

BAB II

DASAR TEORI

Pada bab ini akan dijelaskan tentang tinjauan pustaka hasil penelitian terdahulu yang masih berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan dan juga dasar teori yang digunakan untuk membuat dan merancang tugas akhir Integrasi Sensor pH dan Kekeruhan dalam Sistem Otomatisasi PLC untuk Pengendalian Dosis Tawas pada Proses Koagulasi Air Bersih. Teori yang digunakan dalam pembuatan tugas akhir ini terdiri dari beberapa komponen, antara lain *Programmable Logic Controller* (PLC) sebagai pengendali utama, Sensor pH 4502C, Gravity Analog Turbidity Sensor, aktuator *solenoid Valve*, serta motor untuk pengaduk larutan tawas secara otomatis. Selain itu, untuk mengoperasikan komponen-komponen tersebut dibutuhkan juga rangkaian *power supply* 24V DC, modul relay yang akan dijelaskan pada bab ini.

2.1 Tinjauan Pustaka

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis mengacu pada beberapa penelitian terdahulu yang relevan dan mendukung pengembangan sistem otomatisasi pengolahan air. Salah satu studi menunjukkan bahwa penerapan sistem kontrol otomatis berbasis PLC dan SCADA dapat meningkatkan efektivitas pengolahan air secara signifikan. Sistem ini mampu melakukan pengaturan dosis koagulan secara *real-time* dengan mengacu pada parameter kualitas air seperti pH dan kekeruhan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem tersebut dapat menurunkan tingkat kekeruhan air hingga mencapai nilai 3,65 NTU dan menjaga kestabilan pH pada level 7,4 [7].

Penelitian lain yang menjadi referensi dalam tugas akhir ini memanfaatkan teknologi mikrokontroler Arduino UNO dan PLC Siemens S7-300 sebagai basis pengendali utama, dikombinasikan dengan sensor pH 4502C dan Gravity Analog Turbidity Sensor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem berhasil menurunkan tingkat kekeruhan air secara signifikan hingga berada di bawah nilai ambang batas kualitas air proses, dengan nilai akhir berkisar antara 3,18 hingga 3,54 NTU. Keberhasilan ini dikaitkan dengan kemampuan sistem untuk menyesuaikan dosis

koagulan sesuai dengan kondisi aktual air baku, tanpa perlu intervensi manusia. Walaupun sistem ini tidak sekompleks PLC industri, namun pendekatan berbasis mikrokontroler ini menawarkan alternatif ekonomis dan fleksibel untuk skala kecil atau aplikasi penelitian [2].

Studi lain yang menjadi referensi mengangkat implementasi PLC dalam sistem pengolahan air di lingkungan Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM). Fokus penelitian tersebut adalah pada pengendalian proses koagulasi dan sedimentasi secara otomatis untuk meningkatkan kapasitas dan efisiensi produksi air bersih. Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan efisiensi proses pengolahan hingga 43,6% dibandingkan dengan sistem pengolahan manual yang sebelumnya digunakan. Penerapan PLC memungkinkan pengendalian yang lebih presisi terhadap waktu pencampuran, dosis bahan kimia, serta deteksi parameter air secara berkelanjutan. Efeknya tidak hanya meningkatkan kualitas air yang dihasilkan, tetapi juga mengurangi beban kerja operator dan menurunkan konsumsi energi [8].

Referensi terakhir yang dikaji dalam tugas akhir ini merupakan penelitian yang mengembangkan sistem semi-otomatis berbasis Arduino Uno untuk pengendalian dosis tawas dalam proses koagulasi air. Sistem ini juga memanfaatkan sensor kekeruhan untuk menentukan kebutuhan penambahan koagulan, serta memanfaatkan konektivitas Internet of Things (IoT) untuk memantau kondisi air. Meskipun menawarkan fleksibilitas pemantauan jarak jauh, sistem ini masih membutuhkan intervensi manusia dalam penyesuaian dosis tawas [5].

Mendukung perancangan sistem dalam tugas akhir ini, penulis menyusun tabel tinjauan pustaka yang merangkum beberapa referensi utama. Tabel 2.1 berikut menyajikan judul jurnal, pembahasan, serta persamaan dan perbedaan dari setiap penelitian, yang kemudian dijadikan dasar perbandingan dalam perancangan sistem otomatisasi pada pengolahan air bersih.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

No	Judul Jurnal	Pembahasan	Persamaan dan Perbedaan
1	Design of Automation System for <i>Water</i>	Penelitian ini menggunakan sistem otomatisasi berbasis PLC	Persamaannya dengan penelitian ini adalah penggunaan parameter pH

No	Judul Jurnal	Pembahasan	Persamaan dan Perbedaan
	<i>treatment</i> at Telkom University Area III (<i>Handayani & Kusnayat, 2017</i>)	dan SCADA untuk mengontrol dosis koagulan berdasarkan parameter pH dan kekeruhan air. Sistem ini mampu menurunkan kekeruhan hingga 3,65 NTU dan menjaga pH stabil di 7.4.	dan kekeruhan sebagai acuan kontrol koagulasi. Perbedaannya terletak pada penggunaan teknologi industri seperti PLC dan SCADA, yang memberikan kendali lebih kompleks dan akurat dibandingkan platform
2	Otomasi Proses Pengaturan Kualitas pH dan Kekeruhan Air untuk Water Cooling Furnace (<i>Rahman et al., 2022</i>)	Penelitian ini memanfaatkan mikrokontroler Arduino UNO dan PLC Siemens S7-300 serta sensor pH dan kekeruhan dapat mengurangi tingkat 3,18 hingga 3,54 NTU. kekeruhan	Penelitian ini memiliki kesamaan karena sama-sama menggunakan sensor pH dan kekeruhan sebagai variabel kontrol. Namun, berbeda karena memakai Arduino UNO, yang lebih sederhana dibanding PLC
3	Optimalisasi Kapasitas Produksi PDAM Tirtauli dengan Sistem Otomatisasi Berbasis PLC (<i>Sidebang & Prasetyo, 2018</i>)	Penelitian ini menggunakan PLC untuk mengendalikan proses koagulasi dan sedimentasi dalam pengolahan air PDAM. Hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi sebesar 43,6% dibandingkan metode manual.	Penelitian ini serupa dengan jurnal pertama karena sama-sama menggunakan PLC sebagai kontrol otomatisasi. Namun, fokus penelitian bukan pada parameter pH dan kekeruhan, melainkan pada peningkatan kapasitas produksi PDAM secara keseluruhan.
4	Rancang Bangun Sistem Penuang Tawas Berbasis Arduino Uno untuk Koagulasi Air Bersih (<i>Dani, 2023</i>)	Penelitian ini merancang sistem semi-otomatis menggunakan Arduino Uno dan sensor kekeruhan. namun masih memerlukan intervensi manual untuk penyesuaian dosis tawas.	Tidak sepenuhnya otomatis, sehingga efisiensinya lebih rendah dan sistem masih bergantung pada operator manusia.

2.2 Water Treatment

Pengolahan air bersih merupakan rangkaian unit proses yang dirancang secara sistematis dan terpadu untuk mengubah air baku yang umumnya mengandung berbagai partikel tersuspensi, zat koloid, bahan organik, serta mikroorganisme patogen menjadi air yang memenuhi standar kualitas, baik untuk keperluan konsumsi maupun non-konsumsi seperti industri, irigasi, atau sanitasi. Proses pengolahan ini secara umum meliputi beberapa tahap utama yaitu *pretreatment*, *koagulasi-flokulasi*, *sedimentasi*, *filtrasi*, dan *disinfeksi*. Tahap *pretreatment* biasanya mencakup penyaringan kasar untuk menyisihkan partikel besar seperti daun dan pasir, serta penyesuaian pH agar reaksi kimia selanjutnya berjalan lebih efisien. Koagulasi-flokulasi adalah tahap penting dalam menggabungkan partikel kecil agar membentuk agregat yang lebih besar (flok). Proses ini kemudian dilanjutkan dengan sedimentasi, di mana flok akan mengendap secara gravitasi. Setelah itu, air disaring melalui media padat seperti pasir atau karbon aktif dalam tahap filtrasi, untuk menghilangkan partikel sisa serta sebagian besar kontaminan organik dan mikrobiologis. Langkah terakhir adalah disinfeksi, biasanya menggunakan klorin atau sinar UV, yang bertujuan membunuh mikroorganisme patogen dan menjaga kualitas air selama distribusi. Setiap tahapan ini saling mendukung dan berperan penting dalam memastikan air hasil akhir memenuhi standar kebersihan dan keamanan [11].

