksibilitas tinggi untuk dihubungkan dengan beragam instrumen otomasi pabrik, contohnya perangkat PLC Siemens maupun arsitektur SCADA. Proses sinkronisasi data ini umumnya difasilitasi melalui protokol jaringan komunikasi seperti PROFIBUS atau *Ethernet*. Kapabilitas interkoneksi tersebut memberikan keuntungan bagi pengguna untuk melakukan pengawasan dan intervensi operasional dari jarak jauh (*remote*), sekaligus mempermudah penarikan rekam jejak data (*historical data*) beserta dokumen evaluasi performa sistem. Berbekal konstruksi fisik yang tangguh dan teruji, seri Siemens TP700 *Comfort* tampil sebagai alternatif yang sangat direkomendasikan pada sektor manufaktur. Perangkat ini secara khusus mampu mengakomodasi tingginya kebutuhan industri terhadap ketepatan observasi proses, keandalan visualisasi kendali, serta stabilitas kinerja mesin secara menyeluruh (Al Fikram & Anggara, 2024).

1.6.7 Analisis Regresi Linier

Analisis regresi linier sederhana merupakan salah satu metode statistika kuantitatif yang digunakan untuk menguji, mengukur, serta memodelkan hubungan fungsional atau kausal antara satu variabel bebas (*independent variable*) terhadap satu variabel terikat (*dependent variable*). Tujuan utama dari penggunaan analisis regresi ini tidak hanya untuk melihat arah hubungan apakah bersifat linier positif atau negatif tetapi juga digunakan sebagai alat prediksi untuk mengestimasi besaran nilai variabel terikat apabila variabel bebas mengalami perubahan nilai (Sahmiyya, 2022).

Secara matematis, model dasar dari analisis regresi linier sederhana dirumuskan ke dalam bentuk persamaan linier sebagai berikut:

$$Y = a + bX \quad (3)$$

Keterangan:

- Y = Variabel terikat (*dependent variable*), yaitu variabel yang nilainya dipengaruhi atau menjadi akibat.
- X = Variabel bebas (*independent variable*), yaitu variabel yang menjadi sebab atau memengaruhi variabel terikat.
- a = Konstanta (*intercept*), yang merepresentasikan proyeksi nilai variabel Y secara statistik apabila variabel X bernilai 0.
- b = Koefisien regresi, yang menunjukkan laju besaran arah dan perubahan pada nilai Y untuk setiap pergerakan satu satuan nilai X (Putra et al., 2022).

1.6.8 Koefisien Determinasi (R^2)

Dalam proses evaluasi pengujian statistik menggunakan model regresi, indikator yang digunakan untuk menilai tingkat kelayakan, keandalan, dan kecocokan model adalah Koefisien Determinasi, yang secara matematis dilambangkan dengan (R^2) (*R-Square*). Koefisien determinasi adalah sebuah metrik pengukuran yang berfungsi

untuk memberikan gambaran mengenai seberapa presisi garis regresi yang dihasilkan. Dengan kata lain, nilai (R^2) mengukur persentase seberapa besar kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan variasi atau fluktuasi yang terjadi pada variabel terikat (Maulidan et al, 2025).

Nilai hasil perhitungan koefisien determinasi secara mutlak selalu berada pada rentang interval antara 0 hingga 1. Apabila hasil (R^2) mendekati angka 0, hal tersebut mengindikasikan bahwa variabel bebas memiliki keterbatasan atau hampir tidak memiliki kekuatan dalam menjelaskan perubahan pada variabel terikat. Sebaliknya, apabila nilai (R^2) yang dihasilkan mendekati angka 1, hal itu membuktikan bahwa hampir seluruh variasi perilaku pada variabel terikat mampu dijelaskan secara tepat oleh variabel bebas. Model regresi dengan nilai (R^2) yang tinggi menandakan bahwa tingkat kesalahan prediksi model sangat rendah, sehingga model tersebut dianggap sangat akurat untuk digunakan (Maulidan dkk., 2025).

1.7 Penelitian Terkait

Tabel 1. Penelitian-Penelitian Terkait

No.	Judul & Penulis	Metode	Hasil Penelitian
1.	Rancang Bangun Sistem Kendali dan Monitoring Kecepatan Motor Induksi Berbasis <i>Programmable Logic Controller</i> (PLC) Dilengkapi Layar Sentuh. Supardi et al. (2022).	Eksperimental dengan pembuatan prototipe sistem kendali menggunakan PLC Omron dan VFD untuk menggerakkan motor induksi 3 fasa.	Variasi frekuensi masukan dari 5 Hz hingga 50 Hz menghasilkan kecepatan putar motor antara 120 rpm hingga 1549 rpm. Pengujian menunjukkan adanya selisih antara kecepatan melalui pengukuran langsung dan yang muncul pada layar monitor yaitu 155 rpm hingga 1425 rpm.
2.	Sistem Monitoring Kecepatan Motor Induksi Dengan HMI Berbasis PLC Rifaldo & Yuhendri (2022).	Pengembangan sistem (<i>Research and Development</i>) dengan merancang antarmuka HMI untuk memantau kecepatan dan arah putaran motor secara <i>real-time</i> . PLC yang digunakan ialah PLC Siemens S7-1200 dan meninjau parameter tegangan beserta kecepatan putaran motor induksi.	Hasil pengujian menunjukkan sinkronisasi data yang valid antara tampilan HMI dengan pembacaan alat ukur fisik, namun tidak merincikan data linearitas pada rentang frekuensi tertentu. Dan terdapat pula selisih kecepatan antara hasil pengukuran langsung (1494 rpm hingga 1238 rpm) dengan kecepatan yang muncul pada layar (1487 rpm hingga 1222 rpm).

Lanjutan Tabel 1.

