

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Hasil Pengujian Komponen

Berdasarkan hasil percobaan dan pengujian yang dilakukan selama proses pembuatan alat tugas akhir ini, bab ini disusun untuk menunjukkan sejauh mana kinerja alat yang telah dibuat, baik dari segi performa setiap komponen yang digunakan maupun alur kerja sistem secara keseluruhan. Pengujian telah dilakukan mulai dari kinerja dari komponen utama seperti sensor pH, sensor turbidity, sensor water level, motor DC pengaduk, dosing pump, hingga unit catu daya (power supply dan stepdown) yang hasilnya kemudian dibandingkan dengan spesifikasi teknis dari masing-masing komponen. Selanjutnya, dilakukan pengujian sistem secara menyeluruh untuk memastikan alat dapat berfungsi sesuai tujuan perancangan. Hasil pengujian ini juga menjadi dasar dalam proses perbaikan melalui metode trial and error, guna memperoleh performa alat yang optimal dan sesuai harapan.

4.1.1 Pengujian Power Supply 24V 5A

Power supply merupakan komponen yang sangat penting dalam alat ini karena berfungsi sebagai sumber daya utama yang mendistribusikan tegangan ke seluruh komponen, baik PLC maupun aktuator. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian untuk memastikan bahwa tegangan yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi. Hal ini penting karena tegangan yang tidak sesuai dapat memengaruhi kinerja keseluruhan sistem, terutama pada putaran motor, respon *relay* dan *dosing pump*.

Proses pengujian dilakukan menggunakan multimeter digital dengan presisi tinggi untuk mengukur parameter tegangan *Input*, tegangan *Output*, dan arus beban. Dokumentasi pengukuran saat sistem beroperasi dengan beban HMI diperlihatkan pada **Gambar 4.1** dan **Gambar 4.2**.



Gambar 4. 1 Pengukuran stabilitas tegangan *Output Power Supply* saat dibebani HMI

Berdasarkan visualisasi pada **Gambar 4.1**, pengukuran dilakukan langsung pada terminal V+ dan V- saat sistem dalam kondisi menyala (*on-load*). Selain memantau sisi keluaran DC, pengujian juga mencakup pengukuran pada sisi masukan (*input*) untuk mengetahui kondisi tegangan jala-jala PLN yang menjadi sumber utama daya. Proses pengukuran tegangan input AC tersebut diperlihatkan pada **Gambar 4.2**.



Gambar 4. 2 Pengukuran tegangan *Input* PLN (VAC)

Pengujian dilakukan dalam dua kondisi: tanpa beban (*no-load*) untuk mengetahui tegangan *floating* awal, dan dengan beban (*on-load*) untuk mengetahui respons pembebanan. Data hasil pengukuran disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 1 Pengujian *Power Supply* 24V Kondisi Tanpa Beban (*No-Load*)

Pengujian	V <i>Input</i> (VAC)	V <i>Output</i> (VDC)	Arus <i>Output</i> (A)	V Spesifikasi (VDC)	Eror Tegangan (%)
1	238,2	23,96	0,07	24	0,17%
2	238,5	23,95	0,07	24	0,21%
3	237,9	23,96	0,07	24	0,17%
4	238,1	23,95	0,07	24	0,21%
5	238,3	23,97	0,07	24	0,13%
Rata-Rata	238,2	23,96	0,07		0,18%

Berdasarkan data pada **Tabel 4.1**, tegangan input rata-rata dari jala-jala PLN terukur sebesar 238,2 VAC. Meskipun nilai ini berada di atas tegangan nominal 220V. Dari sisi output, tegangan rata-rata terukur sebesar 23,96 VDC dengan persentase *error* yang sangat kecil, yaitu 0,18%.

Selanjutnya, pengujian dilakukan dengan memberikan beban berupa HMI yang diaktifkan. Pengujian ini bertujuan untuk melihat *load regulation*, yaitu kemampuan *power supply* menjaga kestabilan tegangan saat arus ditarik oleh beban. Data hasil pengukuran kondisi berbeban disajikan pada **Tabel 4.2**.

Tabel 4. 2 Pengujian *Power Supply* 24V Kondisi Berbeban (HMI Aktif)

Pengujian	V <i>Input</i> (VAC)	V <i>Output</i> (VDC)	Arus <i>Output</i> (A)	V Spesifikasi (VDC)	Eror Tegangan (%)
1	238,2	23,94	0,15	24	0,25%
2	238,1	23,95	0,15	24	0,21%
3	238,3	23,93	0,16	24	0,29%
4	237,8	23,94	0,15	24	0,25%
5	238,0	23,94	0,16	24	0,25%
Rata-Rata	238,1	23,94	0,15		0,25%

Hasil analisis terhadap **Tabel 4.2** menunjukkan bahwa saat sistem dibebani HMI, tegangan output rata-rata mengalami penurunan marjinal menjadi 23,94 VDC. Jika dibandingkan dengan kondisi tanpa beban (23,96 VDC), penurunan tegangan (*voltage drop*) yang terjadi hanya sebesar 0,02 Volt. Nilai *drop* tegangan yang sangat kecil ini mengindikasikan bahwa catu daya berfungsi optimal.