2.2.1 Proses Koagulasi

Koagulasi merupakan salah satu tahapan utama dalam proses pengolahan air yang bertujuan untuk menghilangkan partikel tersuspensi, zat organik, serta mikroorganisme patogen yang dapat mempengaruhi kualitas air. Proses ini dilakukan dengan menambahkan bahan kimia koagulan, seperti Aluminium Sulfate (tawas), yang bereaksi dengan kotoran dalam air dan membentuk flok-flok besar yang lebih mudah mengendap. Partikel koloid yang terdapat dalam air memiliki muatan listrik yang menyebabkan mereka tetap tersuspensi dan sulit untuk mengendap secara alami. Dengan adanya koagulan, muatan partikel tersebut dinetralkan, sehingga mereka saling berkumpul membentuk agregat yang lebih besar (flok), yang kemudian dapat dipisahkan melalui proses sedimentasi dan

filtrasi. Penelitian oleh Harmawan et al. menunjukkan bahwa efektivitas koagulasi sangat bergantung pada dosis koagulan, pH air, dan tingkat kekeruhan. Jika dosis yang diberikan tidak sesuai, maka proses koagulasi tidak akan berjalan optimal, baik karena flok tidak terbentuk sempurna maupun karena adanya residu bahan kimia dalam air yang berisiko bagi kesehatan manusia [12]

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa variabel utama yang dianalisis untuk mengukur efektivitas sistem yang dikembangkan. Dosis koagulan didefinisikan sebagai jumlah bahan kimia koagulan yang ditambahkan dalam proses koagulasi, yang umumnya dinyatakan dalam satuan mg/L. Dalam sistem otomatisasi, dosis ini dikendalikan oleh PLC berdasarkan parameter kualitas air seperti pH dan kekeruhan. Parameter pH air berperan penting dalam menentukan efektivitas koagulasi, karena setiap jenis koagulan memiliki rentang pH optimal untuk bekerja secara maksimal. Menurut penelitian Manurung, koagulasi menggunakan tawas bekerja paling efektif pada pH 5,5–7,5. Selain pH, kekeruhan air yang dinyatakan dalam satuan Nephelometric Turbidity Unit (NTU) juga merupakan indikator utama keberhasilan koagulasi. Efektivitas proses ini dapat diukur dari seberapa besar tingkat kekeruhan yang berkurang setelah koagulasi dilakukan. Studi oleh Laksamana et al. menunjukkan bahwa penggunaan sistem otomatisasi berbasis sensor dapat meningkatkan efisiensi pengolahan air hingga 43,6% dibandingkan dengan metode manual. Selain meningkatkan efektivitas, sistem otomatisasi ini juga membantu menekan biaya operasional dengan mengoptimalkan penggunaan bahan kimia dan mengurangi limbah residu [13]

Hubungan antar variabel dalam penelitian ini menunjukkan bahwa dosis koagulan dan pH air secara langsung mempengaruhi tingkat kekeruhan air, yang pada akhirnya menentukan efisiensi pengolahan air secara keseluruhan. Semakin tepat dosis koagulan yang diberikan, semakin optimal pula hasil koagulasi dalam menurunkan kekeruhan air tanpa menimbulkan residu bahan kimia yang berlebihan. Sistem PLC berperan sebagai pengendali utama yang mengatur jumlah koagulan yang diberikan berdasarkan data dari sensor pH dan kekeruhan, sehingga sistem dapat beradaptasi secara *real-time* terhadap fluktuasi kualitas air baku. Studi oleh

Kusumadewi dan Wijayanti menunjukkan bahwa penerapan sistem otomatisasi berbasis PLC dapat mengurangi penggunaan bahan kimia hingga 25% dan meningkatkan stabilitas kualitas air hasil olahan. Dengan kata lain, sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga dapat menjaga standar kualitas air sesuai dengan baku mutu yang telah ditetapkan [14]

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkonfirmasi bahwa sistem koagulasi berbasis sensor dan otomatisasi memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode manual. Studi yang dilakukan oleh Harmawan et al. menemukan bahwa koagulasi merupakan metode paling efektif untuk mengolah air dengan tingkat kekeruhan tinggi, terutama ketika proses ini dikendalikan oleh sistem otomatisasi yang mampu menyesuaikan dosis koagulan secara tepat. Penelitian oleh Manurung menunjukkan bahwa sistem berbasis PLC mampu meningkatkan akurasi dalam pengaturan dosis bahan kimia, sehingga mengurangi ketidaktepatan yang sering terjadi pada metode manual. Lebih lanjut, penelitian oleh Laksamana et al. menunjukkan bahwa penyesuaian dosis koagulan berbasis sensor tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga dapat mengoptimalkan kualitas air hasil pengolahan, yang menjadikannya sebagai pendekatan unggulan dalam sistem pengolahan air bersih modern. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem otomatisasi berbasis PLC yang lebih adaptif terhadap fluktuasi kualitas air, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengolahan air bersih dalam skala industri maupun domestik [15]

2.2.2 Proses Sedimentasi

Tahap berikutnya setelah koagulasi-flokulasi adalah sedimentasi, yaitu proses pemisahan partikel-partikel flok yang telah terbentuk dengan memanfaatkan gaya gravitasi. Air yang mengandung flok dialirkan ke dalam bak sedimentasi atau *clarifier*, yang didesain untuk memaksimalkan waktu tinggal (*detention time*) dan meminimalkan turbulensi, sehingga flok dapat mengendap sempurna di dasar bak. Desain hidraulik dari bak sedimentasi memainkan peran penting dalam efisiensi proses ini, termasuk kemiringan dasar bak, kecepatan aliran masuk, dan sistem pengeluaran lumpur. Desain yang kurang tepat pada bak sedimentasi dapat

menyebabkan terjadinya pencucian ulang (*re-entrainment*) flok ke dalam aliran air, yang kemudian akan membebani media filtrasi dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, dalam perencanaan instalasi pengolahan air bersih skala besar maupun kecil, perlu diperhatikan aspek-aspek teknik sipil dan hidraulika yang mendukung kestabilan dan efisiensi proses sedimentasi [16]

2.2.3 Proses Filtrasi

Setelah partikel-partikel besar diendapkan, proses filtrasi dilakukan untuk menyaring partikel-partikel halus, mikroorganisme, dan zat terlarut lainnya. Sistem filtrasi umumnya terdiri dari media berlapis seperti pasir silika, kerikil, dan karbon aktif. Setiap lapisan memiliki fungsi tertentu: pasir silika untuk menyaring partikel tersuspensi, kerikil sebagai penyangga mekanik, dan karbon aktif untuk menyerap senyawa organik serta senyawa berbau. Teknologi filtrasi terus berkembang, mencakup penggunaan membran ultrafiltrasi (UF), nanofiltrasi (NF), dan *reverse osmosis* (RO) yang mampu menyaring molekul sangat kecil dan ion logam berat. Namun, untuk daerah terpencil atau sistem berbiaya rendah, penggunaan *biosand filter* tetap menjadi solusi efektif. *Biosand filter* yang ditingkatkan dengan media karbon aktif dari arang kayu mampu menurunkan kekeruhan hingga lebih dari 90% serta secara signifikan mengurangi kandungan bahan organik dalam air sumur di daerah gambut. Keunggulan dari sistem *biosand filter* tidak hanya terletak pada efisiensinya, tetapi juga kemudahan operasional dan pemeliharaan, menjadikannya cocok diterapkan dalam program penyediaan air bersih berbasis komunitas di daerah pedesaan dan wilayah rawan air[17]

2.3 Konsep Dasar Karakterisasi dan Kalibrasi Sensor

Dalam perancangan sistem kendali otomatis pada instalasi pengolahan air atau *Water Treatment Plant* (WTP), validitas data merupakan elemen fundamental yang menentukan keberhasilan proses pengendalian. Sensor, berfungsi mengubah besaran fisik atau kimia menjadi besaran listrik, baik berupa tegangan analog maupun arus listrik. Namun, sinyal keluaran dari transduser ini seringkali masih berupa data mentah (*raw data*) yang memiliki *noise* dan belum merepresentasikan nilai satuan standar yang dapat dipahami manusia. Oleh karena itu, diperlukan

proses karakterisasi dan kalibrasi untuk memetakan hubungan antara stimulus *Input* dan respons *Output* sensor. Pendekatan matematis yang paling efektif dan umum digunakan dalam sistem digital seperti PLC (*Programmable Logic Controller*) adalah analisis regresi. Analisis regresi bekerja dengan membentuk sebuah model fungsi alih (*transfer function*) yang mampu memprediksi nilai variabel dependen berdasarkan variabel independennya, dengan tujuan utama meminimalkan *Mean Squared Error* (MSE) atau rata-rata kuadrat antara nilai prediksi dan nilai actual[18].