No.	Judul & Penulis	Metode	Hasil Penelitian
3.	Pengaruh Perubahan Frekuensi Dalam Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Berbasis <i>Variable Frequency Drive</i> (VFD) Terhadap Arus Kumpan Motor. Aswad et al. (2023).	Kuantitatif eksperimental dengan mengukur parameter arus dan kecepatan motor pada berbagai titik frekuensi masukan VFD. Frekuensi yang diuji mulai dari 10 Hz hingga 60 Hz dengan kenaikan frekuensi 10 Hz.	Peningkatan frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan, di mana melalui pengukuran kecepatan yang diperoleh 393,1 rpm hingga 2167 rpm. Namun nilai arus kumparan motor tetap konstan (tidak berubah signifikan terhadap frekuensi). Fokus data lebih banyak pada parameter arus listrik dibandingkan presisi rpm.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Pendekatan dan Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan proses perancangan sistem untuk mengatur kecepatan putaran motor induksi dengan memvariasikan frekuensi pada VFD. Selain itu penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Menurut Abdullah et al. (2023), penelitian kuantitatif adalah penelitian yang didasarkan pada bukti nyata, di mana datanya dikumpulkan dalam bentuk numerik (angka) dan dianalisis secara objektif untuk melihat interaksi sebab-akibat. Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada bentuk data utama yang dicari, yaitu berupa angka pasti dari hasil pengukuran parameter operasional sistem. Dalam pelaksanaannya, sifat kuantitatif ini ditunjukkan melalui pengambilan data nilai frekuensi (dalam satuan Hz) dan kecepatan putaran motor (dalam satuan rpm) menggunakan instrumen fisik yang akurat, sehingga hasilnya benar-benar nyata dan tidak didasarkan pada sekadar perkiraan.

Sebagai bagian dari pendekatan tersebut, penelitian ini secara khusus menerapkan metode eksperimen. Berdasarkan penjelasan Siroj et al. (2024), metode eksperimen adalah metode penelitian yang memberi kesempatan kepada peneliti untuk memanipulasi (mengubah-ubah) variabel secara langsung guna menguji hubungan sebab-akibat di dalam kondisi pengujian yang diatur dengan sangat ketat atau terkontrol. Penerapan metode eksperimen pada penelitian ini dilakukan dengan cara sengaja mengubah nilai frekuensi pada *Variable Frequency Drive* secara bertahap mulai dari rentang 5 Hz hingga 50 Hz. Tujuan dari pengaturan frekuensi tersebut adalah untuk mengukur secara langsung akibatnya terhadap kecepatan putaran poros motor induksi, sehingga ketepatan alat dalam menjaga kestabilan putaran motor dapat dibuktikan secara faktual.

2.2 Waktu dan Tempat Penelitian

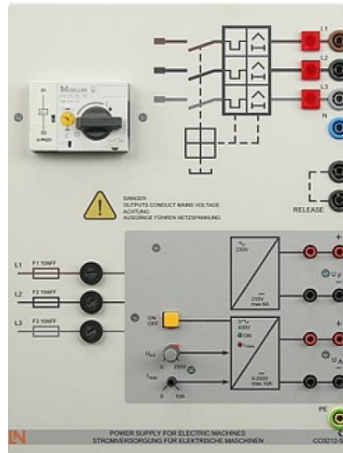
Proses awal hingga akhir penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari hingga bulan April tahun 2026. Keseluruhan proses perakitan perangkat keras, pemrograman sistem otomasi, hingga tahap pengujian dan pengambilan data dilakukan di Laboratorium Distribusi Sistem Tenaga dan Instalasi Listrik, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

2.3 Alat dan Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan beberapa alat dan juga bahan sebagai pendukung untuk menjalankan proses penelitian ini, tanpa adanya alat dan bahan yang memadai maka penelitian ini tidak dapat berjalan dengan baik, di mana alat beserta spesifikasi yang digunakan sebagai berikut:

1. *Universal Power Supply for Electrical Machines (CO3212-5U)*

Menyediakan sumber tegangan jala-jala listrik PLN 230 V AC / 50 Hz ke sistem VFD.



Gambar 11. *Universal Power Supply for Electrical Machines (CO3212-5U)*

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

Tabel 2. Spesifikasi *Universal Power Supply for Electrical Machines*

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Koneksi Daya Masukan (<i>Power Connection</i>)	3x 230/400 V, 50/60 Hz (melalui steker CEE dengan kabel daya 1,8 m)
2.	Keluaran AC 3-Fasa (<i>Three-phase Output</i>)	Terminal L1, L2, L3, dan N (menggunakan soket pengaman / <i>safety sockets</i> 4 mm)
3.	Keluaran DC Variabel (<i>Variable DC Output</i>)	0 – 240 V DC (tegangan dapat diatur dan dilindungi secara elektronik)
4.	Arus Keluaran DC Variabel	3 – 10 A (ambang batas pembatasan arus dapat diatur)
5.	Keluaran DC Tetap (<i>Fixed DC Output</i>)	~210 V DC dengan arus tetap 6 A
6.	Sistem Proteksi Keamanan (<i>Protective Systems</i>)	- Sakelar pelindung motor (<i>Motor protection switch</i>): dapat diatur 6,3 – 16 A - Pemutusan akibat tegangan kurang (<i>Undervoltage trip</i>) - Pemutus daya pengaman darurat (<i>Safety cut-out</i>)
7.	Dimensi Fisik (T x L x D)	297 x 228 x 140 mm
8.	Berat	3 kg

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

2. *Touch panel TP700 Comfort Trainer Package (CO3713-4P)*

Berfungsi untuk menjembatani komunikasi antara operator (manusia) dan mesin atau proses otomatisasi, menjadikannya antarmuka visual dan kontrol



Gambar 12. *Touch Panel TP700 Comfort Trainer Package (CO3713-4P)*

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

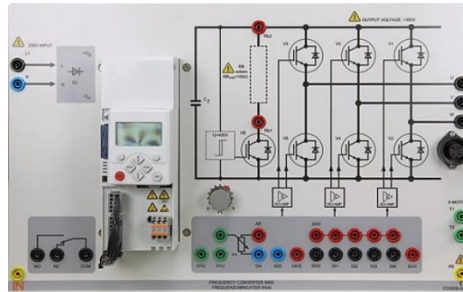
Tabel 3. Spesifikasi *Touch Panel TP700 Comfort Trainer Package (CO3713-4P)*