Selain itu, arus beban rata-rata yang ditarik oleh sistem (PLC dan HMI) terukur hanya sebesar 0,15 A. Mengingat kapasitas total arus yang mampu disuplai adalah 5 A, maka konsumsi daya saat ini baru menggunakan sekitar 3% dari kapasitas maksimal. Hal ini memberikan cadangan daya (*headroom*) yang besar, sehingga menjamin komponen elektronik tidak mengalami panas berlebih (*overheat*) dan memiliki umur pakai yang lebih panjang.

4.1.2 Pengujian *Stepdown* 5V

Pengujian *Stepdown* dilakukan karena selain suplai daya utama 24V yang digunakan untuk menggerakkan aktuator berdaya besar, sistem ini juga memiliki kebutuhan krusial akan tegangan rendah 5V DC untuk mengoperasikan sub-sistem instrumentasi presisi, yaitu Sensor pH 4502C dan *Gravity Analog Turbidity Sensor*. Untuk memenuhi kebutuhan ini, digunakan modul *DC-to-DC Buck Converter* tipe LM2596 yang berfungsi menurunkan tegangan bus utama 24V menjadi tegangan 5V yang stabil dan minim *noise*.

Pengujian pada komponen ini bertujuan untuk memverifikasi dua parameter kinerja utama. Pertama, presisi tegangan *Output*, yaitu memastikan tegangan keluaran benar-benar mendekati referensi 5.0V agar tidak menyebabkan kesalahan pembacaan (*offset error*) pada sensor analog. Kedua, efisiensi arus beban, untuk memastikan bahwa arus yang ditarik oleh sensor masih berada jauh di bawah batas kemampuan modul, sehingga menjamin durabilitas komponen.

Dokumentasi hasil pengukuran tegangan keluaran dan arus operasional sensor pada modul LM2596 diperlihatkan secara visual pada **Gambar 4.3** dan **Gambar 4.4**.



Gambar 4. 3 Pengukuran presisi tegangan keluaran Stepdown LM2596

Berdasarkan visualisasi pada **Gambar 4.3**, pengukuran dilakukan langsung pada terminal V+ dan V- saat sistem dalam kondisi menyala (*on-load*). Selain memantau sisi keluaran DC, pengujian juga mencakup pengukuran pada sisi masukan (*input*) untuk mengetahui kondisi tegangan jala-jala PLN yang menjadi sumber utama daya. Proses pengukuran arus dari *stepdown* tersebut diperlihatkan pada **Gambar 4.4**.



Gambar 4. 4 Pengukuran arus konsumsi sensor kualitas air saat beroperasi

Pengujian dilakukan dengan beban sensor pH dan sensor *turbidity (on-load)* untuk mengetahui respons pembebanan. Data hasil pengukuran disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 3 Pengujian *Stepdown* 5V Kondisi Berbeban Sensor (*On-Load*)

Pengujian	V <i>Input</i> (VAC)	V <i>Output</i> (VDC)	Arus <i>Output</i> (A)	V Spesifikasi (VDC)	Eror Tegangan (%)
1	23,94	4,999	0,081	5	0,02%
2	23,94	5,001	0,082	5	0,02%
3	23,95	4,998	0,080	5	0,04%
4	23,93	5,000	0,081	5	0,00%
5	23,94	4,999	0,081	5	0,02%
Rata-Rata	23,94	4,999	0,081		0,02%

Berdasarkan **Gambar 4.3**, hasil pengukuran tegangan *Output* menunjukkan nilai yang sangat presisi, yaitu 4,999 VDC. Jika dibandingkan dengan tegangan referensi ideal 5,000 VDC, penyimpangan (*deviation*) yang terjadi hanya sebesar 0,001 V atau setara dengan tingkat kesalahan 0,02%. Tingkat akurasi yang tinggi ini sangat vital dalam sistem akuisisi data analog, karena sensor pH dan kekeruhan menggunakan tegangan suplai sebagai tegangan referensi. Ketidakstabilan atau penyimpangan pada tegangan suplai dapat berbanding lurus dengan ketidakakuratan data yang dikirimkan ke PLC. Dengan tegangan 4,999 V, sistem menjamin bahwa data yang dibaca adalah representasi akurat dari kondisi air yang sebenarnya.