2.3.1 Metode Regresi Linear

Metode regresi linear sederhana (*Simple Linear Regression*) adalah teknik statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara dua variabel kuantitatif dengan asumsi bahwa grafik hubungan keduanya membentuk garis lurus. Metode ini menjadi standar baku dalam kalibrasi sensor pH tipe elektroda kaca (*glass electrode*). Secara prinsip kerja elektrokimia, sensor pH bekerja berdasarkan Persamaan Nernst, di mana beda potensial yang dihasilkan oleh elektroda berbanding lurus dengan logaritma aktivitas ion hidrogen dalam larutan. Pada kondisi ideal dengan suhu 25°C, elektroda pH akan merespons perubahan tegangan sebesar -59,16 mV untuk setiap kenaikan satu satuan pH.

Namun, dalam implementasi riil, faktor penuaan elektroda (*aging*) dan kotoran pada membran kaca seringkali menyebabkan pergeseran nilai *offset* dan perubahan kemiringan (*slope*). Oleh karena itu, pendekatan regresi linear digunakan untuk mengompensasi penyimpangan tersebut. Persamaan matematis yang ditanamkan ke dalam algoritma PLC mengikuti format $y = ax + b$, di mana y adalah nilai pH aktual, x adalah data tegangan dari modul analog ke digital (ADC), a adalah gradien kemiringan garis yang merepresentasikan sensitivitas sensor, dan b adalah konstanta intersep. Penelitian terbaru yang dilakukan mengonfirmasi bahwa penerapan metode kuadrat terkecil dalam regresi linear pada sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT mampu menghasilkan akurasi pengukuran hingga 98% dengan tingkat presisi yang stabil, membuktikan bahwa karakteristik sensor pH masih berada dalam ranah linearitas yang dapat diprediksi [19].

2.3.1 Metode Regresi Polinomial

Berbeda dengan sensor pH, sensor kekeruhan (*Turbidity Sensor*) yang bekerja berdasarkan prinsip optik atau nefelometri memiliki karakteristik yang lebih kompleks. Sensor ini mendeteksi kekeruhan berdasarkan intensitas cahaya inframerah yang dihamburkan (*scattered*) atau ditransmisikan melalui partikel-partikel terlarut dalam air. Pada rentang kekeruhan rendah, hubungan antara tegangan dan nilai *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU) mungkin terlihat linear. Namun, pada konsentrasi partikel yang lebih tinggi, terjadi fenomena atenuasi cahaya yang menyebabkan penurunan tegangan *Output* tidak lagi proporsional secara linear, melainkan membentuk kurva lengkung (kurvilinear). Jika karakteristik non-linear ini didekati menggunakan garis lurus, akan terjadi kesalahan pembacaan yang signifikan (*underfitting*), terutama pada nilai ekstrem.

Untuk mengatasi ketidaklinearitas tersebut, digunakan metode regresi polinomial derajat dua (Orde 2). Metode ini memodelkan hubungan antar variabel sebagai fungsi kuadratik dengan persamaan umum $y = ax^2 + bx + c$. Dalam persamaan ini, variabel x (tegangan) dipangkatkan untuk mengakomodasi kelengkungan kurva karakteristik sensor.

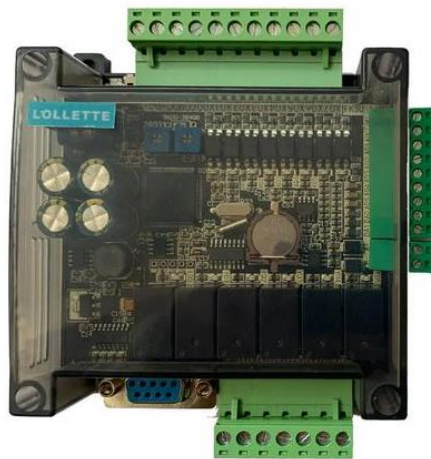
2.4 Mitsubishi FX3U

PLC (Programmable Logic Controller) Mitsubishi FX3U merupakan generasi ketiga dari seri mikro-PLC FX yang dikembangkan oleh Mitsubishi Electric. Seri ini dirancang sebagai penerus dari FX2N dengan peningkatan signifikan pada kecepatan pemrosesan, kapasitas memori, dan fleksibilitas fungsi. Dalam hierarki sistem kendali industri, FX3U dikategorikan sebagai high-performance micro PLC yang mampu menangani aplikasi otomasi skala kecil hingga menengah dengan presisi tinggi[20].

Identifikasi spesifikasi pada seri FX3U dapat dilihat melalui kode penamaannya, yaitu FX3U-xxMR/ES atau FX3U-xxMT/ES. Kode "xx" menunjukkan jumlah total titik Input/Output (I/O), sedangkan kode huruf di belakangnya menunjukkan tipe output. Dalam penelitian ini, digunakan seri FX3U-14MR, di mana kode 'M' menunjukkan unit utama (*Main Unit*) dan kode 'R' menandakan tipe output *relay*.

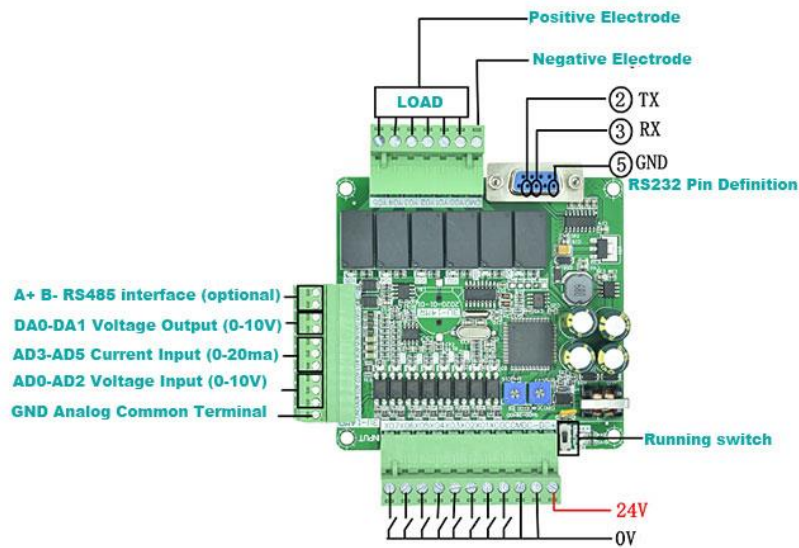
Dalam sistem otomatisasi pengolahan air ini, PLC FX3U berfungsi sebagai unit pemroses pusat (Central Processing Unit). PLC bertugas mengakuisisi data dari sensor analog (pH dan turbidity) dan sensor digital (pelampung), kemudian memprosesnya menggunakan logika Ladder Diagram untuk mengendalikan aktuator seperti pompa, *solenoid valve*, dan motor pengaduk.

FX3U memiliki kecepatan eksekusi instruksi dasar mencapai $0,065 \mu\text{s}$ per instruksi, yang sangat memadai untuk menangani proses kontrol real-time seperti dosing bahan kimia yang memerlukan ketepatan waktu. Selain itu, PLC ini mendukung komunikasi serial RS-232 dan RS-485 yang kompatibel dengan protokol Modbus RTU, memudahkannya untuk diintegrasikan dengan perangkat HMI (Human Machine Interface) untuk monitoring sistem[20]. Visualisasi bentuk fisik dari PLC Mitsubishi FX3U dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2. 1 PLC FX3U [20]

Untuk menjamin keberhasilan proses perakitan dan pengkabelan (wiring), pemahaman mendalam terhadap konfigurasi terminal *Input* dan *Output* sangatlah krusial. Kesalahan dalam penyambungan terminal dapat berakibat fatal pada kerusakan komponen atau kegagalan fungsi sistem. Oleh karena itu, diagram konfigurasi terminal beserta *Datasheet* teknis PLC yang memuat informasi dimensi dan pinout diperlihatkan secara detail pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2. 2 Datasheet PLC FX3U [20]

Berdasarkan data teknis dan manual operasional pabrikan, spesifikasi rinci dari PLC Mitsubishi FX3U yang diimplementasikan dalam penelitian ini, mencakup parameter tegangan, jumlah I/O, dan fitur komunikasi, dirangkum dalam **Tabel 2.1** berikut ini.

