

BAB II

DASAR TEORI

Bahasan disini mencakup teori dan komponen-komponen sebagaimana diaplikasikan bagi perancangan sistem pengisian cairan melalui PID pada pompa air DC menggunakan PLC FX3U.

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka ini mencakup beberapa referensi yang telah dievaluasi terkait perancangan sistem pengisian cairan dengan pengontrol on/off histerisis pada pompa air DC menggunakan PLC FX3U-14MT dalam rangka pembuatan proyek tugas akhir. Hasil dari tinjauan pustaka yakni:

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka

Judul	Penulis/Ta	Kesimpulan
o Penelitian	hun	
Penggunaan PLC dan HMI dalam Simulasi Kendali Ketinggian Air	(Hajar et al., 2023)	Metode histeresis pada PLC terbukti efektif menghilangkan fenomena <i>chattering</i> pada relay yang biasanya terjadi jika hanya menggunakan satu titik <i>setpoint</i> (on-off murni).

Rancang Bangun Sistem		
Kendali Level Air Berbasis <i>Programmable Logic Controller</i> dan <i>Human Machine Interface</i>	(Wahyu Oktaviana Putri, M. Imbarothur Mowaviq, 2021)	Ketinggian air mampu dikontrol melalui error rata-rata sejumlah 3%
Rancang Bangun Sistem Pengendalian Ketinggian air Dengan Pengontrol PID Pada Pompa Air AC Menggunakan PLC CP1E-NA20DR-A	(Chaerunnisa, 2024)	Penggunaan control PID yang dipadukan dengan PLC CP1E-NA20DR-A mampu menjaga kestabilan level air sebesar $\pm 2\%$ dari nilai set point yang ditetapkan dengan lebih efisien.
Kontrol dan Monitor Sistem Otomasi Automatic Water Treatment Systems Berbasis PLC Menggunakan HMI Weintek MT8071iP	(Wibisono & Priyanto, 2020)	Otomatisasi proses pengolahan air mampu diawasi secara real-time melalui HMI. Visualisasi status mesin/mesin air treatment ditampilkan di HMI untuk operator. Input level dari sensor-sensor diolah oleh PLC untuk memicu pompa atau valve sesuai kondisi.

2.2 Sistem On – Off dengan Histerisis

Sistem ini dengan histerisis merupakan sistem kontrol sederhana yang mengoperasikan perangkat dalam dua kondisi saja, aktif (ON) DAN non – aktif (OFF) berdasarkan nilai yang ditetapkan. Perangkat akan aktif saat nilai variabel proses turun melewati set point minimum dan non – aktif saat nilai tersebut

melewati set point maksimum. Selama nilai proses berada di antara kedua batas variabel, status perangkat tetap dipertahankan. Mencegah switching yang terlalu sering.

Prinsip Kerja dengan Histerisis :

- Jika $PV < SP - h \rightarrow$ Aktuator ON
- Jika $PV > SP + h \rightarrow$ Aktuator OFF

h adalah nilai histerisis. Contoh :

- Setpoint 5 cm
- Histerisis ± 1 cm

Maka

- Jika ketinggian air mencapai 6 cm $\rightarrow$ pompa OFF dan valve ON
- Jika ketinggian air turun mencapai 4 cm $\rightarrow$ pompa ON dan valve OFF

Histerisis menciptakan zona netral antara kondisi ON dan OFF, zona ini berfungsi menstabilkan sistem dan mencegah perangkat beralih status yang tidak perlu akibat perubahan kecil. Hal ini penting untuk mengurangi keausan pada komponen mekanik seperti actuator.

2.3 Ketinggian Air

Ketinggian air adalah alat yang digunakan untuk mengukur atau mengetahui tinggi permukaan air atau cairan dalam suatu wadah atau tangki. Alat ini diterapkan umum bagi industri, pertanian, dan konstruksi.