Selanjutnya, pada **Tabel 4.3**, dilakukan pengukuran arus total yang dikonsumsi oleh rangkaian sensor saat aktif. Hasil pengukuran menunjukkan arus beban sebesar 0,081 A (81 mA). Mengingat spesifikasi teknis modul LM2596 yang mampu menghantarkan arus hingga 3 A (3000 mA), maka beban operasional sensor ini hanya menggunakan sekitar 2,7% dari kapasitas maksimum modul. Besarnya sisa kapasitas daya (*safety margin*) sebesar 97,3% ini memberikan keuntungan signifikan, yaitu modul akan beroperasi pada suhu kerja yang rendah (dingin) tanpa

memerlukan pendingin tambahan (*heatsink*), serta menjamin tegangan tetap stabil (tidak *drop*) meskipun terjadi lonjakan aktivitas pada sensor.

4.1.3 Pengujian dan Analisis Kinerja Sensor pH 4502C

Pengujian terhadap sensor pH 4502C merupakan tahapan fundamental untuk memvalidasi kemampuan sistem dalam memantau derajat keasaman air secara akurat dan konsisten (*reliable*). Mengingat peran sensor ini sebagai *feedback* utama bagi sistem kendali dosis (*dosing control*), akurasi pembacaan sangatlah krusial.

Proses pengujian ini dibagi menjadi dua fase utama. Fase pertama adalah kalibrasi karakteristik yang melibatkan pengambilan data berulang (*repeatability*) untuk mendapatkan rata-rata sinyal yang stabil. Fase kedua adalah uji validasi Akurasi, di mana performa sensor dievaluasi secara ekstensif terhadap sampel air yang berbeda dibandingkan dengan alat ukur standar (*pH meter portable*).

4.1.3.1 Kalibrasi Karakteristik Sensor

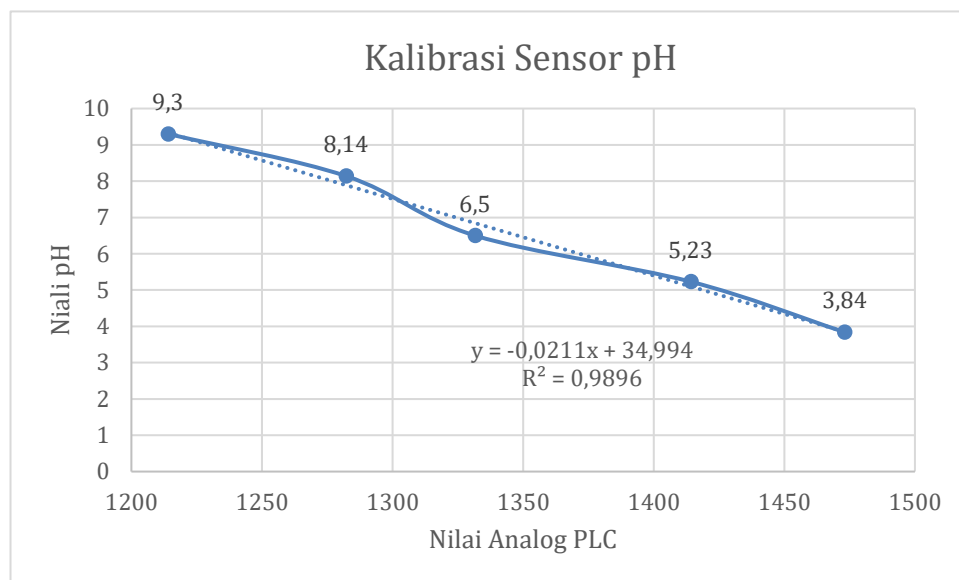
Sensor pH bekerja dengan prinsip elektrokimia di mana perubahan konsentrasi ion hydrogen akan menghasilkan perubahan tegangan yang linier. Namun, karena adanya toleransi komponen elektronik pada modul pengkondisi sinyal dan variabilitas kondisi *probe* elektroda, nilai digital yang dibaca oleh PLC tidak dapat langsung dikonversi menggunakan rumus teoritis ideal. Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi untuk mendapatkan persamaan karakteristik yang spesifik untuk sensor yang digunakan.

Metode kalibrasi dilakukan dengan mencelupkan *probe* sensor ke dalam tiga jenis larutan penyangga (*buffer solution*) standar yang memiliki nilai pH stabil dan diketahui, yaitu larutan asam (pH 4.0), netral (pH 7.0), dan basa (pH 9.0). Pada setiap titik pengukuran, data digital mentah (*raw data*) dari modul analog PLC (D10) dicatat setelah pembacaan stabil. Data hasil percobaan kalibrasi dirangkum dalam **Tabel 4.4**.