Tabel 2. 1 Spesifikasi PLC FX3U [20]

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	24V DC
Jumlah <i>Input</i> Digital	8
Jumlah <i>Output</i> Digital	6 (Relay)
<i>Input</i> Analog (Built-in)	6 Channel (0-10V / 0-20mA), 12-bit
Komunikasi	RS-232, RS-485 (Modbus RTU Supported)
Memori Program	Hingga 64.000 langkah (Steps)
Bahasa Pemrograman	Ladder Diagram, Instruction List, SFC
Kecepatan Eksekusi	0.065 μ s per instruksi dasar
Proteksi	Watchdog timer, Short circuit protection
Suhu Operasional	0 – 55°C

2.5 Peristaltic Dosing Pump

Peristaltic Dosing Pump adalah jenis pompa perpindahan positif (*positive displacement pump*) yang dirancang khusus untuk memompa cairan dengan volume yang sangat presisi dan terkontrol. Prinsip kerja pompa ini didasarkan pada mekanisme peristaltik, yaitu gerakan meremas selang fleksibel secara bergantian oleh sejumlah roller yang berputar pada rotor. Tekanan dari *roller* akan menjebak cairan di dalam selang dan mendorongnya ke arah keluaran (*outlet*), sementara vakum yang terbentuk di belakang *roller* akan menarik cairan baru masuk[21].

Dalam sistem ini, *dosing pump* digunakan untuk menginjeksikan larutan koagulan (tawas) ke dalam tangki pengadukan. Pemilihan pompa jenis ini didasarkan pada keunggulannya dalam mencegah kontaminasi dan korosi, karena cairan tawas hanya bersentuhan dengan selang silikon dan tidak pernah menyentuh komponen mekanis pompa seperti gear atau motor. Hal ini sangat krusial mengingat sifat kimia tawas yang korosif terhadap logam. Selain itu, debit aliran (*flow rate*) yang dihasilkan pompa ini sangat linear terhadap kecepatan putaran motor, memungkinkan pengendalian dosis yang akurat melalui pengaturan durasi aktif (*time-based dosing*) oleh PLC[22]. Bentuk fisik dosing pump yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 *Peristaltic Dosing Pump* [22]

Untuk memastikan pompa ini sesuai dengan kebutuhan sistem dosing tawas, spesifikasi teknis dari model NKP-DA-S10B yang digunakan, termasuk tegangan kerja dan laju aliran, disajikan secara lengkap dalam **Tabel 2.2**.

Tabel 2. 2 Spesifikasi *Peristaltic Dosing Pump* [22]

Parameter	Spesifikasi
Model	NKP-DA-S10B
Tegangan Operasi	24V DC
Arus Kerja	0.15 A
Laju Aliran (Flow Rate)	5.2 – 90 ml/menit
Material Selang	Silicone Tube
Diameter Selang	3.0 mm (ID) x 5.0 mm (OD)
Suhu Operasional	0 – 40°C
Model	NKP-DA-S10B

2.6 Stepdown LM2596

Step down LM2596 adalah konverter penurun tegangan yang mengonversikan tegangan *Input* DC menjadi *Output* tegangan DC. Modul LM2596 ini tersedia dalam berbagai macam jenis *Output* tegangannya antara lain, 3,3V, 5V, 12V, dan versi yang dapat disesuaikan. Modul ini memiliki rentang tegangan *Input* antara 4V-40V dengan *Output* 3,3V-35V dan batas arusnya adalah 3A dengan proteksi berupa pembatas arus hubungan singkat. Berikut merupakan spesifikasi dari modul step down LM2596 [23]

Modul LM2596 bekerja dengan menggunakan teknik *pulse-width modulation* (PWM) pada frekuensi 150 kHz, yang memungkinkan efisiensi daya mencapai 92%. Prinsip kerjanya melibatkan penggunaan *Mosfet switching* untuk mengontrol proses pengisian dan pelepasan energi dalam induktor, yang kemudian disaring oleh kapasitor agar tegangan keluarannya tetap stabil dan minim *noise*. Salah satu keunggulan LM2596 dibandingkan dengan regulator linier konvensional adalah kemampuannya dalam menangani arus tinggi tanpa menghasilkan panas berlebih. Hal ini menjadikannya ideal untuk digunakan dalam aplikasi daya yang membutuhkan kestabilan tegangan, seperti sistem PLC dan sensor dalam

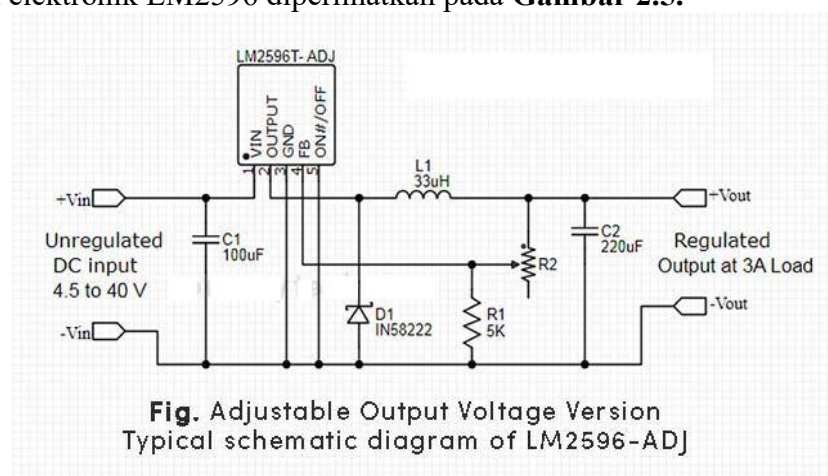
pengolahan air. Selain itu, tegangan keluaran LM2596 dapat diatur dengan potensiometer, sehingga pengguna dapat menyesuaikan tegangan sesuai dengan kebutuhan spesifik sistem[24]

Dalam sistem otomatisasi pengolahan air berbasis PLC, modul LM2596 berperan penting dalam menyediakan tegangan yang sesuai untuk sensor dan aktuator. Salah satu implementasinya adalah menurunkan tegangan 24V DC ke 5V DC, yang diperlukan oleh sensor pH 4502C untuk beroperasi dengan baik. Selain itu, Dengan penggunaan LM2596, sistem otomatisasi pengolahan air dapat beroperasi dengan lebih efisien dan stabil, karena setiap komponen mendapatkan suplai daya yang sesuai tanpa risiko tegangan berlebih atau fluktuasi daya yang dapat merusak komponen elektronik. Pada **Gambar 2.4** merupakan *Stepdown* LM2596 untuk menurunkan tegangan sesuai kebutuhan.



Gambar 2. 4 *Stepdown* LM2596 [25]

Untuk memahami cara kerja internal modul dalam meregulasi tegangan, skematik rangkaian elektronik LM2596 diperlihatkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 5 Skematik *Stepdown* LM2596 [25]

Berdasarkan skematik dan *Datasheet* komponen, spesifikasi teknis modul LM2596 yang menjadi acuan dalam perancangan catu daya sensor dirangkum dalam **Tabel 2.3** di bawah ini.

Tabel 2. 3 Spesifikasi *Stepdown* LM2596 [25]

Spesifikasi	Keterangan
Tegangan <i>Input</i> (min)	4 V
Tegangan <i>Input</i> (maks)	40 V
Tegangan <i>Output</i> (min)	3,3 V
Tegangan <i>Output</i> (maks)	35 V
Arus maks	3 A
Kisaran suhu pengoperasian	-40 – 125°C
Topology	<i>Buck</i>
Tipe	Konverter
Peralihan frekuensi (min)	110 kHz
Peralihan frekuensi (maks)	173 kHz

2.7 Sensor pH 4502 C

Sensor pH 4502C adalah sensor elektrokimia yang digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan suatu larutan dengan mendeteksi konsentrasi ion hidrogen (H^+) dalam air. Sensor ini bekerja berdasarkan prinsip bahwa ion hidrogen dalam larutan akan menghasilkan tegangan listrik pada elektroda kaca yang sensitif terhadap pH. Tegangan yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi sinyal analog dalam rentang 0 – 5V, yang dapat diolah oleh mikrokontroler seperti Arduino atau *Programmable Logic Controller* (PLC) untuk pemantauan dan kontrol otomatis[26]

Dalam sistem pengolahan air, sensor pH 4502C memiliki peran penting untuk memastikan bahwa tingkat pH air tetap dalam batas yang aman. Proses koagulasi dalam pengolahan air minum memerlukan pengendalian pH agar reaksi kimia dengan koagulan seperti tawas ($Al_2(SO_4)_3$) dapat berlangsung optimal. Tawas bekerja efektif pada pH antara 5,5 – 7,5, di mana ion aluminium dapat berinteraksi

maksimal dengan partikel tersuspensi di dalam air dan membentuk flok yang dapat dengan mudah dipisahkan melalui sedimentasi atau filtrasi. Dengan pemantauan pH secara *real-time* menggunakan sensor pH 4502C, sistem otomatisasi dapat mengatur dosis koagulan secara lebih presisi, sehingga meningkatkan efisiensi proses pengolahan air dan mengurangi penggunaan bahan kimia yang berlebihan[26]. Selanjutnya, untuk menghitung nilai pH berdasarkan data digital dalam PLC, digunakan rumus:

$$pH = \left(\frac{\text{Nilai PLC}}{4095} \right) \times 14 \quad (2.1)$$

Dalam implementasi praktis pada sistem kendali digital menggunakan PLC, sinyal analog dari sensor tidak dibaca sebagai milivolt murni, melainkan dikonversi menjadi data digital (integer). Untuk menerjemahkan data digital tersebut kembali menjadi nilai pH yang dapat dibaca manusia, digunakan pendekatan regresi linear. Persamaan konversi atau kalibrasi yang diprogram ke dalam PLC adalah **Persamaan 2.1:**

$$pH = m \cdot (\text{Nilai Digital}) + C \quad (2.2)$$

Dimana:

- pH = Nilai pH hasil perhitungan yang ditampilkan di HMI.
- (Slope) = Gradien kemiringan garis karakteristik sensor, yang didapatkan dengan membandingkan perubahan pH terhadap perubahan data digital ($\Delta pH / \Delta \text{Digital}$). Nilai ini biasanya negatif karena tegangan sensor pH berbanding terbalik dengan nilai pH.
- C (Intercept) = Nilai konstanta offset, yaitu nilai pH teoritis ketika sinyal digital bernilai nol.