Prinsip *Ketinggian air*, atau prinsip tingkat air, adalah konsep dasar dalam hidrostatika yang menjelaskan bahwa air dalam wadah tertutup akan membentuk bidang horizontal saat mencapai keseimbangan. Ini disebabkan oleh tekanan hidrostatik, yang timbul dari lapisan cairan yang bertumpu pada titik tertentu dalam wadah, yang mendorong permukaan cairan untuk berada pada tingkat yang sama. Rumus dasar untuk tekanan hidrostatika menggunakan persamaan:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.1)$$

Di mana :

P adalah tekanan hidrostatik (Pa)

ρ adalah kerapatan cairan (kg/m^3)

g adalah percepatan gravitasi (m/s^2)

h adalah kedalaman atau ketinggian cairan di atas titik tertentu (m)

Untuk mengetahui ketinggian air dalam wadah tertutup dengan permukaan air yang terbentuk secara horizontal. Ketinggian air dalam wadah (h) akan sama di semua titik dalam wadah. Oleh karena itu, rumus tekanan hidrostatik dapat digunakan untuk memperoleh ketinggian air (h) menggunakan persamaan (2.2) [12]:

$$P_{\text{permukaan}} = P_{\text{titik dalam}}$$

$$\rho \cdot g \cdot h_{\text{permukaan}} = \rho \cdot g \cdot h_{\text{titik dalam}}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, dapat disimpulkan bahwa ketinggian air (h) di permukaan sama dengan ketinggian air (h) di titik manapun di dalam wadah.

Prinsip kerja *Ketinggian air* juga didasarkan pada hukum kekekalan massa yang mengacu pada prinsip bahwa dalam sistem tertutup (*close loop*) jumlah massa air dalam sistem akan tetap konstan apabila tak ada yang keluar ataupun masuk sistem tersebut. Dengan kata lain, jika tidak ada perubahan volume air dalam wadah, total massa air dalam wadah tersebut akan tetap sama. Ini dapat dinyatakan secara matematis merujuk pada persamaan (2.3) [12]:

$$\text{Massa Masuk} = \text{Massa Keluar} + \Delta m \quad (2.3)$$

Di mana Δm adalah perubahan massa dalam sistem. Jika $\Delta m=0$, maka:

$$\text{Massa Masuk} = \text{Massa Keluar} + \Delta m \quad (2.4)$$

Hukum kekekalan massa membantu dalam perancangan sistem pengaturan air untuk memastikan keseimbangan antara aliran masuk dan keluar agar tingkat air tetap stabil sesuai dengan yang diinginkan.

2.4 Debit Air

Debit air adalah jumlah volume air yang mengalir melalui suatu pipa dalam satuan waktu tertentu. Pemahaman ini sangat membantu saat ingin mengatur distribusi air di rumah tangga, PDAM, maupun industry [16]. Rumus debit air :

$$Q = A \cdot v \quad (2.5)$$

Di mana :

- Q adalah debit air (liter per detik),
- A adalah luas penampang pipa (meter persegi),
- v adalah kecepatan aliran air (meter per detik).

Jika ukuran pipa terlalu kecil atau terlalu besar dibandingkan kebutuhan air, hal ini bisa menyebabkan tekanan yang tidak stabil. Debit yang terlalu besar dapat menimbulkan suara berisik atau kerusakan pada pipa. Sebaliknya, debit yang terlalu kecil bisa membuat aliran air melemah saat digunakan bersamaan.

2.5 Komponen Penyusun Sistem Pengendalian Ketinggian Air

Sistem pengendalian *ketinggian air* dengan pengontrol on/off histerisis pada pompa air DC menggunakan PLC FX3U-14MT terdiri dari berbagai komponen pendukung yang bekerja secara bersama untuk merespons perubahan *level air* secara otomatis dan menjaga *level air* tetap stabil sesuai dengan nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Berikut beberapa komponen utama dalam membangun sistem pengendalian *Ketinggian air*:

2.5.1 Pompa Air DC

Pompa ialah sebuah perangkat mekanis bagi perpindahan cairan dengan meningkatkan tekanan pada fluida yang tidak mampu dimampatkan (*incompressible fluid*). Proses ini bertujuan untuk melawan tahanan dalam sistem, yang dapat berupa kehilangan tekanan akibat gesekan (*friction loss*), ketinggian statis (*static head*), atau perbedaan tekanan antar titik dalam sistem.

