

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penyusun melakukan telaah terhadap referensi yang memiliki keterkaitan terhadap Tugas Akhir yang dibuat yaitu berjudul “Kendali Kecepatan Motor Induksi Menggunakan *Variable Speed Drive* Berbasis SOFT PLC” oleh Rizaldy dkk. Dalam penulisan tersebut dilakukan pengendalian kecepatan motor listrik 1 fasa dan 3 fasa yang diterapkan pada penggunaan conveyor dengan menggunakan soft PLC dan dihasilkan bahwa hampir 100% tingkat keberhasilan telah didapatkan dalam melakukan pengendalian start-stop motor DC pada miniatur conveyor[10].

Selanjutnya pada jurnal berjudul “Studi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan *Variable Speed Drive* (VSD) Berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) oleh Rangkuti dkk. Dengan menggunakan VSD ATV12H075M2 yang telah disesuaikan dengan *nameplate* pada motor yang digunakan serta dengan PLC TM221CE16R menghasilkan bahwa penerapan pada motor induksi 3 fasa didapatkan hasil ketika tidak terkopel dengan beban dan berada pada frekuensi 50 Hz menghasilkan 2802 rpm dan pada frekuensi 30 Hz menghasilkan 1681 rpm sedangkan ketika terkopel dengan beban didapatkan 1434 rpm pada frekuensi 25,6 Hz[11].

Selanjutnya, pada jurnal berjudul “Sistem Monitoring Kendali Motor Induksi 3 Fasa Dengan *Variable Speed Drive* Berbasis PLC dan SCADA” oleh Yusnan Badruzzaman dengan *inverter altivar 61 type ATV61HU22N4* dan PLC Twido TWDLMDA20DTK. Dengan menggunakan *software* TWIDOSUITE V2.30 dan SCADA VIJEO CITECT v.7.2 yang berfungsi dalam melakukan kontrolling dan monitoring. Dalam penelitian ini didapatkan hasil bahwa motor induksi tiga fasa dapat diatur kecepatannya dengan alat *Variable Speed Driver (Inverter)* dengan rentang yang sangat luas sebesar 0 – 50 Hz, sistem komunikasi dengan protokol Modbus antara PLC dengan Inverter menggunakan kabel RJ 45[12].

Bentuk pengembangan ide yang penyusun lakukan sebagai Tugas Akhir dengan melakukan pengembangan terhadap referensi tersebut untuk memberikan peningkatan bahan literatur pengatur kecepatan motor dengan menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC) Schneider Modicon M221 Relay *Ethernet* TM221CE16R serta *Inverter Variable Speed Drive* (VSD) Schneider ATV320U15M3C 1.5kW 200 to 240V 3 Fasa dan *Visual Studio* sebagai peningkatan pada tampilan *Human-Machine Interface* (HMI). Dalam hal ini motor listrik yang digunakan dengan kapasitas 1 HP (*Horse Power*) yang setara dengan 0,75kW.

Berdasarkan tinjauan tersebut penyusun melakukan Tugas Akhir berjudul “RANCANG BANGUN TRAINER PENGATUR KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 FASA BERBASIS PLC SCHNEIDER TM221 DAN VSD ALTIVAR ATV320”.

2.2 Landasan Teori

Pada bagian landasan teori akan dijelaskan mengenai dasar-dasar teori yang memiliki keterkaitan dengan komponen-komponen yang penyusun gunakan dalam melakukan pembuatan alat. Penjelasan ini diberikan sebagai bahan literatur yang secara mendasar untuk dipahami dalam melakukan rancangan terhadap pembuatan suatu alat.

2.2.1 *Programmable Logic Controller* (PLC) Schneider Modicon M221 Relay *Ethernet* TM221CE16R

PLC Modicon merupakan salah satu jenis PLC keluaran Schneider terbaru yang dirancang sebagai pengendali suatu sistem otomasi dengan berbagai kemudahan-kemudahan yang diberikan sebagai keunggulan dari jenis ini. PLC Schneider Modicon M221 Relay *Ethernet* TM221CE16R banyak digunakan dalam aplikasi industri karena memiliki ukuran yang ringkas, mudah dioperasikan, serta mampu menjalankan fungsi kontrol secara andal pada berbagai proses otomatisasi.

PLC ini dilengkapi dengan 16 input/output (I/O) digital yang dapat digunakan untuk menerima sinyal masukan dari perangkat sensor maupun memberikan sinyal keluaran untuk mengendalikan aktuator seperti relay, motor, dan perangkat kontrol lainnya. Selain itu, PLC Modicon TM221CE16R juga memiliki 2 input analog yang memungkinkan pembacaan sinyal analog, misalnya dari sensor suhu, tekanan, atau parameter lain yang bersifat kontinu. Dengan kombinasi I/O digital dan analog tersebut, PLC ini dapat digunakan dalam sistem kendali yang lebih fleksibel dan sesuai dengan kebutuhan otomasi modern.

Keunggulan lain dari PLC Modicon ini adalah adanya komunikasi *Ethernet* yang digunakan sebagai media komunikasi antara PLC dengan komputer maupun jaringan industri. Fitur *Ethernet* tersebut mendukung proses pemrograman, monitoring sistem, serta pertukaran data secara cepat dan efisien, sehingga PLC dapat diintegrasikan dalam sistem kontrol berbasis jaringan.