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Layar Utama (<i>Display</i>)	Layar sentuh (<i>touch screen</i>) 7 inci, warna grafis penuh (16 juta warna)
2.	Resolusi Layar	800 x 480 piksel, dengan sudut pandang yang luas (<i>large viewing angle</i>)
3.	Pencahayaan Latar (<i>Backlight</i>)	LED <i>dimmable</i> (tingkat kecerahan dapat diatur pada rentang 0 – 100%)
4.	Catu Daya Masukan (<i>Power Supply</i>)	24 V DC
5.	Antarmuka Komunikasi (<i>Ports</i>)	MPI, PROFIBUS DP, PROFINET I/O, dan USB
6.	Fitur Fungsional	- Menampilkan notifikasi kesalahan dan status operasional (<i>fault and operational notifications</i>) - Manajemen formulasi/parameter (<i>formulation management</i>)
7.	Kabel Koneksi	Kabel jaringan <i>Ethernet cross-connect</i>
8.	Kebutuhan Sistem PC (<i>Requirements</i>)	Windows 7 (32/64 bit) <i>Professional/Enterprise/Ultimate</i> SP1, atau Windows XP <i>Professional</i> SP3
9.	Dimensi Fisik (T x L x D)	297 x 228 x 125 mm
10.	Berat	3 kg

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

3. *Frequency Converter 0.75kW (Lenze 8400) (CO3636-5G)*

Memiliki fungsi utama untuk mengendalikan kecepatan putaran motor induksi 3 fasa dengan mengubah frekuensi dan tegangan listrik yang disuplai.



Gambar 13. *Frequency Converter 0.75kW (Lenze 8400) (CO3636-5G)*

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

Tabel 4. Spesifikasi *Frequency Converter 0.75kW (Lenze 8400) (CO3636-5G)*

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Daya Nominal (<i>Nominal power</i>)	750 W, 1,5 kVA
2.	Tegangan Masukan (<i>Input voltage</i>)	180...264 V AC, 50/60 Hz
3.	Tegangan Keluaran (<i>Output voltage</i>)	0...3x (<i>input voltage</i> / mengikuti tegangan masukan)
4.	Frekuensi Keluaran (<i>Output frequency</i>)	0...1000 Hz
5.	Arus Keluaran (<i>Output current</i>)	0...4 A
6.	Faktor Beban Lebih (<i>Overload factor</i>)	150% (selama 60 detik) / Daya keluaran tinggi (<i>high output power</i>) maksimal 1120 W
7.	Sistem Kendali	Berbasis mikroprosesor (<i>microprocessor-controlled</i>)
8.	Mode Kendali (<i>Control modes</i>)	Kontrol karakteristik V/f linier dan kuadratik (<i>linear and quadratic V/f-characteristic control</i>), atau kendali vektor (<i>vector control</i>)
9.	Fitur Terintegrasi	- Fungsi proteksi (<i>integrated protective functions</i>) - Transistor pengereman (<i>integrated brake transistor</i>) - Kontroler PID (<i>integrated PID controller</i>) - Unit operasi LCD (<i>LCD operating unit</i>)

Lanjutan Tabel 4.

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
10.	Penyimpanan Parameter	Mendukung 4 set parameter (<i>4 sets of parameters</i>)
11.	Perangkat Lunak (<i>Software</i>)	Perangkat lunak pengaturan parameter sudah termasuk dalam paket pengiriman (<i>parameter setting software contained in the scope of delivery</i>)
12.	Antarmuka Komunikasi	- Modul <i>field bus</i> CAN yang dapat dihubungkan (<i>connectible field bus module CAN</i>) - Antarmuka sistem untuk bus alternatif (<i>system interface for alternative bus systems</i>): Modul <i>field bus Profibus DP</i> opsional
13.	Dimensi Fisik (T x L x D)	297 x 456 x 130 mm
14.	Berat (<i>Weight</i>)	5,7 kg

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

4. *Three-Phase Asynchronous Motor, 0.3kW n=1400 (230V/400V) (SE2673-1K)*
Berfungsi mengubah energi listrik menjadi energi gerak mekanis (putaran rotor).



Gambar 14. *Three-Phase Asynchronous Motor, 0.3kW n=1400 (230V/400V)*

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

Tabel 5. Spesifikasi *Three-Phase Asynchronous Motor, 0.3kW n=1400 (230V/400V)*

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Tegangan Nominal (<i>Nominal voltage</i>)	400 / 230 V AC, 50 Hz
2.	Arus Nominal (<i>Nominal current</i>)	1,2 / 2,18 A
3.	Kecepatan Nominal (<i>Nominal speed</i>)	1380 rpm

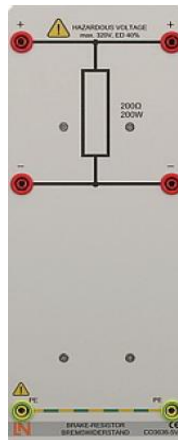
Lanjutan Tabel 5.

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
4.	Daya Nominal (<i>Nominal power</i>)	0,37 kW (370 W)
5.	Faktor Daya (<i>cos phi</i>)	0,76
6.	Dimensi Fisik (T x L x D) / (<i>Dimensions</i>)	340 x 210 x 210 mm
7.	Berat (<i>Weight</i>)	9 kg
8.	Jumlah Kutub (<i>Pole</i>)	4

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

5. *Brake Resistor 0.2kW for Frequency Converters (CO3636-5V)*

Berfungsi sebagai komponen proteksi sistem dengan menyerap dan membuang sisa tegangan pada DC *Bus* VFD menjadi panas saat motor diturunkan kecepatannya atau dihentikan secara tiba-tiba.



Gambar 15. *Brake Resistor 0.2kW for Frequency Converters (CO3636-5V)*

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

Tabel 6. Spesifikasi *Brake Resistor 0.2kW for Frequency Converters (CO3636-5V)*

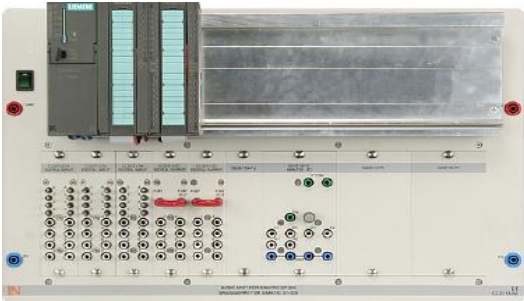
No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Daya Nominal (<i>Nominal power</i>)	200 W
2.	Nilai Hambatan (<i>Resistance</i>)	200 Ohm
3.	Tegangan Masukan (<i>Input voltage</i>)	Tegangan pemotong (<i>chopper voltage</i>) 400 V DC; Nilai efektif (<i>rms value</i>) 200 V AC
4.	Dimensi Fisik (T x L x D) / (<i>Dimensions</i>)	297 x 114 x 130 mm

Lanjutan Tabel 6.