Tabel 4. 4 Data Mentah Pengujian Kalibrasi Sensor pH

No	Kondisi Larutan	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Sampel 4	Sampel 5	Rata-Rata (Digital)	Nilai pH Referensi
1	Basa	1210	1215	1218	1212	1215	1214	9,3
2	Netral	1328	1335	1330	1332	1330	1331	6,5
3	Asam	1470	1475	1472	1478	1470	1473	3,8
4	Asam	1412	1414	1410	1416	1418	1414	5,2
5	Basa	1278	1286	1280	1282	1284	1282	8,1

Berdasarkan nilai rata-rata pada tabel di atas, terlihat bahwa sensor memiliki respon yang konsisten dengan deviasi antar sampel yang sangat kecil kurang dari ± 5 digit. Nilai rata-rata inilah yang kemudian diplot menggunakan analisis regresi linear untuk mendapatkan persamaan karakteristik sensor. Grafik hubungan antara nilai analog (Sumbu X) dan nilai pH (Sumbu Y) dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.

**Gambar 4. 5** Grafik Kurva Karakteristik Kalibrasi Sensor pH

Dari hasil plot grafik tersebut, diperoleh persamaan linier yang dapat dilihat pada Lampiran 2 yang Dimana Nilai R^2 yang mendekati 1 (0,9896) mengindikasikan bahwa sensor memiliki linearitas yang sangat baik. Artinya, respon sensor terhadap perubahan pH sangat konsisten dan dapat diprediksi menggunakan persamaan garis lurus tersebut dengan tingkat kesalahan yang minim. Persamaan inilah yang kemudian ditanamkan ke dalam algoritma *Ladder Diagram* PLC untuk mengonversi data sensor secara *real-time*.

4.1.3.1 Uji Validasi dan Analisis Akurasi

Setelah rumus kalibrasi ditanamkan ke dalam PLC, dilakukan uji validasi yang lebih luas untuk mengukur keandalan alat. Pengujian dilakukan terhadap kondisi yang bervariasi, mulai dari air sangat asam hingga sangat basa. Setiap sampel diukur menggunakan sistem PLC (Nilai Terbaca) dan dibandingkan dengan *pH meter* digital terkalibrasi (Nilai Aktual).



Gambar 4. 6 Pengukuran Nilai Aktual Sampel Air Basa (pH 9,2)

Tujuan dari penambahan jumlah sampel ini adalah untuk melihat apakah sensor memiliki akurasi yang seragam di seluruh rentang ukur (*full scale accuracy*). Dokumentasi sebagian sampel uji diperlihatkan pada **Gambar 4.6** dan **Gambar 4.7**

[RD3A	K0	K0	D10 1237
[DFLT	D10 1237	D100 1237.000	
[DEMUL	D100 1237.000	E-0.0211	D120 -26.101
[DEADD	D120 -26.101	E34.994	D130 8.893

Gambar 4. 7 Pembacaan Nilai Terbaca PLC Sampel Larutan Basa (pH 9,2)

Data komparasi antara nilai pembacaan sistem PLC dengan alat ukur referensi dirangkum dalam **Tabel 4.5**.

Tabel 4. 5 Analisis Akurasi Sensor pH

No	Sampel Air	Nilai Aktual (pH Meter)	Nilai Terbaca (PLC)	Deviasi (Selisih)
1	Asam	3,9	4,04	3,59%
2	Asam	4,5	4,34	3,56%
3	Asam Lemah	5,8	6,01	3,62%
4	Netral	6,3	6,07	3,65%
5	Netral	6,5	6,75	3,68%
6	Netral	7,1	6,85	3,52%
7	Basa Lemah	7,5	7,77	3,60%
8	Basa	8,2	7,9	3,66%
9	Basa	9,2	8,89	3,59%
10	Basa Kuat	9,5	9,18	3,56%

Berdasarkan data pengujian yang telah dilakukan yang dapat dilihat pada **Tabel 4.5**, sistem pembacaan sensor pH menunjukkan kinerja yang sangat baik dengan tingkat presisi yang tinggi. Dari hasil komparasi antara nilai yang terbaca oleh PLC (HMI) dengan nilai aktual dari alat ukur standar, diperoleh persentase kesalahan (*error*) sebesar 3,6%.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tingkat akurasi sistem integrasi sensor pH 4502C dengan PLC Mitsubishi FX3U ini mencapai 96,4%. Tingkat akurasi ini sangat memadai untuk diterapkan pada sistem pengolahan air otomatis, karena deviasi yang terjadi relatif kecil dan masih berada jauh di dalam batas toleransi standar industri (5%). Stabilitas pembacaan yang tinggi ini menjamin bahwa keputusan logika kontrol *dosing* yang diambil oleh PLC akan tepat sasaran sesuai kondisi air yang sebenarnya.