PLC Modicon merupakan PLC yang dapat dijadikan sebagai sistem kendali standar dengan menggunakan instruksi-instruksi dasar seperti logika dasar, gerakan (motion), operasi aritmatika, serta instruksi perbandingan. Instruksi tersebut memungkinkan PLC menjalankan berbagai fungsi kontrol otomatis sesuai dengan program yang telah dirancang oleh pengguna.

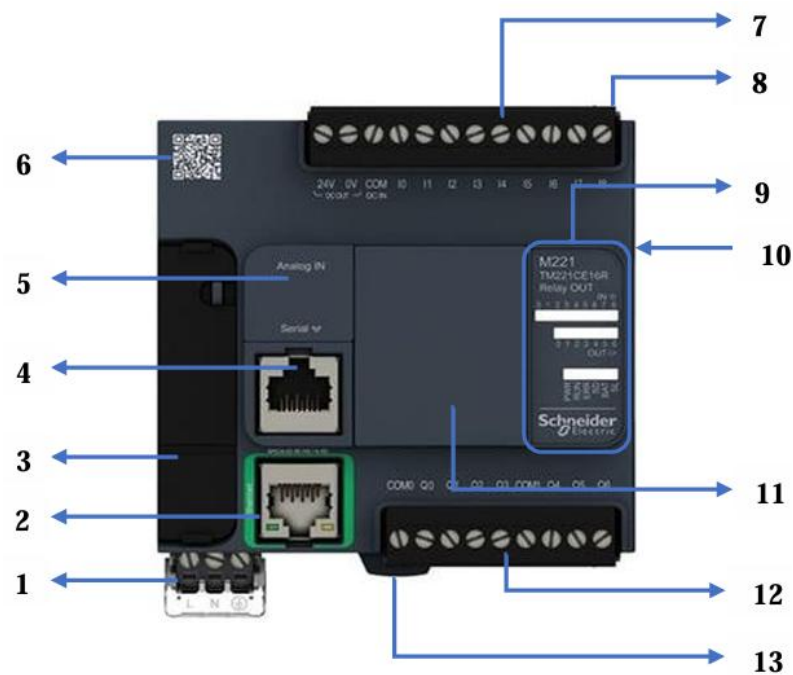
Perangkat lunak yang digunakan untuk pemrograman PLC Modicon ini ialah SoMachine Basic. Software ini berfungsi untuk melakukan konfigurasi perangkat, pembuatan program ladder diagram, serta pengujian sistem kendali secara terstruktur. Gambar 2.1 menunjukkan bentuk fisik dari PLC Modicon TM221CE16R[13].



Gambar 2. 1 PLC Modicon TM221CE16R[13]

2.2.1.1 Bagian *Programmable Logic Controller (PLC)* Schneider Modicon M221 Relay *Ethernet* TM221CE16R

Berikut merupakan bagian PLC Schneider TM221CE16R yang ditampilkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Bagian PLC Schneider TM221CE16R[13]

Pada gambar 2.2 menunjukkan tampilan fisik dari *Programmable Logic Controller (PLC)* Schneider Modicon M221 TM221CE16R. Pada gambar terlihat bagian-bagian utama PLC yang terdiri dari terminal catu daya, port komunikasi *Ethernet* untuk koneksi dengan komputer atau jaringan, port serial, serta terminal input dan output digital yang digunakan untuk menghubungkan sensor maupun aktuator. Selain itu, terdapat indikator status operasi dan label spesifikasi perangkat yang menunjukkan tipe PLC serta konfigurasi keluarannya. PLC ini dirancang untuk mendukung sistem otomasi industri dengan komunikasi berbasis *Ethernet* dan jumlah I/O yang memadai. Penjelasan bagian-bagian PLC ditampilkan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Deskripsi PLC Schneider TM221CE16R[13]

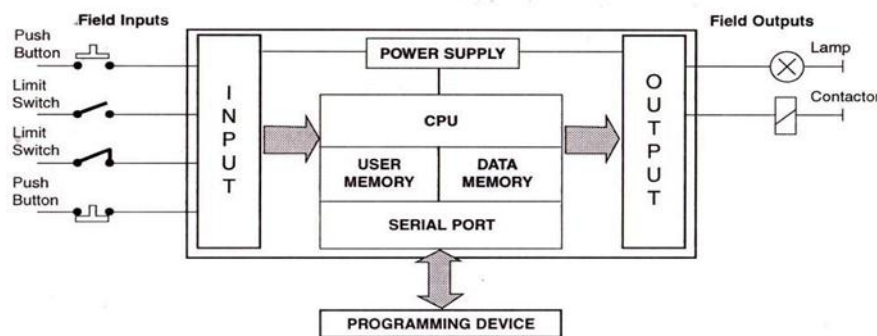
No	Deskripsi
1	<i>Power supply</i>
2	<i>Ethernet Port / RJ45 Connector</i>
3	<i>Behind the removable cover:</i> <i>a. USB mini-B connector for connecting a PC equipped with the SoMachine Basic software</i> <i>b. Slot for the SD memory card</i> <i>c. Run/Stop switch</i>
4	<i>Serial link port (RS 232 or RS 485): RJ 45 connector.</i>
5	<i>Behind a cover: dedicated removable connector for two analog inputs.</i>
6	<i>Controller technical documentation QR code</i>
7	<i>Connection of 24 V</i>
8	<i>On top of the controller: slot for backup battery</i>
9	<i>LED display block showing:</i> <i>a. the status of the controller and its components (battery, SD memory card)</i> <i>b. the status of the serial link</i> <i>c. the status of the I/O</i>
10	<i>On the side of the controller: TM3 bus connector for the link with a Modicon TM3 expansion module</i>
11	<i>Slot(s) for I/O cartridge(s), communication cartridge or application cartridge(s): one on M221 controllers with 16 and 24 I/O, two on M221 controllers with 40 I/O.</i>
12	<i>Connection of relay/transistor logic outputs: on removable screw terminal blocks</i>
13	<i>Clip for locking on 5 symmetrical rail.</i>