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
5.	Berat (<i>Weight</i>)	1 kg

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

6. SIMATIC S7-314C-2 PN/DP 24 DI, 16 DO, 4 AI, 2 AO, 24V / 6 A *Power Supply* (CO3713-8L)
- Fungsi utamanya adalah sebagai otak atau unit pemrosesan sentral (CPU) dari sistem otomasi, mengeksekusi program logika kontrol *ladder diagram* di TIA Portal.



Gambar 16. SIMATIC S7-314C-2 PN/DP 24 DI, 16 DO, 4 AI, 2 AO, 24V / 6 A *Power Supply* (CO3713-8L)

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

Tabel 7. Spesifikasi SIMATIC S7-314C-2 PN/DP 24 DI, 16 DO, 4 AI, 2 AO, 24V / 6 A *Power Supply* (CO3713-8L)

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Unit CPU Utama	SIMATIC S7-300 dengan tipe CPU 314C-2 PN/DP
2.	Desain Fisik	Konsol meja yang stabil dengan kaki anti-selip (<i>stable desktop console with non-slip feet</i>)
3.	Tegangan Operasional (<i>Operating voltage</i>)	230 V AC
4.	Catu Daya Internal (<i>Integrated power supply</i>)	24 V DC / 6 A
5.	Sistem Keamanan Kelistrikan	Dilengkapi soket untuk <i>loop</i> putus-darurat (<i>sockets for EMERGENCY-OFF loop</i>) guna isolasi tegangan pada komponen keluaran
6.	Kapasitas Memori	- Memori utama (<i>main memory</i>): 192 KByte

Lanjutan Tabel 7.

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
		- Memori pemuatan (<i>loading memory</i>): Kartu memori mikro (<i>micro memory card</i>) 512 KByte
7.	Waktu Pemrosesan (<i>Processing times</i>)	0,1 μ s untuk operasi <i>bit</i> (<i>bit operation</i>), dan 0,5 μ s untuk operasi <i>word</i> (<i>word operation</i>)
8.	Fitur Penghitung dan Waktu	256 penghitung (<i>counters</i>), 256 penanda waktu (<i>time markers</i>), dan jam waktu-nyata (<i>real-time clock</i>)
9.	Antarmuka Komunikasi	- Antarmuka <i>master/slave</i> MPI / PROFIBUS-DP terintegrasi
10.	Terminal I/O Digital (<i>Integrated digital I/O</i>)	- 2 antarmuka jaringan <i>Ethernet</i> / <i>ProfiNet</i> - 24 masukan digital (<i>digital inputs</i>) 24 V DC pada soket pengaman 4 mm - 24 sakelar tekan terkunci (<i>latched, pushbutton switches</i>) untuk simulasi masukan digital
11.	Terminal I/O Analog (<i>Integrated analog I/O</i>)	- 16 keluaran digital (<i>digital outputs</i>) 24 V DC pada soket pengaman 4 mm - 4 masukan analog (<i>analog inputs</i>) 0-10 V pada soket pengaman 4 mm - 1 potensiometer (<i>potentiometer</i>) untuk mensimulasikan masukan analog - 2 keluaran analog (<i>analog outputs</i>) 0-10 V pada soket pengaman 4 mm
12.	Dimensi Fisik (T x L x D) / (<i>Dimensions</i>)	297 x 456 x 125 mm
13.	Berat (<i>Weight</i>)	7 kg

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

7. *Mobile Aluminium Experiment Stand, 3 Levels, Power Strip with 6 Sockets, 1250x700x1995mm (ST7200-3A)*

Berfungsi sebagai tempat untuk menyusun dan mengamankan seluruh komponen penelitian yang digunakan agar rapi.



Gambar 17. *Mobile Aluminium Experiment Stand, 3 Levels, Power Strip with 6 Sockets, 1250x700x1995mm (ST7200-3A)*

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

Tabel 8. Spesifikasi *Mobile Aluminium Experiment Stand, 3 Levels, Power Strip with 6 Sockets, 1250x700x1995mm (ST7200-3A)*

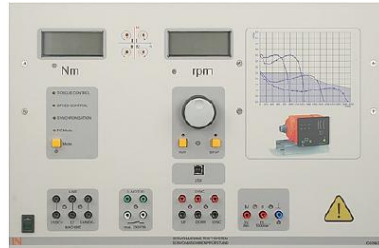
No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Permukaan Meja (<i>Table top</i>)	- Ketebalan 30 mm, berbahan papan partikel halus multi-lapis terkompresi tinggi (memenuhi standar DIN EN 438-1) - Lapisan laminasi bertekstur halus (<i>slightly textured laminate coating</i>) - Resopal 0,8 mm di kedua sisi (memenuhi standar DIN 16926) - Warna abu-abu (RAL 7035) - Pelindung tepi tahan benturan (<i>solid impact-resistant protective edging</i>) berbahan plastik tebal 3 mm (Warna RAL 7047) - Bahan pelapis dan perekat bebas PVC (<i>PVC free</i>)
2.	Ketahanan Material	Tahan terhadap berbagai bahan kimia dan reagen (termasuk asam encer dan alkali), serta tahan terhadap panas (<i>resistant to heat</i>) terpusat
3.	Catu Daya Meja	Strip daya (<i>power strip</i>) dengan 6 soket keluaran yang dipasang di bawah meja,

Lanjutan Tabel 8.

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
		lengkap dengan kabel dan steker arde (<i>earthed plug</i>) 24 V DC / 6 A
4.	Catu Daya Internal (<i>Integrated power supply</i>)	
5.	Rangka Meja (<i>Frame</i>)	- Rangka kombinasi dari tabung persegi panjang (<i>rectangular tubing</i>) yang kokoh pada seluruh perimete - Lapisan resin epoksi tahan asam (<i>acid-resistant epoxy-resin coating</i>) setebal ± 80 μm, warna RAL 7047 - Bagian dasar dilengkapi 4 roda ganda putar (<i>swivelling double casters</i>), 2 di antaranya dilengkapi dengan rem penahan (<i>brakes</i>)
6.	Tiang Rangka Aluminium	- 2 batang aluminium ekstrusi dengan banyak rel/alur (<i>multiple grooves</i>), ukuran 1800 x 120 x 40 mm - 8 alur pemasangan berukuran sama pada tiang aluminium untuk menampung dudukan industri standar (<i>standard industrial mountings</i>) - 4 tiang aluminium berbentuk huruf H (<i>H-shaped aluminium profiles</i>), panjang 1150 mm, untuk penyusunan 3-lapis panel berukuran DIN A4 - Tersedia ruang untuk perluasan saluran catu daya (<i>extension of power supply duct</i>)
7.	Dimensi Fisik (T x L x D) / (<i>Dimensions</i>)	- Tinggi permukaan meja (<i>height of table top</i>): 760 mm - Dimensi total keseluruhan: 1250 x 1995 x 700 mm