Dengan adanya integrasi sensor pH 4502C dalam sistem otomatisasi berbasis PLC, pemantauan kualitas air dapat dilakukan secara lebih akurat dan efisien. Sensor ini memungkinkan sistem untuk mendeteksi fluktuasi pH secara *real-time* dan menyesuaikan dosis bahan kimia secara otomatis guna menjaga kualitas air yang optimal. Dengan demikian, penggunaan sensor pH 4502C dalam sistem pengolahan air tidak hanya meningkatkan efisiensi pengolahan, tetapi juga

mengurangi penggunaan bahan kimia secara berlebihan, sehingga lebih ramah lingkungan. Bentuk fisik sensor pH 4502C beserta modulnya diperlihatkan pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2. 6 Sensor pH 4502C [27]

Agar data yang diperoleh valid, spesifikasi teknis sensor harus dipahami dengan baik. Rincian spesifikasi sensor pH 4502C tercantum dalam **Tabel 2.4**.

Tabel 2. 4 Spesifikasi Sensor pH 4502C [27]

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	5V DC
Konsumsi Daya	< 20mA
Rentang Pengukuran pH	0 - 14 pH
Akurasi	± 0.1 pH (pada suhu 25°C)
Resolusi	0.01 pH
Output	Analog (0 - 5V)
Suhu Operasi	0 - 60°C
Waktu Respons	< 1 menit

2.8 Gravity Analog Turbidity Sensor

Sensor *turbidity* merupakan perangkat yang digunakan untuk mengukur tingkat kekeruhan air berdasarkan jumlah cahaya yang tersebar akibat adanya partikel

tersuspensi dalam larutan. Prinsip kerja sensor ini mengikuti hukum Tyndall Effect, di mana cahaya yang dikirimkan ke dalam cairan akan mengalami hamburan yang intensitasnya sebanding dengan jumlah partikel yang ada. Sensor turbidity terdiri dari dua komponen utama, yaitu sumber cahaya inframerah (IR LED) dan fotodioda sebagai penerima cahaya. Apabila air jernih, maka cahaya yang diterima oleh sensor akan lebih banyak, sedangkan jika air keruh, cahaya akan lebih banyak tersebar sehingga intensitas cahaya yang diterima oleh fotodioda akan berkurang. Hasil pengukuran dari sensor ini dikonversi menjadi tegangan analog yang dapat diproses oleh sistem kendali berbasis Arduino, Raspberry Pi, atau PLC untuk menentukan tingkat kejernihan air secara *real-time* [28]

Sensor Gravity Analog Turbidity memiliki peran penting dalam sistem pengolahan air, khususnya dalam proses koagulasi menggunakan tawas ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Dalam proses ini, jumlah koagulan yang diberikan harus sesuai dengan tingkat kekeruhan air baku. Sensor turbidity memungkinkan sistem otomatisasi untuk mendeteksi apakah air sudah cukup jernih setelah diberikan dosis tawas awal. Jika air masih keruh, sistem akan secara otomatis menambahkan koagulan hingga tingkat kejernihan yang diinginkan tercapai. Hal ini meningkatkan efisiensi penggunaan bahan kimia dan mengurangi residu koagulan yang tidak perlu, sehingga menghasilkan air yang lebih bersih dan ramah lingkungan[28] Visualisasi sensor ini dapat dilihat pada **Gambar 2.7**.



Gambar 2. 7 Sensor Gravity Analog Turbidity [29]

Berbeda dengan sensor pH yang memiliki karakteristik linear, hubungan antara tegangan keluaran sensor *turbidity* dengan tingkat kekeruhan dalam satuan NTU (*Nephelometric Turbidity Units*) bersifat non-linear dan mengikuti pola polinomial orde dua. Berdasarkan kurva karakteristik standar yang dikeluarkan oleh pabrikan DFRobot, model matematis untuk mengkonversi tegangan menjadi nilai kekeruhan dinyatakan dalam **Persamaan 2.3**:

$$NTU = (-1120.4 \cdot V^2) + (5742.3 \cdot V) - 4352.9 \quad (2.3)$$

Keterangan variabel persamaan:

- NTU= Nilai kekeruhan hasil kalkulasi.
- V = Tegangan *Output* sensor yang terbaca oleh PLC (Volt).
- -1120.4 = Koefisien kuadratik yang menentukan kelengkungan kurva respon sensor.
- 5742.3 = Koefisien linear yang menentukan kemiringan kurva.
- -4352.9 = Konstanta penyeimbang kurva.

Persamaan ini menunjukkan bahwa pada tegangan tinggi (mendekati 4.2V), nilai NTU akan mendekati nol (air jernih), sedangkan pada tegangan rendah (sekitar 2.5V), nilai NTU akan mencapai maksimum (air keruh) [27]. Selanjutnya, untuk menghitung nilai NTU berdasarkan data digital dalam PLC, digunakan rumus:

$$NTU = \left(\frac{\text{Nilai PLC}}{4095} \right) \times 3000 \quad (2.4)$$

Spesifikasi teknis sensor turbidity ini, yang mencakup rentang pengukuran dan tegangan kerja, disajikan secara detail dalam **Tabel 2.5** berikut.

Tabel 2. 5 Spesifikasi Sensor Gravity Analog Turbidity [29]

Parameter	Spesifikasi
Tegangan Operasi	5V DC
Konsumsi Daya	< 40mA
Rentang Pengukuran	0 - 3000 NTU
<i>Output</i> Sinyal	Analog (0-4.5V) dan Digital (TTL)
Resolusi	0.1 NTU (pada rentang rendah)
Akurasi	±5% FS (<i>Full scale</i>) pada suhu 25°C

2.9 Agitator

Agitator tipe dayung (*paddle agitator*) merupakan salah satu jenis alat pengaduk yang banyak digunakan dalam berbagai proses pencampuran, terutama untuk media cairan dengan viskositas rendah hingga sedang, serta dalam aplikasi di mana proses pengadukan harus berjalan lambat dan stabil. *Paddle agitator* terdiri dari bilah datar yang dipasang tegak lurus pada poros penggerak, dan dirancang untuk menghasilkan aliran radial yang mendistribusikan bahan dari pusat ke dinding tangki, lalu kembali ke bagian bawah secara sirkular.

Dalam konteks pengolahan air bersih, khususnya pada proses koagulasi dan flokulasi, *paddle Agitator* digunakan untuk mencampur air dengan bahan kimia koagulan seperti aluminium sulfat (tawas). Pencampuran harus terjadi secara merata namun lembut agar partikel-partikel halus dapat menggumpal tanpa terurai kembali akibat kecepatan putaran yang terlalu tinggi.

Selain itu, *paddle agitator* juga digunakan secara luas untuk mengaduk cairan yang kental dengan pencampuran sedikit bahan yang memiliki granul kasar atau tebal. Aplikasi mesin ini mencakup industri pengolahan bumbu cair, bahan perekat, produk kosmetik, serta bahan berbasis minyak atau sejenisnya. Salah satu keunggulan dari *paddle agitator* adalah kemampuannya untuk menyapu dan mengeruk sisa bahan dari dinding tangki hingga dasar, sehingga memastikan tidak ada bagian dari bahan yang tertinggal atau tidak tercampur.