2.2.1.2 Prinsip Kerja *Programmable Logic Controller* (PLC) Schneider Modicon M221 Relay *Ethernet* TM221CE16R

PLC merupakan alat pengendali yang dapat memproses *input* kemudian dapat mengeksekusi *output*. PLC menggunakan program yang dapat dirancang menggunakan berbagai pemodelan program sehingga pemrogram dapat mengatur sistem kerja alat yang dikendalikan (*aktuator*). Secara umum, cara kerja sistem PLC cukup sederhana, yaitu:

1. PLC mendapatkan sinyal dari *input device*. *Input device* adalah benda fisik yang memicu eksekusi logika/program pada PLC. Contoh: saklar dan sensor.
2. PLC mengerjakan logika program yang telah dibuat yang ada di dalamnya.
3. PLC memberikan sinyal *output* pada *output device*. *Output device* adalah benda fisik yang diaktifkan oleh PLC sebagai hasil eksekusi program. Contohnya, motor DC, motor AC, solenoid, dll.

Interface (antarmuka) pada PLC memungkinkan perangkat dihubungkan tanpa memerlukan relay tambahan, sehingga instalasi sistem kontrol menjadi lebih sederhana dan efisien. PLC juga mampu bekerja secara otomatis sesuai program yang telah dirancang, sehingga dapat sesuai untuk digunakan dalam aplikasi industri yang membutuhkan pengendalian proses secara berkelanjutan. Keunggulan PLC terletak pada fleksibilitas pemrograman, kemudahan modifikasi logika kerja, dan keandalan operasinya. Dengan demikian, PLC berperan sebagai pusat pengendali penerima sinyal input, memproses berdasarkan program, dan menghasilkan output. Diagram prinsip kerja PLC ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja PLC[13]

PLC terdiri dari input device dan output device. Input device berfungsi untuk memberikan sinyal masukan ke PLC, seperti sensor atau saklar, sedangkan output device berfungsi sebagai perangkat yang dikendalikan oleh PLC, seperti motor, lampu, atau solenoid. Selain itu, PLC juga terhubung dengan PC atau komputer untuk kebutuhan pemrograman, konfigurasi, serta monitoring sistem. Proses komunikasi ini umumnya menggunakan RS232 serial port, namun beberapa tipe PLC modern juga telah mendukung koneksi melalui miniUSB maupun *Ethernet* sehingga pemrograman dan pertukaran data dapat dilakukan dengan lebih cepat dan fleksibel. Secara umum PLC terbagi dalam beberapa komponen berikut:

1. Catu Daya

Catu daya diperlukan untuk mengkonversi tegangan sumber AC menjadi tegangan rendah DC yang dibutuhkan oleh processor dan rangkaian-rangkaian di dalam modul-modul antarmuka *input* dan *output*.

2. Processor

Processor adalah unit yang menginterpretasikan atau mengolah sinyal input dan melaksanakan tindakan-tindakan pengontrolan, sesuai dengan program yang tersimpan dalam memori, lalu mengkomunikasikan keputusan-keputusan yang diambilnya sebagai sinyal-sinyal kontrol ke antarmuka *output*.

3. Memori

Memori adalah tempat dimana program tersimpan. Biasanya unit memori terdiri dari RAM, EPROM, EEPROM.

4. *Input* dan *Output* Modul

Unit *input* adalah unit yang memberikan sinyal masukan ke dalam CPU. Unit *output* adalah unit yang mengirimkan sinyal hasil pengolahan data CPU ke bagian beban, misalnya relai, lampu, dan lain-lain. Modul *input/output* ini bisa juga tersedia dalam modul eksternal dari PLC sehingga PLC dapat ditambahkan jumlah *input/output*nya.

5. *Programming Device*

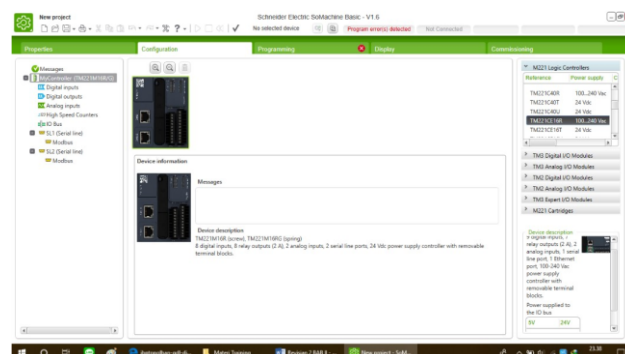
Digunakan untuk memasukkan program yang akan difungsikan yang disimpan ke dalam memori. Program tersebut dibuat dengan menggunakan perangkat ini, kemudian dipindahkan ke dalam unit memori PLC.