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

8. Servo Machine Test Stand for 0.3kW Machines (CO3636-6V)



Gambar 18. Servo Machine Test Stand for 0.3kW Machines (CO3636-6V)

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

Tabel 9. Spesifikasi Servo Machine Test Stand for 0.3kW Machines (CO3636-6V)

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Kesesuaian Mesin	Dirancang untuk mesin listrik berkapasitas 0,3 kW
2.	Tegangan Sambungan (<i>Connection voltage</i>)	400 V AC, 45 – 65 Hz
3.	Daya Keluaran Maksimal (<i>Maximum power output</i>)	4 kVA
4.	Sistem Tampilan (<i>Displays</i>)	- Tampilan kecepatan dan torsi aktual (<i>speed and torque displays</i>) - Monitor operasi empat-kuadran (<i>four-quadrant monitor</i>)
5.	Dimensi Fisik (T x L x D) / (<i>Dimensions</i>)	297 x 460 x 420 mm
6.	Berat Beban (<i>Weight</i>)	13,3 kg

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

9. Komputer Dell Inspiron 20 3064

Berfungsi sebagai media untuk membuat *ladder diagram* dan merancang tampilan *display HMI* pada *software TIA Portal*.



Gambar 19. Komputer Dell Inspiron 20 3064

Sumber: Dell Inc. (2016).

Tabel 10. Spesifikasi Komputer Dell Inspiron 20 3064

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Arus <i>input</i> (maksimum)	1,70 A (65W), 2,5A (90W)
2.	Arus <i>output</i> (kontinu)	3,34 A (65W), 4,62 A (90W)
3.	Tegangan <i>Input</i>	100 VAC hingga 240 VAC
4.	Frekuensi <i>input</i>	50 Hz hingga 60 Hz
5.	Nilai tegangan <i>output</i>	19,50 VDC
6.	Kisaran suhu: Pengoperasian	0 °C hingga 40 °C (32 °F hingga 104 °F)
7.	<i>Prosesor</i>	Intel Core i3 Generasi ke-7
8.	Ram	4 Gb, 1 TB 5400
9.	Komunikasi (<i>Ethernet</i>)	Pengontrol <i>Ethernet</i> 10/100 Mbps terintegrasi pada <i>board</i> sistem
10.	Komunikasi: <i>Wireless</i> (Nirkabel)	- Wi-Fi 802.11ac - Wi-Fi 802.11b/g/n - <i>Bluetooth</i> 4.0

Sumber: Dell Inc. (2016).

10. Steker Listrik Sumber 3 Fasa (Lengrand 3P 16A)

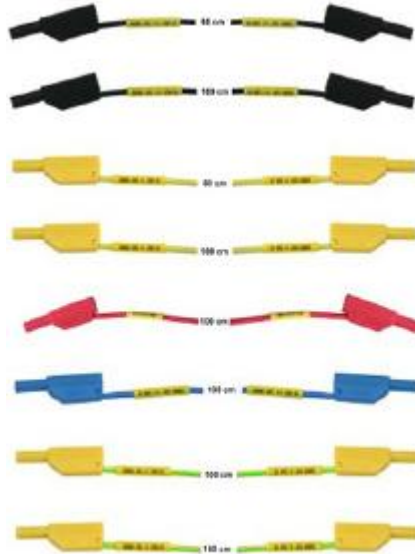
Berfungsi sebagai penghubung fisik yang aman antara sumber listrik jala-jala (stopkontak dinding 3-Fasa) menuju ke *Universal Power Supply*.

**Gambar 20.** Lengrand 3P 16A**Tabel 11.** Spesifikasi Lengrand 3P 16A

No	Kategori	Keterangan / Nilai Spesifikasi
1.	Konfigurasi Pin	3 Fasa, 1 Netral, 1 <i>Ground</i>
2.	Kapasitas Arus Maksimal	16 Ampere (16A)
3.	Tegangan Operasional	200-346V~ / 240-415V~ (AC)
4.	Posisi Pin <i>Ground</i>	6h (Posisi arah jam 6)

11. Kabel *Jumper* (*Set of Safety Measurement Cables, 4mm*)

Berfungsi sebagai kabel penghubung utama antar komponen. Dilengkapi selongsong pelindung khusus di ujungnya untuk mencegah risiko tersetrum atau korsleting saat alat dirangkai dalam keadaan bertegangan.



Gambar 21. Kabel *Jumper*

Sumber: Lucas-Nülle GmbH. (2015).

12. Kabel PROFINET (*Process Field Network*)

Merupakan kabel LAN/*Ethernet* yang berfungsi sebagai jalur komunikasi data digital yang berfungsi sebagai jalur untuk mentransfer (*download*) susunan program dari *software TIA Portal* ke dalam memori PLC, sekaligus sarana pemantauan jalannya logika *Ladder Diagram* secara langsung (*online monitoring*), serta berfungsi untuk mengirimkan data dari HMI ke memori PLC, dan secara bersamaan menarik data komputasi dari PLC untuk divisualisasikan kembali pada layar HMI secara real-time tanpa jeda.

13. *Tachometer* Digital (TL-900)

Sebagai alat ukur yang berfungsi untuk membaca kecepatan putaran mekanis aktual dari poros motor.

14. Laptop

Sebagai alat yang digunakan untuk menjalankan *software Microsoft Excel*

15. *Software TIA Portal*

Digunakan untuk membuat rancangan *ladder diagram* dan merancang tampilan visual yang akan di tampilkan pada *display* HMI.

16. *Software Microsoft Excel*

Digunakan untuk melakukan pengelolaan data yang diperoleh saat melakukan penelitian.