Secara umum, *paddle agitator* dirancang dengan diameter sekitar 150 mm dan mampu beroperasi pada kecepatan maksimum 800 RPM. Namun dalam praktiknya, kecepatan kerja umumnya dibatasi lebih rendah, sekitar 60–300 RPM, untuk menjaga kestabilan dan efisiensi pencampuran, terutama jika digunakan dalam pengolahan air kapasitas kecil. Desain bilah agitator yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2. 8 *Agitator Tipe Dayung*

2.10 Motor Pengaduk

Motor pengaduk merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pengolahan air berbasis otomasi, khususnya pada tahap koagulasi. Fungsi utamanya adalah menciptakan aliran turbulen ringan agar koagulan seperti aluminium sulfat (tawas) dapat tercampur secara merata dengan air baku. Pada sistem pengolahan air otomatis ini, digunakan motor DC RS-555 24V sebagai aktuator utama untuk pengadukan. RS-555 termasuk dalam kategori *Permanent magnet dc* (PMDC) motor yang memiliki keunggulan berupa ukuran ringkas, konsumsi daya rendah, dan cukup mudah dikendalikan kecepatannya menggunakan sinyal PWM (Pulse Width Modulation). Motor ini umum digunakan dalam peralatan rumah tangga kecil, mainan robotik, dan sistem otomasi skala laboratorium, motor ini tetap mampu menghasilkan torsi yang cukup untuk kebutuhan pengadukan ringan[30].

Motor RS-555 memiliki dimensi bodi sekitar 56 mm panjang dan 35 mm diameter, dengan poros berdiameter 3,17 mm. Motor ini bekerja optimal pada tegangan 6–24V DC, dan memiliki kecepatan putar tanpa beban (*no-load speed*) mencapai 12.000 RPM pada 24V. Dalam aplikasi pengadukan air bersih skala laboratorium sebesar 3 liter, kecepatan motor dikontrol melalui modul PWM yang terintegrasi dengan sistem PLC, untuk menurunkan putaran hingga 120 RPM. Kecepatan ini tergolong ideal untuk proses koagulasi karena menciptakan aliran turbulen ringan tanpa menyebabkan kerusakan flock atau vortex yang merugikan[31].

Parameter kecepatan putar motor yang umumnya tertera dalam satuan RPM (Revolutions Per Minute) perlu dikonversi ke dalam satuan standar internasional (SI) untuk perhitungan daya, yaitu kecepatan sudut dalam radian per detik. Konversi ini dilakukan menggunakan **Persamaan 2.3**:

$$\omega = \frac{2 \pi \cdot \text{RPM}}{60} = \frac{2 \pi \cdot 120}{60} = 12,57 \text{ rad/s} \quad (2.4)$$

Selanjutnya, untuk menentukan kapasitas daya motor yang dibutuhkan agar proses pengadukan berjalan optimal tanpa membebani sistem kelistrikan, digunakan hubungan antara torsi mekanik dan kecepatan sudut. Daya mekanik (P Mekanik) yang dihasilkan oleh motor dirumuskan dalam **Persamaan 2.5**. Dengan luas bilah pengaduk $A = 0,004 \text{ m}^2$, jari-jari pengaduk $r = 0,02 \text{ m}$, dan massa jenis air $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$, torsi yang dibutuhkan dihitung menggunakan persamaan:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot r^2 \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} \cdot 997 \cdot 0,004 \cdot (0,02)^2 \cdot (12,57)^2 \approx 0,079 \text{ Nm} \quad (2.5)$$

Sedangkan daya mekanik yang diperlukan dihitung dari:

$$P = T \cdot \omega = 0,079 \cdot 12,57 \approx 0,99 \text{ Watt} \quad (2.6)$$

Dari perhitungan ini, terlihat bahwa daya yang dibutuhkan sangat kecil, yaitu di bawah 1 Watt. Sementara itu, motor RS-555 memiliki daya *Output* maksimum sekitar 15–30 Watt, sehingga dapat menggerakkan pengaduk dengan efisiensi

tinggi, suhu kerja stabil, dan beban rendah. Bentuk fisik motor pengaduk ini terlihat pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2. 9 Motor DC RS-555[31]

Motor ini dipilih karena dimensinya yang *compact* namun bertenaga, sangat sesuai untuk prototipe skala laboratorium. Spesifikasi teknis motor RS-555 dirangkum dalam **Tabel 2.6**.

Tabel 2. 6 Spesifikasi Motor DC RS 555 [31]

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Operasi	24	V
Kecepatan Tanpa Beban	120	RPM
Torsi Maksimum	1.7	Nm
Daya <i>Output</i> Maksimum	15 – 30	Watt
Arus Maksimum (Full Load)	3 – 6	Ampere
Diameter Motor	35	mm

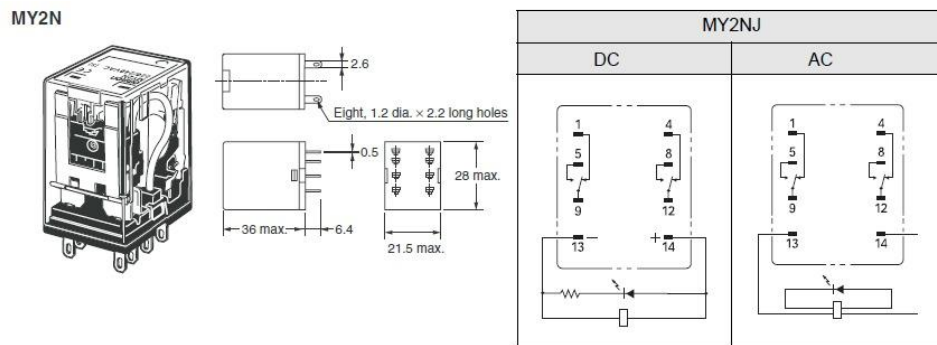
2.11 Relay

Relay MY2N merupakan jenis *miniature electromagnetic relay* tipe DPDT (*Double pole double throw*) yang dirancang untuk aplikasi umum pada sistem kontrol daya rendah hingga menengah. Relay ini memiliki dua kontak NO dan dua kontak NC yang bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik. Ketika arus listrik mengalir ke kumparan, medan magnet yang dihasilkan akan menarik armatur

logam, mengubah posisi kontak dari terbuka menjadi tertutup atau sebaliknya. Proses ini memungkinkan pengendalian sirkuit eksternal seperti pompa, motor, atau aktuatur dengan menggunakan sinyal kontrol bertegangan rendah.

Relay MY2N termasuk dalam seri relay plug-in dari OMRON yang dilengkapi indikator operasi LED (merah untuk arus AC dan hijau untuk DC) dan tersedia dalam berbagai tegangan kumparan seperti 12V, 24V, hingga 220/240V baik AC maupun DC. Model ini memiliki kontak perak (Ag) yang dirancang untuk ketahanan terhadap korosi dan keandalan *switching*. Dalam hal performa, relay ini memiliki waktu aktif dan lepas maksimal 20 milidetik, dengan daya konsumsi sekitar 0.9–1.3 VA (untuk AC) atau setara 0.9 W (untuk DC). Selain itu, MY2N didesain untuk beroperasi pada suhu lingkungan antara -55°C hingga 70°C, dan memiliki ketahanan mekanis hingga 50 juta siklus dan ketahanan elektrik hingga 500 ribu siklus pada beban penuh [32] Bentuk fisik relay ini dapat dilihat pada

Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 Relay MY2N [32]

Untuk memastikan pemilihan relay yang tepat sesuai beban, spesifikasi detail mengenai kemampuan kontak dan tegangan koil *relay* tersebut disajikan pada **Tabel 2.7.**

Tabel 2. 7 Spesifikasi Relay MY2N [32]

Parameter	Spesifikasi MY2N
Tipe Kontak	DPDT (<i>Double pole double throw</i>)
Jumlah Kontak	2 NO + 2 NC
Beban Kontak Maksimum	5 A / 250 VAC atau 5 A / 30 VDC
Tegangan Kumparan (Coil)	100, 110, 200, 220 V AC/DC
Konsumsi Daya Coil	Sekitar 0.9 W (DC), 0.9–1.3 VA (AC)
Indikator Operasi	LED (Merah: AC, Hijau: DC)
Waktu Aktif (<i>Operate time</i>)	≤ 20 ms
Waktu Lepas (<i>Release time</i>)	≤ 20 ms
Resistansi Isolasi	$\geq 1.000 \text{ M}\Omega$ (pada 500 VDC)