2.2.2 EcoStruxure™ Machine Expert (SoMachine)

SoMachine Basic merupakan perangkat lunak PLC yang digunakan untuk mengkonfigurasi, dan mengkomunikasikan seluruh alat yang tersambung dalam jaringan perangkat lunak tersebut termasuk logika, kontrol, HMI, dan jaringan yang terkait dengan fungsi otomatisasi. *SoMachine Basic* mempunyai fungsi-fungsi untuk memudahkan pengguna dalam menggunakannya serta dapat menghemat waktu pembuatan. *SoMachine Basic* memiliki beberapa kelebihan diantaranya adalah[13]:

1. Dapat meningkatkan efisiensi dengan kinerja yang *flexible* dan *scalable*. Software ini dapat dilakukan pergantian *controller* satu dengan *controller* lainnya, sementara dapat tetap mempertahankan logika dan konfigurasi. Beberapa versi *SoMachine* dapat berjalan secara paralel dalam sebuah sistem serta dapat membantu memastikan kompatibilitas.
2. *Vijeo-Designer* dapat mengkonfigurasi dan mengkomunikasikan alat untuk perangkat kontrol gerak, IEC 61131-3 bahasa, mengintegrasikan konfigurasi fieldbus, ahli diagnosis, dan men-debug. Beberapa kemampuan lainnya ialah untuk pemeliharaan dan visualisasi termasuk web visualization.
3. Saat mesin mulai bekerja, maka *SoMachine* juga telah siap bekerja untuk menyediakan data yang sebenarnya pada PC maupun HMI. Sehingga software dapat menyederhanakan integrasi dan pemeliharaan.

Berikut tampilan *software SoMachine Basic* yang disajikan pada gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Tampilan Software SoMachine Basic[13]

2.2.3 *Inverter Variable Speed Drive (VSD) Schneider ATV320U15M3C 1.5kW 200 to 240V 3 Fasa*

Variable Speed Drive (VSD) merupakan suatu perangkat elektronika daya yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor listrik arus bolak-balik (AC)[14][15] dengan cara mengatur frekuensi serta tegangan daya listrik yang dipasang ke motor. Perangkat ini banyak diterapkan dalam sistem industri modern karena mampu memberikan pengaturan kecepatan motor secara fleksibel dan efisien sesuai kebutuhan beban. VSD mengontrol kecepatan motor induksi dengan mengubah frekuensi dari sumber listrik (grid) menjadi nilai yang dapat disesuaikan pada sisi motor. Dengan demikian, motor listrik dapat dengan cepat dan mudah menyesuaikan putaran sesuai kecepatan yang diinginkan, tanpa memerlukan metode kontrol konvensional seperti throttle atau katup mekanik yang cenderung kurang efisien.

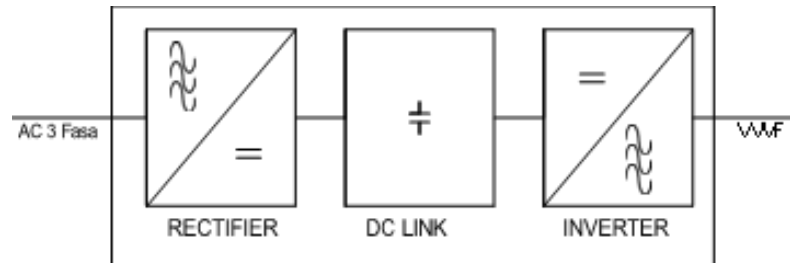
Secara prinsip, VSD bekerja melalui beberapa tahapan, yaitu penyearahan tegangan AC menjadi DC, kemudian mengubah kembali tegangan DC tersebut menjadi AC dengan frekuensi yang dapat diatur. Dua fungsi utama dari variabel frekuensi drive adalah melakukan konversi listrik dari satu frekuensi ke frekuensi lainnya, serta mengontrol frekuensi keluaran yang diberikan ke motor. Pengaturan frekuensi ini secara langsung memengaruhi kecepatan putar motor, sehingga proses pengendalian dapat dilakukan secara presisi.

Aplikasi VSD digunakan mulai dari peralatan berkapasitas kecil hingga sistem industri berskala besar, seperti pengaturan pabrik tambang, kompresor, serta sistem ventilasi pada bangunan besar. Selain itu, VSD juga banyak digunakan pada pompa, conveyor, blower, dan berbagai alat pengendali mesin lainnya yang membutuhkan pengaturan kecepatan variabel.

Penggunaan variabel frekuensi drive pada motor tidak hanya meningkatkan fleksibilitas operasi, tetapi juga mampu menghemat energi secara signifikan. Hal ini karena motor dapat bekerja sesuai kebutuhan beban tanpa pemborosan daya, sehingga konsumsi listrik dapat ditekan dan biaya operasional menjadi lebih rendah[16].

2.2.3.1 Prinsip Kerja *Inverter Variable Speed Drive* (VSD)

Prinsip kerja dari variabel speed drive yang sederhana adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 5 Blok Diagram Variabel Speed Drive 3[16]

Gambar 2.5 merupakan blok diagram yang menunjukkan cara kerja variabel speed drive.