Pompa DC merupakan jenis pompa yang menggunakan sumber tenaga listrik arus searah, seperti baterai atau panel surya, yang menggerakkan motor DC untuk menghasilkan gaya dorong fluida. Pompa air DC bekerja dengan merubah DC menjadi mekanik dalam menggerakkan fluida melalui *impeller* atau *diaphragm*.

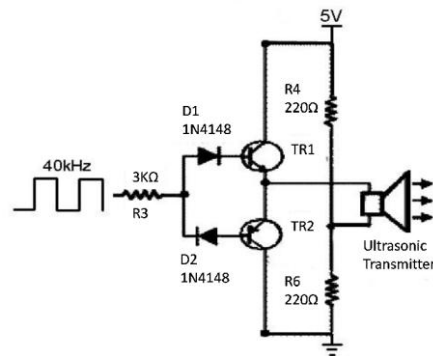
Pompa air DC umumnya digunakan pada sistem otomasi berskala kecil dan sistem sirkulasi cairan seperti akuaponik, hidroponik, serta pendinginan cairan industri ringan. Pompa jenis ini memiliki komponen sederhana: motor DC, poros penggerak, dan *impeller* untuk menghasilkan aliran air.

Pompa air DC memiliki keunggulan pada efisiensi energi dan fleksibilitas penggunaannya. Pompa ini dapat diintegrasikan dengan sistem tanpa memerlukan inverter. Kinerja pompa air DC ditentukan oleh tiga faktor utama, yaitu tegangan suplai, arus beban, dan efisiensi motor. Ketika tegangan suplai menurun, kecepatan putar motor DC juga berkurang sehingga menurunkan *flow rate* dan *head pressure*. Oleh karena itu, sistem kendali seperti PWM (Pulse Width Modulation) sering digunakan untuk menjaga kestabilan aliran.

2.5.2 Sensor Ultrasonik US-016

Sensor ultrasonik US-016 ialah sensor sebagaimana merubah besaran fisis menjadi listrik analog berupa tegangan. Sensor ultrasonik menggunakan prinsip berupa pantulan gelombang dalam rangka mendeteksi eksistensi objek di depannya dengan frekuensi kerja dari 40 – 400 KHz.

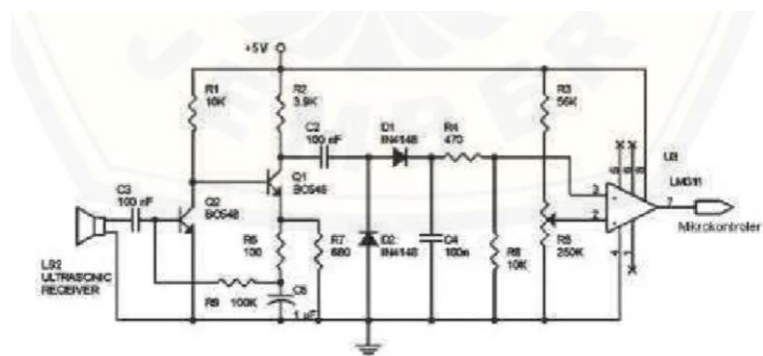
Prinsip kinerjanya yakni melibatkan pistol piezoelektrik yang terhubung oleh mekanik jangkar serta diafragma penggetar dengan tegangan yang diberikan pada plat logam secara bolak-balik dengan frekuensi tersebut dan rangkaian pemancar menghasilkan gelombang ultrasonik sinyal sejumlah 40KHz lalu sinyal itu diolah oleh susunan penguat arus sebelum ditembakkan ke target dengan rangkaian ekuivalen dari bagian pemancar pada sensornya yakni:



Gambar 2. 1 Rangkaian Pemancar (transmitter)

Sumber: teknikelektronika.com)

Pada rangkaian penerima (*receiver*), sinyal yang diterima dari transduser dikuatkan oleh rangkaian transistor penguat sebelum disaring oleh filter tinggi pada frekuensi di atas 40 kHz. Kemudian sinyal tersebut diarahkan dan difilter lagi menggunakan rangkaian filter rendah untuk frekuensi di bawah 40 kHz. Sinyal kemudian dibandingkan menggunakan komparator Op-Amp untuk menghasilkan output TTL yang kemudian diolah oleh mikrokontroler. Rangkaian ekuivalen penerima (*receiver*) sensor ultrasonik dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Rangkaian Penerima (Receiver)

Sumber: teknikelektronika.com)

Prinsip pengukuran jarak menggunakan sensor ultrasonik analog adalah dengan memancarkan gelombang ultrasonik dan mengukur waktu tempuhnya dari pemancaran hingga penerimaan kembali. Dengan menghitung waktu tempuh dan diketahui kecepatan suara, jarak sensor serta objek yang bisa dikalkulasikan

melalui kesamaan yang selaras di mana sensor ultrasonik analog menyerahkan hasil dalam bentuk tegangan yang sebanding dengan jarak yang diukur. Ketika sensor mendeteksi objek, output tegangan akan meningkat seiring dengan berkurangnya jarak ke objek. Sensor Ultrasonik US-016 dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Sensor Ultrasonik

Tabel 2. 2 Sensor Spesifikasi Ultrasonik

Spesifikasi	Keterangan
Input Tegangan	5 Volt DC
Output	0 – 5 V (Analog)
Jarak Maksimum	300 cm
Jarak Minimum	2 cm
Dimensi	6 cm x 4 cm x 2.75 cm

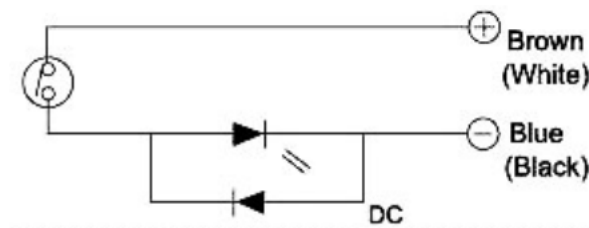
2.5.3 Solenoid Valve

Merupakan sebuah perangkat yang diaplikasikan dalam rangka mengontrol aliran fluida seperti air atau gas melalui suatu sistem yang bekerja sesuai dengan

sifat elektromagnetik mencakup medan magnet sebagai output dari arus listrik menggerakkan katup untuk menutup ataupun membuka aliran fluida.

Solenoid Valve biasanya terdiri dari dua bagian utama yakni solenoid serta katup di mana solenoid adalah sebuah gulungan kawat di posisikan pada sekitar inti logam dan saat arus listriknya mengalir lewat gulungan kawat maka medan yang dihasilkannya akan menarik atau mendorong katup untuk membuka atau menutup.

Ada berbagai jenis *solenoid valve* yang tersedia, termasuk *solenoid valve* terbuka, *solenoid valve* tertutup, *solenoid valve* 3-arah, *solenoid valve* 4-arah, dan lain-lain. Pemilihan jenis *solenoid valve* yang tepat tergantung pada kebutuhan aplikasi spesifik, termasuk jenis fluida yang akan diatur, tekanan dan suhu operasi, dan persyaratan aliran yang diinginkan. Rangkaian skematik *solenoid valve* ialah:



Gambar 2. 4 Spesifikasi Skematik Solenoid Valve

Sumber: teknikelektronika.com)