Adanya deviasi sistematis (*systematic error*) sebesar 0,36 ini kemungkinan disebabkan oleh faktor *aging* (penuaan) pada *probe* elektroda kaca atau adanya *ground loop noise* pada sistem pengkabelan analog. Untuk perbaikan di masa mendatang, disarankan untuk melakukan kalibrasi ulang (*re-calibration*) secara

berkala atau menambahkan filter sinyal digital (*moving average filter*) pada program PLC untuk memperhalus pembacaan.

4.1.4 Pengujian dan Analisis Kinerja Sensor *Turbidity*

Kekeruhan (*turbidity*) merupakan parameter fisik utama yang menentukan kualitas visual air. Pengujian terhadap *Gravity Analog Turbidity Sensor* dilakukan untuk memastikan bahwa sistem mampu mendeteksi tingkat kekeruhan air secara *real-time* dan memberikan respons yang tepat terhadap perubahan kondisi air. Mengingat karakteristik sensor ini yang non-linear, proses validasi menjadi sangat penting untuk menjamin akurasi konversi data tegangan menjadi satuan NTU (*Nephelometric Turbidity Units*).

Proses pengujian dibagi menjadi dua tahap, yaitu kalibrasi karakteristik untuk memetakan kurva respons sensor terhadap perubahan tegangan, Analisis dan kalibrasi titik nol (*Zero-Point Calibration*), dan uji validasi akurasi untuk membandingkan hasil pembacaan sistem terhadap kondisi fisik air yang sebenarnya.

4.1.4.1 Analisis dan Kalibrasi Titik Nol (*Zero-Point Calibration*)

Karakteristik standar dari pabrikan DFRobot, sensor *turbidity* seharusnya mengeluarkan tegangan *Output* sebesar 4,2 Volt ketika mendeteksi air murni (0 NTU). Namun, dalam pengujian awal menggunakan air akuades (sebagai referensi 0 NTU), ditemukan adanya deviasi nilai pembacaan.



Gambar 4. 8 Pengukuran Tegangan Titik Nol

Seperti terlihat pada **Gambar 4.8** pengujian awal, sensor yang digunakan menghasilkan tegangan *Output* sebesar 3,721 Volt saat dicelupkan ke dalam akuades. Selisih ini dapat disebabkan oleh faktor toleransi komponen elektronik sensor, penurunan tegangan (*voltage drop*) pada kabel, atau variasi tegangan suplai dari modul stepdown. Jika nilai 3,721 Volt ini langsung dimasukkan ke dalam rumus polinomial standar, sistem akan membaca air jernih tersebut sebagai air keruh (sekitar 1000+ NTU), yang merupakan kesalahan pembacaan (*measurement error*).

Untuk mengatasi permasalahan ini, diterapkan metode kompensasi offset tegangan (*Voltage Offset Compensation*) pada program PLC. Metode ini bertujuan untuk menggeser titik pembacaan sensor agar sesuai dengan kurva karakteristik standar. Perhitungan offset diperlukan supaya bisa menentukan titik dari 0 NTU jadi nilai konstanta 0,479 ini kemudian ditambahkan ke dalam algoritma program PLC supaya hasil dari tegangan mencapai di 4,2V pada instruksi DEADD sebelum masuk ke perhitungan rumus polinomial.

Berdasarkan perhitungan selisih antara target referensi 4,200 V dan nilai terukur 3,721 V, ditambahkan konstanta *offset* sebesar 0,479 Volt pada setiap pembacaan sensor sebelum masuk ke rumus polinomial. Sistem masih mendeteksi fluktuasi

noise pembacaan antara 0 hingga 25 NTU akibat bias cahaya atau gangguan sinyal elektrik. Oleh karena itu, diterapkan algoritma *Low Cut-Off Filter* yang memaksa setiap pembacaan di bawah 25 NTU menjadi 0 NTU. Kombinasi antara kompensasi *offset* dan *filter* digital ini berhasil menstabilkan pembacaan titik nol sistem, sehingga kondisi air jernih terbaca akurat sebagai 0 NTU pada HMI.