2.4 Variabel Penelitian

Untuk menjaga agar penelitian tetap terukur dan fokus pada tujuan penelitian, maka pada penelitian ini ditetapkan tiga jenis variabel operasional, yaitu:

1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah faktor yang sengaja dimanipulasi atau diubah-ubah dalam penelitian ini (Abdullah et al., 2023). Variabel bebas yang digunakan adalah nilai frekuensi *input* pada *Variable Frequency Drive*. Frekuensi akan diatur melalui antarmuka HMI dan diproses oleh PLC untuk dikirimkan ke VFD dengan rentang pengujian mulai dari 5 Hz hingga 50 Hz (0 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz, 30 Hz, 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz) menggunakan interval kenaikan sebesar 5 Hz.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah faktor yang diamati dan diukur untuk menentukan pengaruh dari variabel bebas (Siroj et al., 2024). Dalam penelitian ini, variabel terikat difokuskan pada tiga parameter kecepatan yang akan dibandingkan untuk menentukan tingkat presisi sistem, yaitu:

- Kecepatan secara teoritis (N_s): Nilai kecepatan ideal (sinkron) yang akan dihitung menggunakan rumus dasar motor induksi berdasarkan Persamaan (1.2) sebagai standar acuan kalkulasi.
- Kecepatan pada layar VFD: Nilai kecepatan putar yang akan ditampilkan oleh VFD Lenze sebagai bentuk respons elektronik sistem terhadap perintah frekuensi.
- Kecepatan aktual motor (N_r): Nilai kecepatan putaran poros rotor yang akan diukur secara langsung di menggunakan instrumen *tachometer* digital.

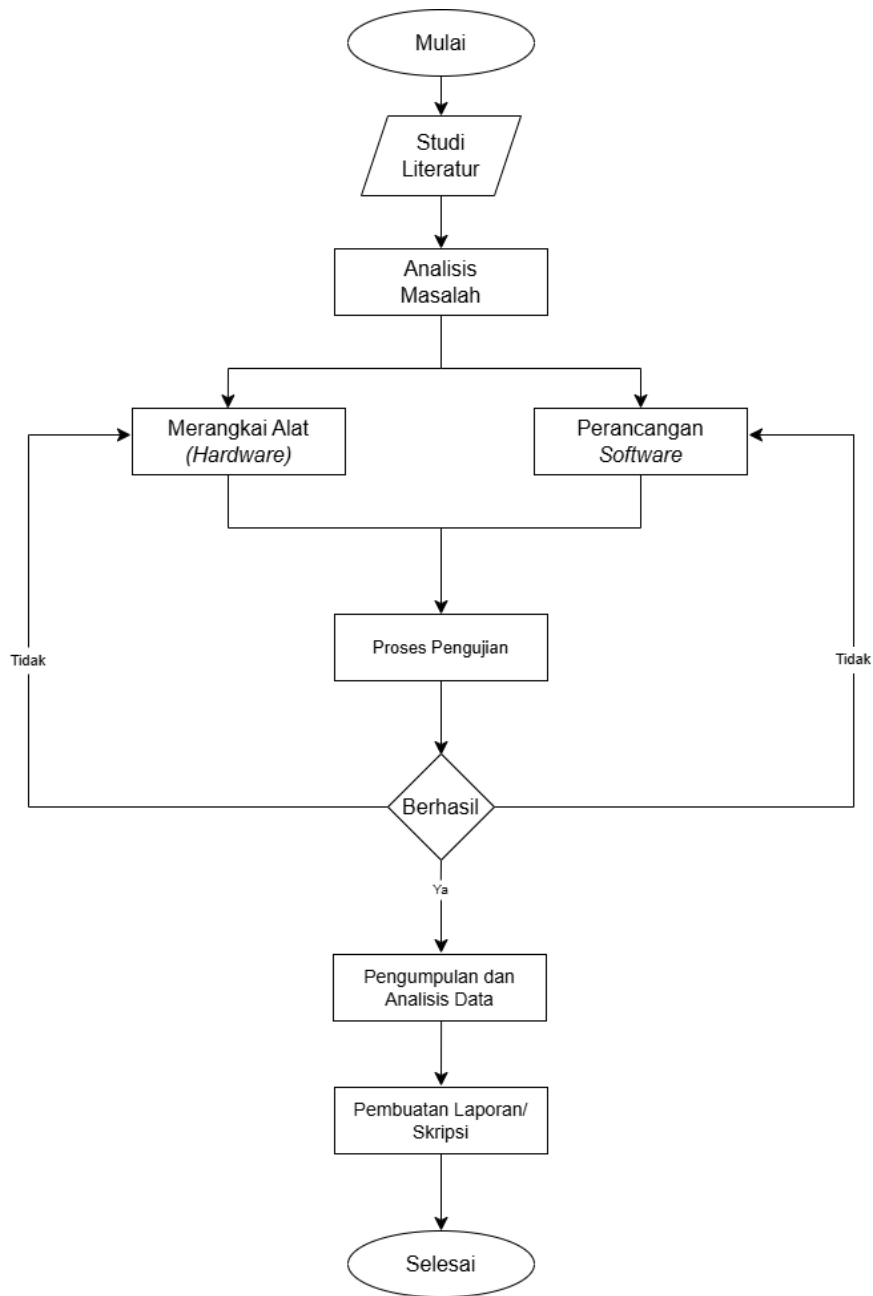
3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah faktor-faktor yang dijaga agar tetap konstan atau tidak berubah selama proses eksperimen berlangsung. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa perubahan pada variabel terikat benar-benar hanya disebabkan oleh perlakuan pada variabel bebas, bukan oleh gangguan faktor luar (Abdullah et al., 2023). Dalam penelitian ini, variabel kontrol yang ditetapkan meliputi:

- Kondisi pembebanan mekanik: Motor induksi 3 fasa dioperasikan pada kondisi tanpa beban luar (*no-load*) yang terhubung pada porosnya. Hal ini dilakukan untuk mengeliminasi pengaruh torsi beban yang dapat menyebabkan lonjakan arus dan penurunan kecepatan putar (*slip*) yang tidak terduga, sehingga akurasi perbandingan antara frekuensi dan kecepatan aktual tetap terjaga (Siroj et al., 2024).

2.5 Alur Penelitian

Gambar 22 menunjukkan alur penelitian (*Flowchart*), mulai dari tahap awal hingga akhir.



Gambar 22. Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan Gambar 22, penjelasan rinci dari setiap bagian pada gambar dijelaskan sebagai berikut:

1. Mulai

Tahapan penelitian diawali dengan menentukan topik dan ruang lingkup permasalahan terkait kendali motor induksi di industri.

2. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan kajian pustaka dengan mencari referensi dari buku, jurnal, dan *data sheet* alat yang akan digunakan. Fokus tahap ini adalah memahami teori dasar dan memperkuat landasan teori mengenai motor induksi, prinsip kerja *Variable Frequency Drive* Lenze 8400 dan teknik pemrograman *Programmable Logic Controller* Siemens S7-300 serta mendalami teknik konfigurasi *Human Machine Interface* pada *software TIA Portal*, khususnya cara membuat desain tombol dan menghubungkan (*tagging*) variabel HMI ke PLC agar HMI dapat berfungsi sebagai alat pemberi perintah yang aktif.

3. Analisis Masalah

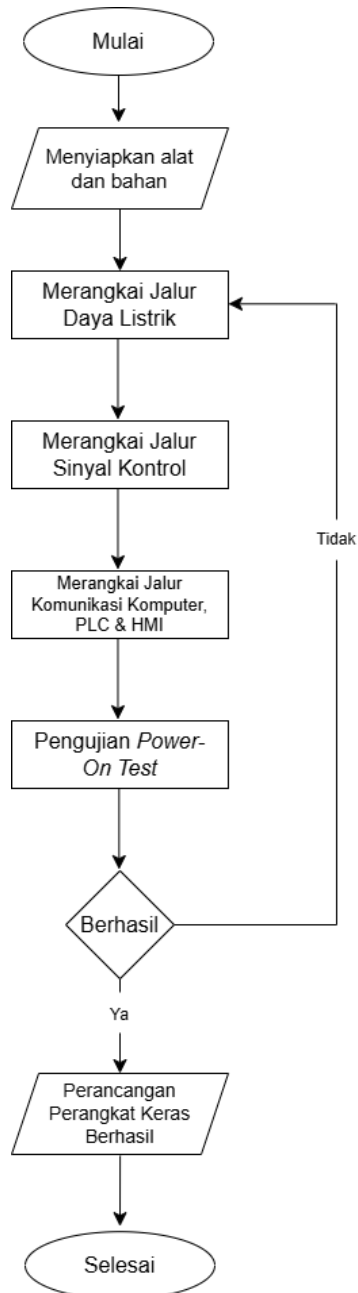
Setelah memahami landasan teori, penulis melakukan analisis mendalam terhadap permasalahan yang melatarbelakangi penelitian. Isu utama yang diidentifikasi adalah risiko ketidakpastian akurasi pada sistem kendali otomatis. Meskipun integrasi PLC dan VFD memungkinkan pengaturan kecepatan, sering kali terjadi deviasi antara nilai perintah (*setpoint*) dengan kecepatan aktual di lapangan yang tidak terdeteksi. Kondisi ini memiliki urgensi tinggi untuk diteliti, karena jika HMI digunakan sebagai pengganti tombol manual tanpa adanya validasi akurasi, risiko kesalahan proses produksi hingga kerusakan mesin akibat penyimpangan kecepatan menjadi sangat besar. Oleh karena itu, analisis linearitas sistem menjadi langkah krusial yang harus dilakukan.

4. Perancangan Sistem

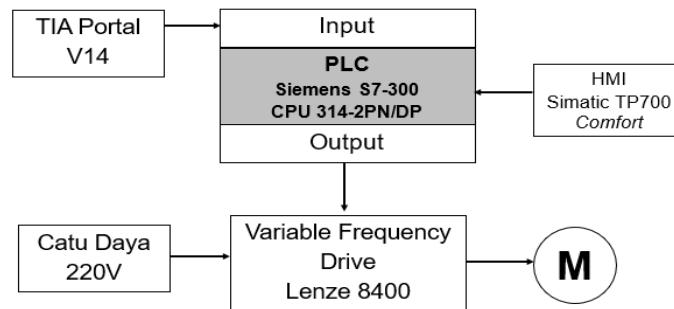
Tahap perancangan sistem dibagi menjadi dua proses yang saling berkaitan:

- Perancangan perangkat keras (*hardware*): Pada tahap ini dimulai dengan menyiapkan alat dan bahan berupa komponen utama serta modul yang akan digunakan (Komputer, PLC, HMI, VFD dan motor induksi 3 fasa), kemudian dilakukan perangkaian kabel untuk jalur daya listrik (dari sumber PLN ke VFD, PLC, HMI, komputer lalu ke motor) serta jalur sinyal kontrol (dari modul *output* PLC yang diintegrasikan dengan HMI ke terminal *input* VFD). Selanjutnya merangkai jalur komunikasi dari komputer menuju ke PLC kemudian dari PLC menuju ke HMI menggunakan kabel POFINET. Proses perancangan perangkat keras ini berhasil apabila semua alat dapat menyala tanpa ada gangguan seperti *short circuit*, jika terjadi gangguan atau alat tidak menyala dengan baik, maka proses perancangan perangkat keras harus diulang untuk mengatasi gangguan yang terjadi. Karena alat yang digunakan terdiri dari beberapa modul maka Gambar 23 menunjukkan secara umum rancangan perangkat keras yang akan digunakan. Berdasarkan Gambar

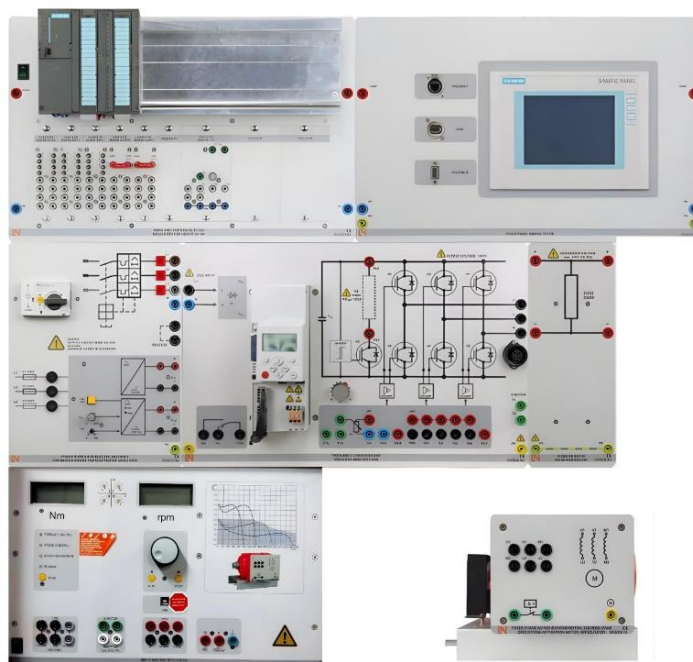
24, menunjukkan adanya beberapa alat yang akan digunakan dalam penelitian ini, Gambar 25 menunjukkan gambaran susunan perangkat keras yang akan digunakan. Secara rinci proses perancangan perangkat keras (*hardware*) ditunjukkan pada gambar 23.