Tabel 2. 3 Spesifikasi Solenoid Valve

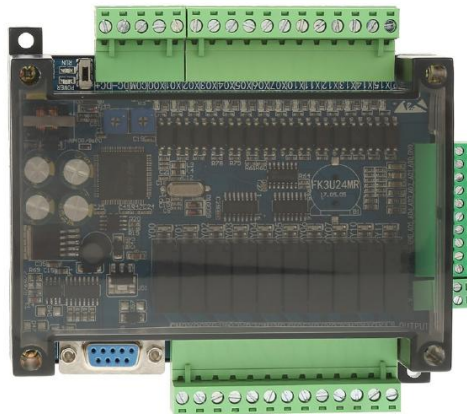
Spesifikasi	Keterangan
	2W-200-20
Model	2W-160-15
	2W-025-08

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan	24 Volt DC
Operasi Tekanan	Min. 0 kg/cm ³ – Max. 10 kg/cm ³
Jenis	Normal Close

2.5.4 PLC (Programmable Logic Controller)

Programmable Logic Controller atau PLC ialah sebuah wujud pengawas dengan basis mikropresor sebagaimana mendayagunakan memori yang mampu disusun dalam menyimpan atau mencadangkan instruksi melalui program dan menerapkan berbagai fungsi logika, sequencing, perwaktuan pencacahan serta aritmatika untuk mengawasi berbagai mesin serta proses dan sesuai dari NEMA, PLC merupakan peralatan digital yang secara online beroperasi melalui memori programmable dalam menyimpan instruksi secara internal melalui penerapan fungsi tertentu (OpenStax., 2024).

PLC Mitsubishi FX3U digunakan dalam rancang bangun ini karena memiliki fitur-fitur yang mendukung. FX3U memiliki input/output digital dan *input/output* analog yang memadai untuk mengontrol sistem *level air* sederhana, di mana input dapat digunakan untuk menerima sinyal dari sensor ultrasonik, dan output dapat mengendalikan aktuator seperti menghidupkan atau mematikan motor serta mengatur kecepatan motor dengan menggunakan DC speed control melalui tegangan yang diberikan ke motor sesuai kebutuhan proses. PLC FX3U dan spesifikasinya yakni:



Gambar 2. 5 PLC Mitsubishi FX3U

Tabel 2. 4 Spesifikasi PLC Mitsubishi FX3U

Spesifikasi	Keterangan
Model	Mitsubishi FX3U Series
Jenis Input/Output	Digital dan Analog (dapat diperluas dengan modul tambahan)
Jumlah I/O Dasar	16, 32, 48, 64, hingga 128 titik tergantung tipe modul
Tegangan Input Digital	24 VDC
Tegangan Power Supply	100 – 240 VAC (50/60 Hz) atau 24 VDC tergantung model
Output	Relay atau Transistor
Kapasitas Output Relay	Maksimum 250 VAC, arus hingga 2 A per titik (beban resistif)
Memori Program	64 k langkah (dapat diperluas)

Spesifikasi	Keterangan
Waktu Eksekusi Instruksi Dasar	$\pm 0,065 \mu\text{s/instruksi}$
Fitur Komunikasi	RS-232C, RS-485, USB, Ethernet (melalui modul tambahan), dan CC-Link
Kontrol PID	Tersedia <i>built-in PID control</i> hingga 8 loop kontrol simultan
Modul Ekspansi	Mendukung ekspansi I/O, analog, komunikasi, dan high-speed counter
Port Khusus	Port untuk komunikasi HMI, SCADA, dan inverter
Fitur Tambahan	Real-Time Clock (RTC), Data Logging, High-Speed Pulse Output, PWM
Lingkungan Operasi	Suhu 0–55°C, kelembapan 5–95% tanpa kondensasi

PLC Mitsubishi FX3U merupakan seri lanjutan dari keluarga FX yang dirancang untuk aplikasi industri berskala kecil hingga menengah dengan kebutuhan kontrol kompleks. PLC ini dilengkapi dengan kemampuan pemrosesan cepat, kapasitas memori besar, dan kompatibilitas luas terhadap modul ekspansi analog maupun komunikasi, sehingga ideal digunakan pada sistem otomasi seperti pengendalian level air, kecepatan motor, suhu, dan tekanan.