1. Tegangan yang masuk dari jala- jala 220/380 volt dan frekuensi 50 hz merupakan tegangan arus bolak- balik (AC) dengan nilai tegangan dan frekuensi yang konstan. Kemudian dialirkan ke board *Rectifier* atau penyearah DC. Jadi dari AC di jadikan DC. Jika penyearah yang digunakan adalah penyearah terkendali, maka tegangan DC nya bisa diatur (variabel).
2. Untuk meratakan tegangan DC, maka tegangan dimasukkan ke DC link. Komponen yang terdapat pada DC link berupa kapasitor atau induktor.
3. Tegangan DC kemudian diumpankan ke rangkaian *inverter* untuk dijadikan AC kembali dengan frekuensi sesuai kebutuhan. Jadi dari tegangan DC diubah kembali ke tegangan AC 3 fasa. komponen *switching*-nya adalah semikonduktor aktif seperti IGBT atau mosfet.

Tegangan keluaran dari VSD berupa tegangan dan frekuensi yang bisa diatur sehingga disebut VVVF (*variabel voltage variabel frekuensi*). Dengan kemampuan ini, motor induksi dapat beroperasi pada kecepatan yang bervariasi sesuai kebutuhan dan memberikan keuntungan berupa pengaturan motor yang lebih halus saat start maupun stop sehingga dapat mengurangi lonjakan arus awal dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

2.2.3.2 Operasi *Variable Speed Drive* (VSD)

Variable speed drive mempertahankan nilai tegangan keluaran ke- frekuensi (V/F) dengan nilai rasio konstan pada semua kecepatan untuk alasan yang berikut. Tegangan fasa (V), frekuensi (F) dan fluks magnetik(Φ) motor terkait dengan persamaan:

$$V = 4,444 f N \Phi_m \quad (2.1)$$

$$V/f = 4.444 N \Phi_m \quad (2.2)$$

Dimana :

N = jumlah lilitan stator berubah per fase.

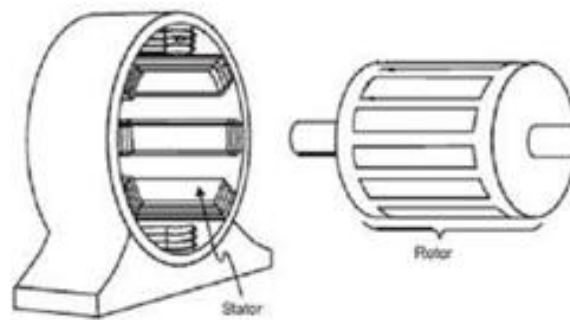
Φ_m = fluks magnetik

Jika tegangan yang sama diterapkan pada frekuensi yang berkurang, maka fluks magnetik akan meningkat dan menjenuhkan inti magnetik, secara signifikan mendistorsi kinerja motor sehingga bekerja pada daerah yang tidak sesuai dengan perancangannya. Saturasi magnetik dapat dihindari dengan menjaga konstan Φ_m sesuai dengan perancangannya sebagaimana rumus 2.2. Selain itu, torsi motor dihasilkan dari fluks stator dan arus rotor. Untuk mempertahankan nilai torsi, maka harus menjaga rating nilai pada fluks, yang dilakukan dengan menjaga tegangan ke-frekuensi (V/F) rasio konstan. Untuk itu dibutuhkan penurunan dari tegangan motor dalam proporsi yang sama dengan frekuensi untuk menghindari kejenuhan magnetik. Pengendalian VSD dengan metode kendali volt/ hertz konstan kontrol ini menggunakan sistem loop terbuka dengan bentuk yang sederhana mengambil perintah referensi dari sumber luar yaitu dari potensiometer. Prinsip kerjanya adalah ketika fluks stator dijaga konstan, torsi yang dihasilkan tidak bergantung pada suplai frekuensi. Atau dalam kata lain kecepatan motor sangat bergantung pada frekuensi. Untuk menjaga fluks dalam kondisi konstan, bekerja pada rating level tertentu. Tegangan stator harus dapat diatur secara proporsional terhadap suplai frekuensi. Pada operasi kecepatan rendah, tegangan jatuh pada resistansi stator harus dimasukkan dalam hitungan fluks konstan, dan tegangan stator harus

dinaikkan secara tepat. Jika motor diputar dengan frekuensi yang lebih tinggi daripada frekuensi dasarnya, mengakibatkan pengurangan terhadap torsi yang dihasilkan, sehingga menyebabkan arus magnetisasi berkurang dan mengakibatkan melemahnya medan magnet[16].

2.2.4 Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak-balik (AC) yang paling banyak digunakan. Motor induksi tiga fasa beroperasi pada sistem tiga fasa, dan banyak digunakan dalam berbagai bidang industri dengan kapasitas yang besar. Bentuk gambaran motor induksi tiga fasa diperlihatkan oleh gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Motor Induksi 3 Fasa[16]

Penamaan motor induksi berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi memiliki konstruksi yang sederhana, kuat, serta tidak memerlukan sistem komutator seperti pada motor DC. Hal ini menyebabkan motor induksi lebih mudah dalam perawatan dan memiliki tingkat keandalan yang tinggi untuk penggunaan jangka panjang. Selain itu, motor induksi tiga fasa memiliki efisiensi yang baik dan mampu menghasilkan torsi yang besar sehingga cocok digunakan untuk beban industri. Oleh karena itu, motor induksi banyak diaplikasikan pada pompa, kipas, konveyor, kompresor, dan berbagai peralatan industri lainnya.