2.12 Solenoid Valve

Solenoid Valve merupakan jenis aktuator elektromekanis yang digunakan untuk mengontrol aliran fluida seperti air, udara, atau cairan kimia, dengan memanfaatkan gaya elektromagnetik dari lilitan solenoida untuk membuka atau menutup katup secara otomatis. Katup ini memiliki dua posisi, yaitu terbuka (*normally open*) dan tertutup (*normally closed*), yang ditentukan oleh keadaan aktif atau tidaknya arus listrik. Ketika arus listrik dialirkan ke koil, medan magnet yang terbentuk akan menarik *plunger* (batang feromagnetik) dan membuka jalur fluida. Jika arus listrik dihentikan, pegas akan mengembalikan posisi *plunger* ke posisi semula dan menutup jalur fluida. Prinsip kerja ini menjadikan *solenoid valve* sangat efektif dalam sistem kontrol cairan otomatis seperti pengolahan air, irigasi otomatis, dan sistem pendingin [33]

Solenoid Valve G3/4 merujuk pada ukuran koneksi ulir sebesar 3/4 inci (inch), yang umum digunakan pada sistem pipa industri menengah dengan debit air cukup besar. Dalam sistem pengolahan air berbasis PLC, *solenoid valve* biasanya digunakan untuk membuka atau menutup saluran air secara otomatis berdasarkan

masuk dari sensor kualitas air seperti pH dan kekeruhan. Saat sensor mendeteksi bahwa kualitas air telah sesuai standar, PLC akan mengaktifkan *solenoid Valve* untuk mengalirkan air ke tahap proses berikutnya atau ke reservoir penyimpanan. Penggunaan *solenoid Valve* dalam sistem otomatis memberikan keunggulan dalam kecepatan *respons*, presisi pengendalian aliran, dan efisiensi operasional. *Solenoid Valve* mampu memberikan kontrol aliran presisi tinggi dengan konsumsi daya minimal, menjadikannya pilihan yang ideal untuk sistem yang sensitif terhadap fluktuasi tekanan dan kualitas air[33]

Integrasi *solenoid Valve* dengan sensor kualitas air dan modul kendali berbasis PLC sangat efektif untuk proses pengolahan air industri. *Solenoid Valve* digunakan untuk membuka saluran pembuangan limbah hanya ketika parameter kualitas air seperti pH dan NTU berada di luar batas toleransi. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *solenoid Valve* tidak hanya mendukung otomatisasi tetapi juga mendukung efisiensi penggunaan air dan menjaga kualitas proses secara *real-time*[34]. Penggunaan bahan plastik pada bodi katup dipilih karena sifatnya yang tahan karat dan aman untuk aplikasi pengolahan air bersih. Visualisasi komponen *solenoid Valve* berbahan plastik ini ditunjukkan pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2. 11 Solenoid Valve [30]

Pemilihan spesifikasi katup 3/4 inci disesuaikan dengan debit aliran yang diinginkan pada sistem perpipaan prototipe. Karakteristik teknis detail dari katup ini, termasuk tegangan kerja dan material, dirincikan dalam **Tabel 2.8**.

Tabel 2. 8 Spesifikasi Solenoid Valve [30]

Parameter	Spesifikasi
Tipe Operasi	Normally Closed (NC)
Mekanisme	Direct Acting / Zero Pressure
Ukuran Port	3/4 Inch (20-25mm)
Tegangan Kerja	220 VAC
Tekanan Kerja	0 - 0.02 MPa (Low Pressure)
Material Bodi	Plastik (Food Grade PP/Nylon)
Media	Air Bersih / Air Baku
Tipe Operasi	Normally Closed (NC)
Mekanisme	Direct Acting / Zero Pressure
Ukuran Port	3/4 Inch (20-25mm)

2.13 Sensor *Water Level Non-Contact*

Dalam sistem otomatisasi penampungan cairan, deteksi ketinggian air (*water level*) merupakan parameter krusial untuk mencegah tangki meluap (*overflow*) atau

kekeringan (*dry running*) pada pompa. Pada penelitian ini, digunakan Sensor *Water Level Non-Contact* yang bekerja tanpa bersentuhan langsung dengan cairan. Sensor ini umumnya menggunakan prinsip induksi kapasitif (*capacitive sensing*) untuk mendeteksi keberadaan cairan di balik dinding wadah non-logam, seperti plastik, kaca, atau keramik[35].

Keunggulan utama dari sensor tipe non-contact adalah ketahanannya terhadap korosi dan kontaminasi, karena sensor tidak terpapar langsung dengan bahan kimia atau air yang diukur. Hal ini menjadikannya sangat ideal untuk aplikasi pengolahan air bersih atau tangki kimia koagulan (tawas) di mana kebersihan dan ketahanan material sangat diutamakan. Sensor dipasang menempel pada dinding luar tangki pada ketinggian yang diinginkan. Ketika level air naik dan mencapai posisi sensor, perubahan kapasitansi dielektrik akan dideteksi oleh sirkuit internal sensor, yang kemudian memicu perubahan sinyal *Output* [35].

Sinyal keluaran dari sensor ini berupa sinyal digital (*High/Low*). Berdasarkan spesifikasi, tegangan keluaran saat aktif (*High Level*) akan mengikuti tegangan *Input* (V_{in}), sedangkan saat tidak aktif (*Low Level*) akan bernilai 0V. Karakteristik ini memudahkan integrasi dengan PLC Mitsubishi FX3U yang bekerja pada logika 24V, karena sensor dapat disuplai langsung dengan sumber daya 24V tanpa memerlukan konverter level tegangan tambahan. Visualisasi bentuk fisik sensor non-contact ini dapat dilihat pada **Gambar 2.12**.



Gambar 2. 12 Sensor Water Level Non-Contact [35]

Agar sensor dapat bekerja dengan optimal dan responsif terhadap perubahan level air, spesifikasi teknis perangkat harus diperhatikan. Rincian spesifikasi sensor yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam **Tabel 2.9**.

Tabel 2. 9 Spesifikasi Sensor Water Level Non-Contact [35]

Parameter	Spesifikasi
Model	XKC-Y25-NPN
Prinsip Kerja	Induksi Kapasitif (Capacitive Sensing)
Metode Deteksi	Non-Contact (Tidak bersentuhan langsung dengan cairan)
Tipe Output	Digital (High/Low)
Tegangan Kerja	5V - 24V DC
Material Dinding	Non-logam (Plastik, Kaca, Keramik, Akrilik)
Ketebalan Dinding (Sensitivitas)	Mampu menembus hingga 8 mm
Indikator Status	LED pada bodi sensor
Fitur Utama	Tahan korosi dan kontaminasi

2.14 Power Supply 24V

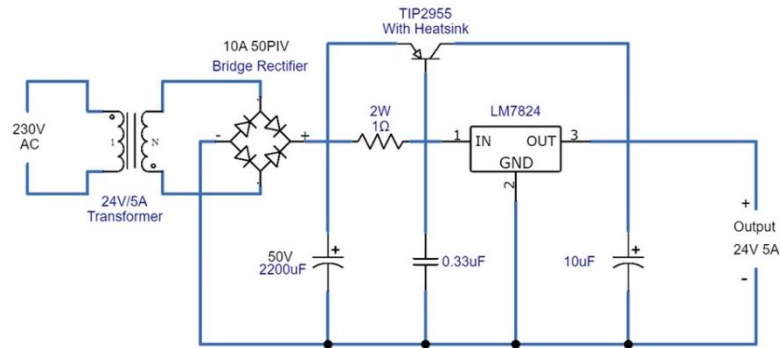
Rangkaian *power supply* 24V 5A berfungsi sebagai sumber utama energi listrik untuk seluruh perangkat dalam sistem otomatisasi pengolahan air. *Power supply* ini menyuplai tegangan DC stabil sebesar 24 volt dengan arus maksimum hingga 5 ampere, sehingga mampu menghidupi beban seperti PLC Mitsubishi FX3U, sensor pH 4502C, Gravity Analog Turbidity Sensor, motor DC RS-555 sebagai pengaduk, dan *solenoid Valve*. Dalam aplikasinya, *power supply* ini termasuk dalam jenis *Switching Mode Power Supply* (SMPS), yaitu rangkaian catu daya yang mengubah arus AC (Alternating Current) menjadi DC (*Direct current*) dengan efisiensi tinggi melalui proses penyearahan, *filtering*, dan *switching* frekuensi tinggi.