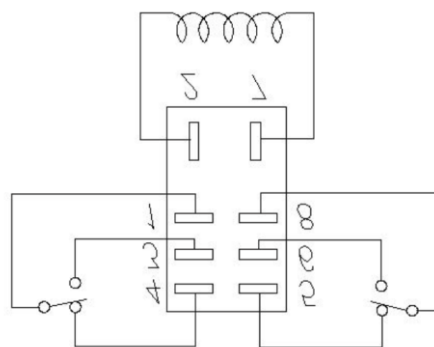
Fitur PID bawaan (*built-in PID control*) memungkinkan sistem melakukan pengendalian presisi secara real-time tanpa memerlukan modul tambahan. Selain itu, dukungan komunikasi seperti RS-485 dan Ethernet memudahkan integrasi dengan HMI, SCADA, dan perangkat IoT industri untuk sistem monitoring dan kontrol jarak jauh.

2.5.5 Relay

Relay adalah adalah komponen listrik yang digunakan untuk mengontrol sirkuit listrik dengan menggunakan medan magnet. Secara sederhana, relay berfungsi sebagai sakelar yang diaktifkan atau dinonaktifkan oleh arus listrik. Relay PLC 8 pin merupakan jenis relay yang umum digunakan dalam sistem kontrol digital. Komponen utama relay terdiri dari *coil* (kumparan) dan kontak (OpenStax, 2024).

Saat malaikat arus listrik melewati *coil* maka hasil dari medan magnet mampu menarik armatur. Armatur yang tertarik akan menyebabkan kontak-kontak mekanis menutup atau membuka. Ketika kontak menutup atau membuka, sirkuit listrik yang terhubung dengan kontak tersebut akan terhubung atau terputus.

Dalam sistem pengendalian *ketinggian air*, relay digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor dengan kondisi apabila logika tertentu terpenuhi, relay PLC mengaktifkan VFD untuk menyalakan dan mematikan pompa air selama proses pengendalian *ketinggian air*. Rangkaian skematik relay dapat dilihat pada Gambar 2.6. Tabel spesifikasi relay dapat dilihat pada Tabel 2.9.



Gambar 2. 6 Rangkaian Skematik Relay

Sumber: teknikelektronika.com)

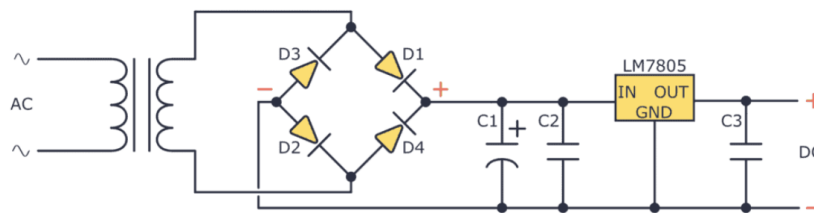
Tabel 2. 5 Spesifikasi Relay

Spesifikasi	Keterangan
Merek	Songle
Tipe	SRD-05VDC-SL-C.
Jumlah Pin	30 pin
Kapasitas	0A 250V AC / 10A 125V AC. 10A 30V DC / 10A 28V DC.
Tegangan Coil	5V DC

2.5.6 Power Supply

Power Supply (catu daya) adalah komponen penting dalam sistem elektronik, berfungsi untuk menyediakan energi listrik yang diperlukan oleh perangkat. Secara umum, *power supply* mengubah arus listrik bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC) (Wikipedia, 2025).