2.2.4.1 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Pada saat terminal tiga fasa stator motor induksi diberi suplai tegangan tiga, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul emf (GGL) atau tegangan induksi dan mengalir-lah arus pada kumparan rotor karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian tertutup. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan pergerakan medan induksi stator. Medan putar stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan relatif antara stator dan rotor dinamakan slip. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi, bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun[16].

Motor induksi 3-fasa biasanya mempunyai kumparan 3-fase identik yang terpisah satu sama lain sebesar 120 derajat listrik. Motor ini biasanya beroperasi dengan menggunakan sistem 3-fasa. Secara konstruksi, bentuk kumparan motor ini dapat dimodelkan. Kumparan motor induksi 3-fasa dapat dihubungkan dalam sistem pengoperasiannya sebagai hubungan bintang dan hubungan delta[17].

Besarnya kecepatan medan putar stator dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.3)$$

dimana,

n_s = kecepatan sinkron/ medan putar (rpm)

f = frekuensi sumber daya (Hz)

P = jumlah kutub motor induksi

2.2.4.2 Torsi Motor Induksi Tiga Fasa

Torsi berhubungan dengan kemampuan motor untuk mensuplai beban mekanik. Oleh karena itu (T) secara umum dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T = \frac{P}{V_r} \quad (2.4)$$

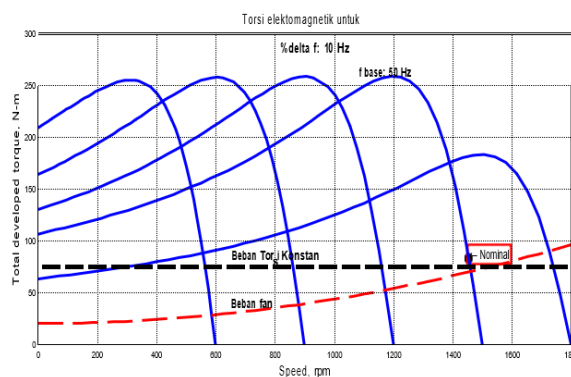
Dimana:

T = Torsi

P = Daya

V_r = kecepatan sudut (mekanik) dari rotor.

Hubungan torsi dengan perubahan frekuensi, perubahan beban ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Kurva Hubungan Torsi dengan Variabel Frekuensi[16]

Pada gambar 2.7 dapat dilihat sebuah grafik yang menunjukkan pengaturan motor induksi bahwa:

- 1) Dengan merubah frekuensi, maka kecepatan motor induksi-pun berubah. Semakin besar nilai frekuensi, semakin cepat putarannya.
- 2) Pada frekuensi nominal dan frekuensi dibawah nominalnya-nya, nilai torsi akan konstan walaupun bebannya berubah. Tetapi frekuensi diatas nominal-nya, maka nilai torsi akan turun.

2.2.5 Alat Ukur *Tachometer*

Tachometer merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur kecepatan putaran atau rotasi suatu objek, seperti poros motor, mesin, turbin, dan peralatan mekanik lainnya. Hasil pengukuran kecepatan putaran tersebut umumnya dinyatakan dalam satuan *Revolutions Per Minute* (RPM) atau putaran per menit[18]. Tachometer banyak digunakan dalam bidang industri, otomotif, dan laboratorium untuk mengetahui performa suatu mesin serta memastikan bahwa mesin bekerja pada kecepatan yang diinginkan.

Istilah tachometer berasal dari bahasa Yunani, yaitu *tachos* yang berarti kecepatan dan *metron* yang berarti mengukur[19]. Pada awal perkembangannya, tachometer menggunakan sistem analog berupa jarum penunjuk dan skala pengukuran. Seiring perkembangan teknologi, tachometer digital mulai banyak digunakan karena mampu memberikan hasil pengukuran yang lebih akurat, mudah dibaca, dan memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan tachometer analog. Berdasarkan prinsip kerjanya, tachometer dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu tachometer rotor bergigi, tachometer DC, tachometer tempel (*contact tachometer*), dan tachometer laser (*photo tachometer*). Tachometer rotor bergigi bekerja dengan memanfaatkan sensor magnetik yang mendeteksi jumlah gigi yang melewati sensor dan mengubahnya menjadi pulsa listrik. Tachometer DC bekerja berdasarkan prinsip generator DC, yaitu mengubah kecepatan putaran menjadi tegangan keluaran yang besarnya sebanding dengan kecepatan putaran poros. Sementara itu, tachometer tempel melakukan pengukuran dengan cara menyentuh sensor secara langsung pada benda yang diukur[20].

Salah satu jenis tachometer yang banyak digunakan saat ini adalah tachometer laser. Tachometer jenis ini memungkinkan pengukuran dilakukan tanpa kontak langsung dengan objek yang diukur (*non-contact measurement*). Prinsip kerjanya adalah dengan memancarkan sinar laser menuju permukaan reflektif pada objek yang berputar. Sensor pada alat kemudian mendeteksi cahaya yang dipantulkan kembali dan menghitung jumlah pantulan tersebut untuk menentukan kecepatan putaran dalam satuan RPM. Metode pengukuran ini sangat cocok digunakan pada objek yang berputar dengan kecepatan tinggi karena lebih aman

dan tidak mengganggu proses kerja mesin. Alat ukur tachometer ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Alat Ukur Tachometer[20]

Berdasarkan Gambar 2.8, alat ukur tachometer digital terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu sensor pengukuran, layar digital (LCD), tombol pengoperasian, serta aksesoris pengukuran seperti *contact tip* dan pita reflektif untuk pengukuran tanpa kontak. Pada mode *non-contact*, sinar laser dipancarkan menuju pita reflektif yang ditempelkan pada poros atau objek berputar, kemudian sensor mendeteksi pantulan cahaya untuk menghitung jumlah putaran per menit (RPM), kemudian pada mode *contact*, pengukuran dilakukan dengan menyentuh ujung sensor secara langsung pada poros yang berputar dan hasil pengukuran ditampilkan pada layar digital.