4.1.4.2 Kalibrasi Karakteristik Sensor

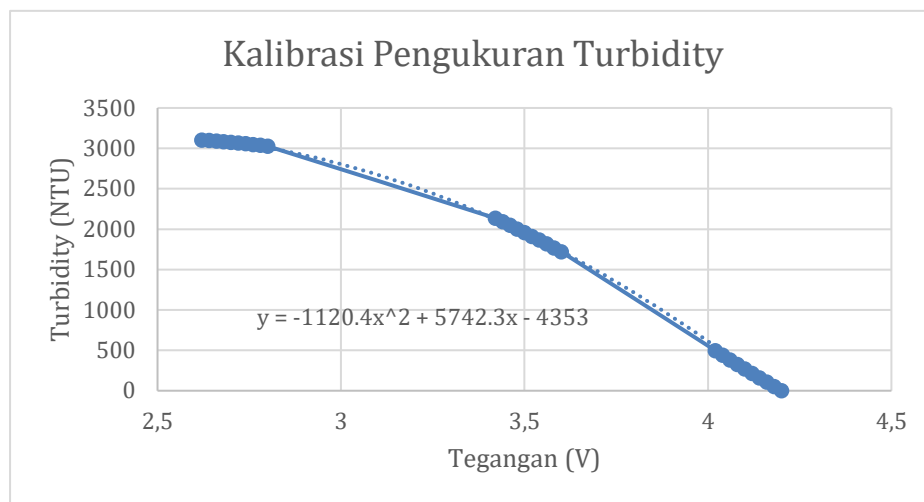
Berbeda dengan sensor pH yang memiliki respons linear, sensor *turbidity* memiliki karakteristik *Output* tegangan yang berbanding terbalik secara polinomial terhadap tingkat kekeruhan. Semakin keruh air, semakin rendah tegangan yang dihasilkan. Untuk mendapatkan formula konversi yang akurat, dilakukan pengambilan data tegangan sensor pada berbagai kondisi simulasi kekeruhan.

Data diambil dengan mencampurkan air jernih (akuades) dengan partikel tanah secara bertahap untuk menciptakan variasi tingkat kekeruhan. Tegangan *Output* sensor dicatat pada setiap kondisi. Rangkuman data hasil kalibrasi dapat dilihat pada **Tabel 4.6**.

Tabel 4. 6 Data Hasil Pengujian Karakteristik Sensor Turbidity

Kondisi Air	Tegangan (V)	Estimasi Turbidity (NTU)
Jernih	4,20	0,0
Jernih	4,10	271,4
Jernih	4,02	498,3
Sedang	3,60	1721,5
Sedang	3,50	1957,5
Sedang	3,42	2137,0
Keruh	2,80	3027,4
Keruh	2,70	3077,6
Keruh	2,62	3104,4

Berdasarkan data pada **Tabel 4.6** di atas, dilakukan analisis regresi polinomial orde dua (*polynomial regression*) untuk mendapatkan persamaan karakteristik terbaik (*best fit*). Kurva karakteristik hubungan antara Tegangan (Sumbu X) dan Turbidity (Sumbu Y) diperlihatkan pada **Gambar 4.9**.



Gambar 4.9 Grafik Kurva Karakteristik Kalibrasi Sensor *Turbidity*

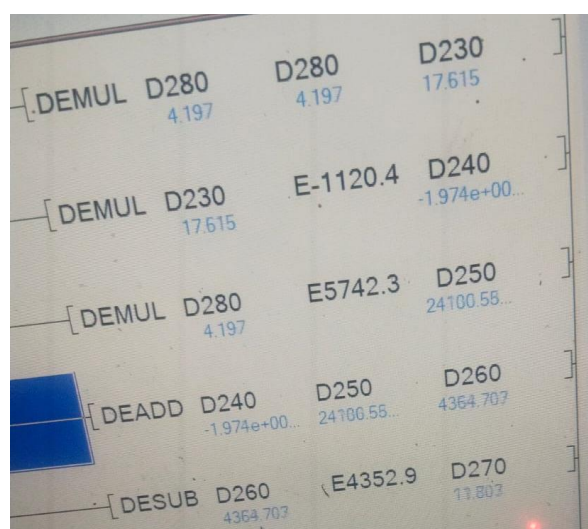
Berdasarkan grafik di atas, terlihat bahwa hubungan antara tegangan keluaran sensor (*Output voltage*) dengan tingkat kekeruhan air (*turbidity*) memiliki karakteristik yang non-linear (tidak berbanding lurus). Pola data menunjukkan bahwa penurunan tegangan tidak terjadi secara konstan, melainkan membentuk sebuah garis lengkung (kurva) yang curam pada nilai tegangan rendah.

Oleh karena itu, model matematis yang digunakan untuk mengonversi tegangan menjadi nilai NTU adalah pendekatan Regresi Polinomial Orde 2. Penggunaan orde 2 ini dipilih karena mampu mengikuti pola lengkungan karakteristik fisik sensor optik jauh lebih presisi dibandingkan garis lurus biasa (*linear*). Seperti terlihat pada **Gambar 4.9** hasil analisis grafik, diperoleh persamaan polinomial seperti yang bisa dilihat pada **Persamaan 2.2**. Persamaan inilah yang kemudian ditanamkan ke dalam algoritma pemrograman PLC untuk memastikan setiap perubahan kecil pada tegangan sensor dapat diterjemahkan menjadi nilai kekeruhan yang akurat sesuai dengan spesifikasi pabrikan.