Kelebihan utama dari *power supply* 24V adalah dimensinya yang kompak, efisiensi mencapai $\geq 85\%$, serta kemampuannya mempertahankan tegangan *Output* tetap meskipun terjadi perubahan arus beban yang signifikan. *Power supply* ini

biasanya dilengkapi rangkaian proteksi seperti *overvoltage protection* (OVP), *overcurrent protection* (OCP), *short circuit protection* (SCP), dan *over temperature protection* (OTP) untuk menjaga keselamatan sistem dan komponen yang terhubung. Ini penting karena perangkat seperti motor DC dan *solenoid Valve* dapat menyebabkan lonjakan arus saat awal dinyalakan (*inrush current*) yang jika tidak ditangani, dapat menyebabkan penurunan tegangan atau bahkan kerusakan sistem. Untuk memastikan bahwa power supply dapat mendukung seluruh beban secara stabil, dilakukan estimasi daya total dari seluruh komponen sistem. Berdasarkan Hukum Ohm dan prinsip daya listrik arus searah (DC), total daya yang dibutuhkan adalah jumlah dari perkalian tegangan kerja (V) dengan arus total yang ditarik oleh seluruh beban (PLC, sensor, *solenoid Valve*, dan motor). Hubungan ini dinyatakan dalam **Persamaan 2.6**.

$$P_{total} = V \times I = 24V \times 5A = 120 \text{ Watt} \quad (2.7)$$

Daya 120 Watt ini menjadi daya maksimum yang dapat disuplai secara kontinu. Komponen dengan daya tertinggi adalah motor DC RS-555, terutama saat proses pengadukan dimulai. Sementara komponen lainnya PLC umumnya mengonsumsi sekitar 6–10 Watt, sementara sensor pH dan turbidity masing-masing di bawah 1 Watt, dan *solenoid Valve* sekitar 6–8 Watt saat aktif. Karena konsumsi daya tiap komponen relatif kecil, total kebutuhan daya masih berada dalam batas aman dari kapasitas *power supply* 120 Watt. penggunaan power supply 24V 5A sudah lebih dari cukup dan dapat diandalkan dalam sistem skala kecil. Skematik rangkaian dasar dari unit *power supply* ini dapat dilihat pada **Gambar 2.13**. Sedangkan bentuk fisik dari unit *power supply* industrial yang akan dipasang pada panel kontrol ditunjukkan pada **Gambar 2.14**.



Gambar 2. 13 Circuit *Power Supply* 24V 5A [36]



Gambar 2. 14 *Power Supply* [36]

Kemampuan suplai daya dari unit ini sangat krusial untuk mencegah penurunan tegangan (voltage drop) saat semua aktuator aktif bersamaan. Detail spesifikasi power supply tersebut dirangkum dalam **Tabel 2.10**.

Tabel 2. 10 Spesifikasi *Power Supply* 24V 5A [36]

Spesifikasi	Nilai
Tegangan	24 V
Arus	5 A
Daya	120 Watt
Tegangan <i>Input</i>	AC 100-240V

2.15 *Human Machine Interface (HMI)*

Dalam sistem otomasi industri modern, interaksi yang efektif antara operator dan mesin sangatlah krusial. *Human Machine Interface* (HMI) berfungsi sebagai jembatan visual yang memungkinkan operator untuk memantau kondisi proses

(*monitoring*) dan memberikan perintah kendali (*controlling*) tanpa perlu mengakses kode program PLC secara langsung. Pada penelitian ini, digunakan HMI merek Weintek dengan tipe MT8071iE dari seri iE. Perangkat ini dipilih karena keandalannya di lingkungan industri, antarmuka layar sentuh yang responsif, serta kompatibilitasnya yang luas dengan berbagai merek PLC, termasuk Mitsubishi FX3U.

Peran utama MT8071iE dalam sistem pengolahan air ini adalah sebagai panel kendali terpusat. Melalui layar HMI, operator dapat melihat nilai *real-time* dari kualitas air (pH dan *turbidity*), memantau status operasional aktuator (*solenoid Valve*, *dosing pump*, dan *mixer*), serta mengganti mode operasi antara Otomatis dan Manual. Selain itu, HMI ini juga memungkinkan operator untuk mengubah parameter proses, seperti *setpoint* kekeruhan atau durasi pengadukan, secara langsung melalui tombol virtual yang disediakan. Visualisasi bentuk fisik HMI Weintek MT8071iE dapat dilihat pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2. 15 Weintek MT8071iE

Secara perangkat keras, MT8071iE dilengkapi dengan layar sentuh jenis TFT LCD berukuran 7 inci dengan resolusi tinggi (800 x 480 piksel), yang mampu menampilkan grafis dan animasi proses dengan tajam. Unit ini ditenagai oleh prosesor 32-bit RISC Cortex-A8 600MHz yang menjamin transisi antar halaman layar berjalan mulus tanpa *lag*. Untuk komunikasi data, HMI ini menyediakan *port* serial (RS-232/RS-485) dan *port* Ethernet, yang memudahkannya terhubung dengan PLC FX3U menggunakan protokol komunikasi Modbus atau *host link*.

Spesifikasi teknis mendetail dari HMI MT8071iE dirangkum dalam **Tabel 2.11** berikut.

Tabel 2. 11 Spesifikasi Weintek MT8071iE

Parameter	Spesifikasi
Tipe Layar	7" TFT LCD (16.7 Juta Warna)
Resolusi	800 x 480 piksel
Prosesor	32-bit RISC Cortex-A8 600MHz
Memori	<i>Flash</i> 128 MB, RAM 128 MB
Port Komunikasi	COM1: RS-232, COM2: RS-485 2W/4W, COM3: RS-485 2W
Konektivitas Lain	USB 2.0 Host, <i>Ethernet</i> 10/100 Base-T
Tegangan <i>Input</i>	24V DC $\pm$ 20%
Konsumsi Arus	350mA @ 24VDC
Perlindungan	NEMA4 / IP65 (Panel Depan)
Perangkat Lunak	EasyBuilder Pro

2.16 GX Works2

Dalam pengembangan sistem kendali berbasis PLC Mitsubishi, perangkat lunak (software) memegang peranan vital sebagai media antarmuka antara engineer dan perangkat keras. GX Works2 adalah perangkat lunak engineering generasi terbaru yang dikembangkan oleh Mitsubishi Electric untuk memprogram dan mengonfigurasi PLC seri FX, Q, dan L. Perangkat lunak ini dirancang sesuai standar internasional IEC 61131-3, mendukung berbagai bahasa pemrograman, namun dalam penelitian ini fokus utamanya adalah penggunaan Ladder Diagram (LD) yang merupakan standar industri paling umum.

Fungsi utama GX Works2 dalam penelitian ini adalah sebagai lingkungan pengembangan terpadu (*Integrated Development Environment*) untuk merancang logika kontrol sistem pengolahan air. Melalui *software* ini, penulis dapat membuat

algoritma kendali proses koagulasi, mengatur pengalamatan (*addressing*) *Input/Output*, serta mengonfigurasi parameter modul analog untuk sensor pH dan *turbidity*. Selain itu, GX Works2 dilengkapi dengan fitur simulasi (*offline simulation*) yang memungkinkan pengujian logika program secara virtual tanpa harus terhubung ke PLC fisik, sehingga meminimalkan risiko kesalahan logika sebelum implementasi nyata. Tampilan antarmuka lingkungan kerja GX Works2 diperlihatkan pada **Gambar 2.16**.



Gambar 2. 16 CX Progammer

(Sumber : Dokumen pribadi)

2.17 EasyBuilder

EasyBuilder adalah perangkat lunak (software) *Human Machine Interface* (HMI) yang dikembangkan oleh Weintek Labs Inc., digunakan untuk merancang antarmuka pengguna pada perangkat HMI agar dapat berkomunikasi secara langsung dengan sistem otomasi seperti PLC. Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk membangun tampilan visual (*graphical interface*) yang interaktif sehingga operator dapat memantau, mengontrol, dan mengatur parameter dari sistem secara *real-time* [37]

Versi terbaru dari perangkat lunak ini adalah EasyBuilder Pro, yang mendukung berbagai model HMI Weintek seperti seri MT, cMT, dan iE. Dengan menggunakan EasyBuilder, pengguna dapat melakukan konfigurasi layar, mengatur alamat

register PLC, serta mendesain berbagai elemen kontrol seperti tombol, grafik, animasi, dan indikator status. EasyBuilder mendukung komunikasi melalui berbagai protokol industri, termasuk Modbus RTU/TCP, Siemens S7, Mitsubishi MELSEC, Omron *Host Link*, dan banyak lainnya, sehingga menjadikannya sangat fleksibel dalam integrasi dengan berbagai perangkat kendali industri [37]]

Dalam penerapannya pada sistem pengolahan air berbasis PLC, EasyBuilder digunakan untuk menampilkan parameter-parameter penting seperti nilai pH, tingkat kekeruhan (turbidity), status pompa, katup, dan alarm sistem. Data dari sensor pH dan turbidity yang dibaca oleh modul analog *Input* PLC dapat ditampilkan dalam bentuk grafik tren, indikator digital, atau alarm visual yang memudahkan pengambilan keputusan secara cepat dan akurat oleh operator. Tampilan antarmuka perancangan pada EasyBuilder Pro dapat dilihat pada **Gambar 2.17**.



Gambar 2. 17 EasyBuilder
(Sumber : Dokumen pribadi)