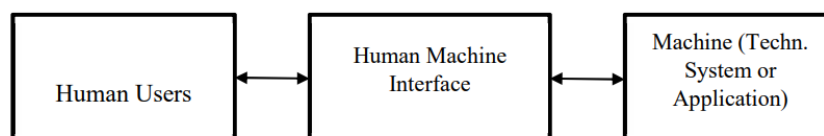
Pada penelitian ini, tachometer laser digunakan sebagai alat untuk mengukur kecepatan putaran motor induksi yang dikendalikan oleh Variabel Speed Drive (VSD). Penggunaan tachometer laser dipilih karena memiliki beberapa keunggulan, antara lain pengukuran yang cepat, tingkat akurasi yang baik, serta kemampuan melakukan pengukuran dari jarak tertentu tanpa harus menyentuh poros motor secara langsung. Dengan demikian, data kecepatan putaran motor yang diperoleh dapat digunakan untuk menganalisis pengaruh perubahan frekuensi keluaran VSD terhadap kecepatan putaran motor induksi.

2.2.6 *Human-Machine Interface (HMI)*

Human Machine Interface (HMI) merupakan suatu sistem antarmuka yang berfungsi sebagai media penghubung sekaligus sarana komunikasi antara manusia dan mesin. Melalui HMI, data yang berasal dari mesin atau sistem kendali dapat dikumpulkan, diproses, dan disajikan kembali dalam bentuk informasi yang mudah dipahami oleh pengguna. Dengan demikian, HMI berperan penting dalam membantu manusia memantau kondisi dan kinerja mesin secara efektif.

Selain berfungsi sebagai penampil data, HMI juga mampu merepresentasikan proses atau kondisi operasional yang sedang berlangsung pada mesin yang dikendalikan. Oleh karena itu, perancangan HMI perlu disesuaikan sedekat mungkin dengan karakteristik dan proses kerja mesin agar pengguna dapat dengan mudah melakukan pengoperasian dan pengendalian sistem yang akan dirancang dan dilakukan. Desain HMI yang baik akan meningkatkan pemahaman operator terhadap kejadian atau gangguan yang terjadi pada mesin, sehingga memungkinkan proses pengambilan keputusan dan penyelesaian masalah dapat dilakukan dengan lebih cepat dan tepat.

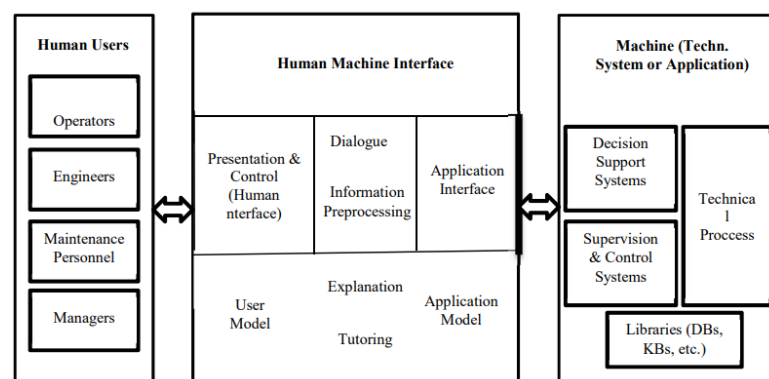
Interaksi antara manusia, HMI, dan mesin merupakan hubungan yang saling terintegrasi. Hubungan tersebut bersifat dua arah, di mana HMI menjadi perantara pertukaran informasi antara pengguna dan mesin. Pengguna memberikan perintah atau masukan melalui HMI, sementara mesin menyampaikan kondisi, status, dan hasil proses kembali kepada pengguna melalui media yang sama. Pola interaksi ini memungkinkan sistem bekerja secara responsif dan efisien[21][22]. Hubungan ini ditampilkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Hubungan HMI dengan Manusia dan Mesin[22]

Pengguna dalam sistem HMI dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok, antara lain operator, teknisi, personel pemeliharaan, serta manajer. Meskipun masing-masing kelompok memiliki tugas dan tanggung jawab yang berbeda, seluruh pengguna tersebut memerlukan informasi yang saling berkaitan untuk mendukung kelancaran operasional sistem. Informasi yang disajikan oleh HMI disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing pengguna agar dapat menunjang proses pengawasan, pengendalian, dan pengambilan keputusan.