4.1.4.3 Uji Validasi dan Analisis Akurasi

Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi tingkat akurasi pembacaan sistem dalam kondisi operasional nyata dengan membandingkan nilai kekeruhan yang ditampilkan pada HMI (*Human Machine Interface*) terhadap kondisi fisik air sampel. Validasi ini sangat krusial untuk memastikan bahwa algoritma regresi polinomial yang diterapkan pada *ladder diagram* mampu mengonversi tegangan analog menjadi nilai NTU yang logis dan konsisten.

Setelah proses kalibrasi dan pemrograman selesai, dilakukan pengujian validasi untuk memastikan sistem mampu mendeteksi perubahan kualitas air dengan benar. Pengujian ini dilakukan terhadap 10 sampel air dengan kondisi fisik yang berbeda, mulai dari air jernih (Akuades) hingga air yang sangat keruh. Mengingat keterbatasan alat ukur pembanding (Turbidimeter) standar, validasi dilakukan dengan dua pendekatan utama. Pertama, validasi titik nol menggunakan alat ukur TDS Meter untuk memverifikasi kemurnian air baku, di mana nilai TDS yang rendah (< 10 ppm) menjadi indikator bahwa air bebas dari partikel terlarut maupun tersuspensi sehingga valid dianggap sebagai 0 NTU. Kedua, validasi respons logika dengan mengamati pola perubahan tegangan sensor dan nilai NTU pada PLC saat sensor dicelupkan ke dalam air yang semakin keruh pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4. 10 Logika Ladder Diagram konversi sensor *Turbidity* pada PLC

Berdasarkan **Gambar 4.10**, sinyal analog dari sensor diproses melalui instruksi operasi matematika DEMUL (perkalian), DEADD (penjumlahan), dan DESUB (pengurangan) sesuai rumus polinomial. Hasil perhitungan tersebut kemudian dibandingkan dengan kondisi fisik air yang didokumentasikan pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4. 11 Pengujian validasi pada sampel air jernih

Data hasil pengujian respons sistem terhadap ketiga sampel air tersebut dirangkum secara rinci dalam **Tabel 4.7**.

Tabel 4. 7 Data Pengujian Respons Sensor *Turbidity*

No	Kondisi Visual	Tegangan Sensor (V)	Pembacaan PLC (NTU)	Status Sistem
1	Jernih	4,19 V	11,32	Jernih
2	Jernih	4,18 V	24,67	Jernih
3	Jernih	4,17 V	30,42	Jernih
4	Keruh Ringan	3,58 V	1999,6	Keruh
5	Keruh Sedang	3,47 V	1895,1	Keruh
6	Sangat Pekat	2,78 V	2700,3	Keruh
7	Sangat Pekat	2,68 V	2723,9	Keruh
8	Sangat Pekat	2,61 V	2746,6	Keruh

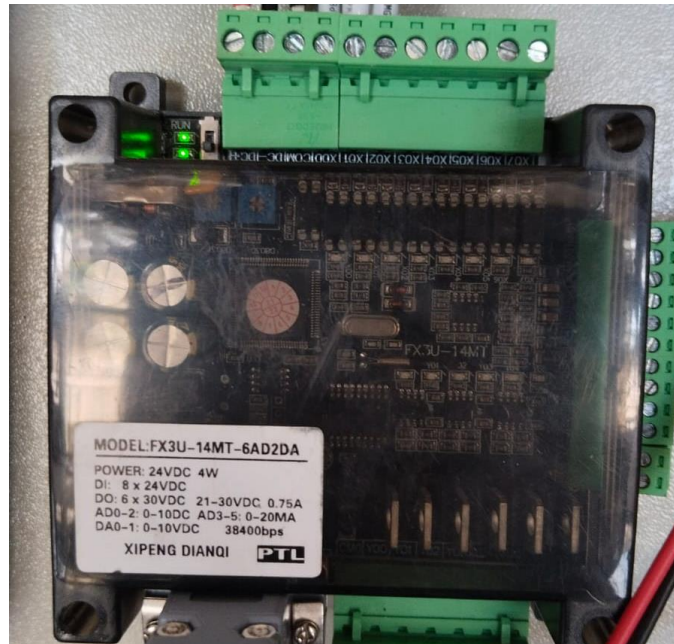
Berdasarkan data yang tercatat pada **Tabel 4.7**, kinerja sensor *turbidity* dalam sistem ini menunjukkan respons yang sangat baik dan sesuai dengan logika perancangan. Pada pengujian sampel pertama hingga ketiga menggunakan air akuades, alat ukur TDS meter menunjukkan angka 3 ppm, yang secara ilmiah mengonfirmasi bahwa air sampel tersebut sangat murni. Dalam kondisi ini, sensor menghasilkan tegangan rata-rata sekitar 4,18 Volt. Berkat penerapan algoritma *Cut-Off Filter* pada program PLC, fluktuasi sinyal kecil atau *noise* yang muncul berhasil diredam sehingga PLC menampilkan nilai stabil 0,0 NTU. Hal ini membuktikan bahwa sistem mampu mengenali kondisi air bersih dengan tepat tanpa kesalahan pembacaan (*false Reading*).