Gambar 23. Diagram Alir Perancangan Perangkat Keras



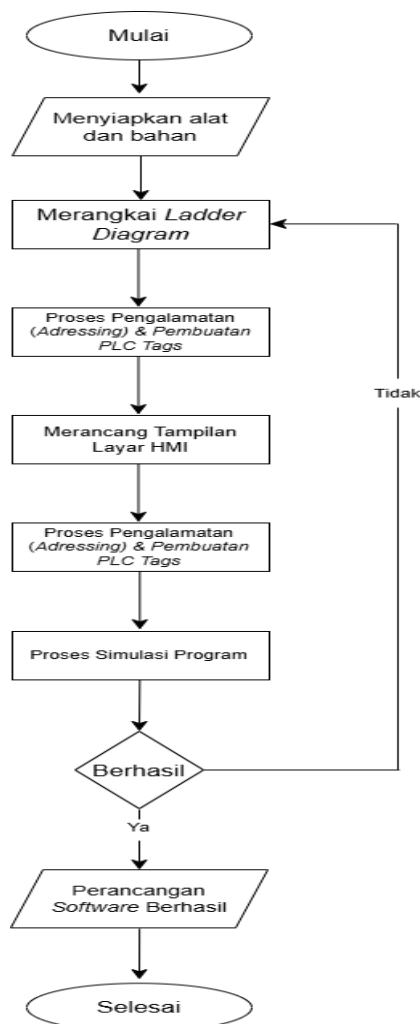
Gambar 24. Diagram Umum Rancangan Sistem



Gambar 25. Rancangan Susunan Perangkat Keras

- Perancangan perangkat lunak (*software*): Pada tahap ini diawali dengan menyiapkan alat dan bahan berupa komputer dan *software* TIA Portal yang akan digunakan untuk merangkai *ladder diagram*. Pada *software* TIA Portal dilakukan penyusunan logika kendali menggunakan bahasa *ladder diagram* untuk menerjemahkan *input* tombol dari HMI menjadi sinyal referensi frekuensi yang akan dikirimkan ke VFD, di mana dalam proses perancangan *ladder diagram* dilakukan pula proses pengalamatan berdasarkan *input* dan *output* PLC untuk diintegrasikan dengan HMI dan juga VFD. Pengalamatan tersebut dilakukan dengan

membuat PLC *Tag*. Selain itu, dilakukan pula perancangan antarmuka grafis yang memuat tombol operasi utama yaitu tombol *start*, *stop* dan tombol pilihan frekuensi (5 Hz hingga 50 Hz) melalui *software* TIA *Portal*. Perancangan tombol tersebut kemudian dialamatkan sesuai dengan PLC *Tag* yang di buat berdasarkan *ladder diagram*, sehingga akan di buat HMI *Tag* untuk melihat semua pengalamatan tombol pada HMI berdasarkan rangkaian *ladder diagram*. Proses perancangan perangkat lunak ini berhasil apabila saat dilakukan simulasi semua logika *ladder diagram* pada TIA *Portal* sudah bekerja sesuai dengan kebutuhan. Jika terdapat kesalahan maka proses ini perlu diulang dengan meperhatikan kembali *ladder diagram* yang telah dirancang. Secara rinci proses perancangan *software* ditunjukkan pada Gambar 26.



Gambar 26. Diagram Alir Perancangan *Software*

5. Proses Pengujian

- Proses *Download* Program dan Integrasi HMI

Pada tahap ini, program yang telah dirancang diunduh (*download*) ke dalam CPU PLC dan dilakukan proses integrasi antara PLC dengan HMI melalui *software* TIA *Portal*. Tahapan ini berhasil apabila saat melakukan *compile* program, tidak terdapat *error* pada *ladder diagram* yang telah dirancang dan *tag* HMI yang diatur pada TIA *Portal* tidak terdapat *error* sesuai dengan *ladder diagram* sehingga PLC dan HMI dapat terintegrasi dengan baik.

- Proses Pengujian Integrasi Alat

Pada tahap ini, apabila PLC sudah terintegrasi dengan HMI (tidak terdapat *error* pada rancangan program) dan alat sudah menyala serta terhubung tanpa ada gangguan, maka proses pengujian dilakukan dengan menekan tombol pada layar HMI. Jika motor berputar dan merespon perintah dengan baik, maka proses pengujian berhasil. Namun, jika motor tidak merespon atau terjadi kesalahan, maka perlu dilakukan proses perbaikan pada perancangan sistem yaitu pada perancangan perangkat keras (*hardware*) dan juga perancangan program (*software*).

6. Pengumpulan/ Analisis Data

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data kemudian dilakukan analisis data yang telah diperoleh.

- Pengambilan data diawali dengan memberikan perintah *setpoint* frekuensi melalui tombol HMI (dimulai dari 5 Hz hingga 50 Hz). Kemudian mencatat kecepatan aktual yang dialami oleh motor induksi sebagai objek penelitian. Proses tersebut diulang dengan menaikkan frekuensi secara bertahap (interval 5 Hz) dari 5 Hz hingga mencapai batas maksimum 50 Hz, sesuai tombol yang telah dirancang pada layar HMI.
- Selanjutnya dilakukan analisis data. Data yang diperoleh kemudian diolah untuk menjawab rumusan masalah. Analisis dilakukan dengan selisih antara kecepatan sinkron teoritis dan kecepatan aktual serta melakukan uji regresi linier untuk memvalidasi karakteristik hubungan antara *input* HMI dan respon motor.

7. Pembuatan Laporan/ Skripsi

Setelah data telah terkumpul dan analisis data sudah dilakukan, maka tahap selanjutnya ialah membuat laporan/ skripsi berdasarkan data yang telah diperoleh dan menarik kesimpulan serta membuat saran untuk penelitian mendatang.

8. Selesai