Power Supply stabil begitu penting dalam sistem PID, karena fluktuasi daya dapat menyebabkan kesalahan dalam pengukuran dan pengendalian. *Power supply* juga bertanggung jawab untuk menyediakan arus yang diperlukan oleh motor dan memastikan bahwa motor dapat beroperasi pada tegangan dan arus yang tepat. Secara keseluruhan, *power supply* merupakan komponen vital dalam rancang bangun ini yang berfungsi untuk memastikan bahwa semua perangkat beroperasi dengan efisien dan stabil. *Power Supply* 24V dengan arus 10A digunakan untuk rancang bangun ini. Rangkaian skematik *Power Supply* yakni:



Gambar 2. 7 Rangkaian Skematik Power Supply

Sumber: teknikelektronika.com)

2.5.7 Miniature Circuit Breaker

MCB ialah unsur krusial pada instalasi listrik di rumah yang berguna menjadi pelindung arus berlebih serta korelasi yang singkat seperti Thermostat Load Relay. MCB juga menggunakan elemen bimetalik yang akan memuai akibat panas yang disebabkan oleh arus yang mengalir. Elemen bimetalik ini dibuat sesuai dengan standar arus nominal MCB dan bekerja dalam waktu singkat untuk melindungi rangkaian beban. Selain itu, MCB dilengkapi dengan sistem magnetik trip yang bekerja cepat pada beban berlebih atau hubungan singkat dengan arus besar. Tampilan fisik dari *Miniature Circuit Breaker* yakni:



Gambar 2. 8 Miniature Circuit Breaker

Sumber: teknikelektronika.com)

Prinsip kerja MCB didasarkan pada mekanisme elektromekanik (termasuk thermal dan magnetik) untuk membuka kontak breaker saat terjadi gangguan arus berlebih. Unit thermal trip berfungsi berdasarkan kenaikan temperatur, sedangkan unit magnetik trip beroperasi berdasarkan kenaikan arus yang berlebih MCB.

2.5.8 Human Machine Interface

HMI ialah suatu perangkat sebagaimana berguna menjadi wadah interaksi antara manusia (operator) dengan mesin atau sistem otomatisasi. Melalui HMI, operator dapat memantau, mengontrol, serta melakukan pengaturan terhadap proses industri secara langsung melalui tampilan visual yang interaktif. HMI menampilkan data proses dalam bentuk grafik, indikator, alarm, serta tombol-tombol digital yang terhubung dengan sistem kendali utama seperti *Programmable Logic Controller* (PLC).

Secara umum, HMI bekerja dengan cara menerima data dari PLC, kemudian menampilkan informasi tersebut dalam bentuk yang mudah dipahami manusia. Selain itu, HMI juga dapat mengirimkan perintah kembali ke PLC untuk mengatur kondisi proses, seperti menyalakan atau mematikan aktuator, mengubah nilai *setpoint*, atau melakukan reset sistem. Dengan demikian, HMI berperan penting dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengawasan sistem kontrol otomatis.

Menurut Bolton (2020), HMI merupakan antarmuka pengguna yang menghubungkan sistem elektronik dan operator, di mana perangkat ini menampilkan status sistem dan memungkinkan intervensi operator terhadap sistem secara langsung. HMI modern umumnya dilengkapi dengan layar sentuh (*touchscreen*) yang menampilkan berbagai elemen visual, seperti diagram proses, indikator level, alarm, serta grafik waktu nyata (*real-time trend*) (Bolton, 2020).

Dalam sistem pengendalian *Ketinggian air*, HMI bekerja dengan cara PLC membaca data dari sensor (misalnya sensor ultrasonik untuk ketinggian air). Kemudian PLC mengirimkan data tersebut ke HMI melalui komunikasi serial atau Ethernet. Selanjutnya HMI akan menampilkan data dalam bentuk grafik,

indikator, atau angka digital. Operator dapat memberi perintah melalui HMI, misalnya menekan tombol “Start Pompa”. HMI mengirimkan sinyal ke PLC untuk menjalankan logika yang sesuai.

HMI berfungsi sebagai antarmuka visual yang menampilkan ketinggian air secara *real-time* serta memberikan kemudahan bagi operator dalam mengendalikan pompa air, mengubah nilai *setpoint*, dan memantau kondisi kerja sistem secara keseluruhan. HMI juga berperan dalam menampilkan status operasi pompa dan alarm apabila ketinggian air melebihi atau berada di bawah batas yang ditentukan.



Gambar 2. 9 Human Machine Interface