Istilah mesin dalam konteks sistem HMI tidak hanya merujuk pada perangkat fisik, tetapi juga mencakup sistem teknis yang bersifat dinamis atau aplikasi real-time, seperti sistem otomasi, perangkat pendukung keputusan, serta perangkat lunak pengendali. Dalam hal ini, Programmable Logic Controller (PLC) berperan sebagai sistem kendali utama yang dioperasikan dan dipantau melalui HMI[23][22]. Adapun fungsional HMI ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 10 Fungsi Utama HMI[23]

Gambar 2.10 menunjukkan struktur fungsi utama HMI terdiri beberapa komponen yang saling terintegrasi meliputi, *Presentation and Control* sebagai antarmuka langsung antara pengguna dan sistem, *Dialogue* serta *Information Preprocessing* yang berfungsi mengelola komunikasi dan pengolahan data, serta *Application Interface* yang menghubungkan HMI dengan sistem atau aplikasi teknis. HMI juga dilengkapi dengan komponen fungsi lanjutan seperti *User Model*, *Explanation*, *Tutoring*, dan *Application Model* yang berperan dalam penyesuaian informasi, penjelasan sistem, serta peningkatan pemahaman pengguna terhadap proses operasional. Pembagian fungsi tersebut mendukung pengawasan, pengendalian, dan pengambilan keputusan secara efektif

2.2.7 *Vijeo Citect dan Designer dalam Human-Machine Interface (HMI)*

Human-Machine Interface (HMI) merupakan antarmuka perangkat lunak dan perangkat keras yang memungkinkan interaksi antara pengguna manusia dengan sistem kontrol industri. HMI menyediakan visualisasi proses, tampilan nilai parameter, alarm, serta fungsi kontrol yang memudahkan pemantauan dan pengendalian berbagai peralatan otomasi secara real-time.

Vijeo Citect adalah perangkat lunak HMI/SCADA yang dikembangkan oleh Schneider Electric untuk merancang, memonitor, dan mengendalikan sistem otomasi industri. *Vijeo Citect* mampu menangani aplikasi dari tingkat sederhana hingga skala besar, serta menyediakan fitur visualisasi proses, manajemen alarm, dan akuisisi data secara terintegrasi. Perangkat lunak ini dirancang untuk memberikan solusi monitoring dan kontrol yang fleksibel, skalabel, dan dapat diintegrasikan dengan berbagai perangkat otomasi termasuk PLC[24].

Sedangkan *Vijeo Designer* merupakan perangkat lunak konfigurasi HMI yang digunakan untuk membuat dan mengatur tampilan antarmuka pada panel pengguna (misalnya *touchscreen*). *Vijeo Designer* menyediakan alat untuk merancang objek visual (seperti tombol, indikator, grafik, dan animasi), konfigurasi komunikasi dengan PLC, serta pengaturan parameter tampilan sesuai kebutuhan aplikasi industri. Software ini memungkinkan pembuatan aplikasi HMI yang intuitif dan mudah digunakan[25]. Dengan adanya sistem HMI dapat menyesuaikan kebutuhan otomasi mulai dari pengawasan proses, pengendalian mesin, hingga analisis data operasi, sehingga membantu pengguna dalam mengambil keputusan secara cepat dan akurat. Tampilan HMI SCADA ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 *Vijeo Citect dan Vijeo Designer*

2.2.8 Rangkaian *Multi-Step* pada Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi tiga fasa pada kondisi standar bekerja pada kecepatan yang ditentukan oleh frekuensi sumber dan jumlah kutub, sehingga tanpa pengaturan tambahan motor cenderung beroperasi pada satu kecepatan konstan. Namun, dalam praktik industri sering dibutuhkan variasi kecepatan kerja motor sesuai dengan beban dan proses yang berbeda-beda, misalnya pada sistem konveyor, pompa, atau mesin crusher. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, digunakan teknik pengaturan kecepatan yang memungkinkan motor berjalan pada beberapa tahap kecepatan sesuai kebutuhan, disebut dengan rangkaian *multi-step* atau *multispeed control*.

Pada sistem multispeed, motor induksi dapat dikendalikan kecepatannya melalui perangkat kontrol seperti *Variable Frequency Drive* (VFD) yang dikombinasikan dengan *Programmable Logic Controller* (PLC). Metode ini memungkinkan perubahan frekuensi dan tegangan yang masuk ke motor sehingga motor dapat beroperasi pada beberapa tingkatan kecepatan berbeda, dan bukan hanya satu kondisi kecepatan tetap seperti pada sambungan langsung ke jaringan listrik. Sistem multispeed ini mendukung stabilisasi arus pada motor ketika beban berubah, termasuk saat start atau beban berlebih, sehingga dapat mencegah lonjakan arus dan potensi kerusakan komponen listrik[26].

Pengaturan kecepatan motor induksi dengan *multi-step* bertujuan memberikan fleksibilitas dalam pengendalian sistem, mengoptimalkan performa mesin, serta meningkatkan efisiensi energi. Dengan pengaturan bertahap, pengguna atau sistem kontrol dapat memilih tingkat kecepatan motor sesuai dengan kebutuhan proses, sehingga memberikan kontrol yang lebih baik terhadap produksi dan beban kerja tanpa menurunkan stabilitas operasi motor[27]. Selain itu, metode *multi-step* juga membantu mengurangi stres mekanis pada motor karena perubahan kecepatan dilakukan secara bertahap, bukan secara tiba-tiba serta dapat memperpanjang umur motor dan peralatan pendukung karena arus start dan torsi awal dapat ditekan. Oleh karena itu, penerapan sistem *multi-step* sangat sesuai digunakan pada aplikasi industri yang membutuhkan variasi kecepatan kerja secara aman dan efisien. Dengan demikian, *multi-step control* menjadi salah satu solusi penting dalam sistem otomasi berbasis motor induksi tiga fasa.