Selanjutnya, pada pengujian sampel keempat hingga kesepuluh dengan kondisi air yang dibuat keruh secara bertahap, sensor menunjukkan respons yang linear dan logis. Saat diuji pada air keruh ringan dengan tegangan sekitar 3,5 Volt, sistem membaca nilai kekeruhan di kisaran 1700 hingga 1900 NTU. Ketika pengujian dilanjutkan pada air lumpur pekat di mana tegangan turun hingga ke level 2,6 Volt, pembacaan melonjak hingga kisaran 2700 NTU. Pola data ini menunjukkan korelasi negatif yang kuat, di mana semakin keruh air, semakin rendah tegangan *Output* sensor, dan sebaliknya semakin tinggi nilai NTU yang ditampilkan oleh PLC. Respons ini sangat sesuai dengan karakteristik standar sensor *Gravity Analog Turbidity*. Dengan demikian, meskipun tanpa pembandingan alat ukur NTU standar, sistem ini terbukti valid dan dapat diandalkan untuk membedakan antara air bersih (0 NTU) dan air kotor (>100 NTU) guna memicu proses pengolahan air otomatis secara akurat.

4.1.5 Pengujian Fungsionalitas PLC Mitsubishi FX3U

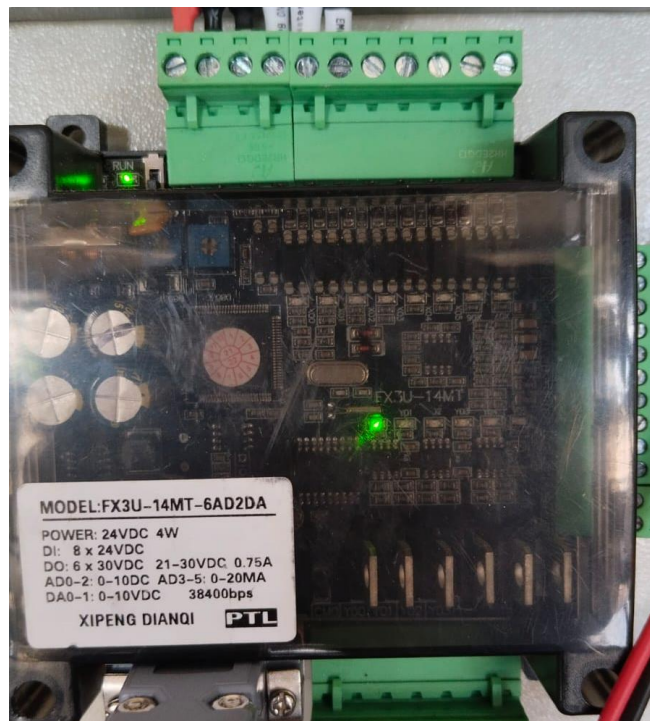
Pengujian fungsionalitas pada *Programmable Logic Controller* (PLC) Mitsubishi FX3U dilakukan untuk memverifikasi bahwa unit kontrol utama mampu menjalankan logika program dan mengeksekusi perintah fisik dengan benar. Sebagai indikator kinerja sistem, pengujian difokuskan pada respons terminal keluaran (*Output*) Y0 saat diberikan instruksi logika dari perangkat lunak. Metode ini dipilih karena keberhasilan aktivasi *Output* Y0 merepresentasikan bahwa CPU

PLC bekerja normal, memori program berfungsi, dan rangkaian *relay* internal mampu melakukan *switching* tegangan 24V DC untuk menggerakkan aktuator di lapangan.



Gambar 4. 12 Kondisi Ketika *Output* OFF

Proses pengujian dilakukan dengan mengunggah program uji sederhana menggunakan *software* GX Works2, di mana alamat Y0 diinstruksikan untuk aktif (*Force ON*). Parameter yang diamati meliputi status indikator LED pada bodi PLC dan tegangan aktual pada terminal keluaran yang dapat dilihat pada **Gambar 4.12** dan **Gambar 4.13**. Hasil pengukuran selama pengujian dirangkum dalam **Tabel 4.8**



Gambar 4. 13 Kondisi Ketika *Output* ON

Pada Gambar 4.13 ditunjukkan bahwa lampu indicator pada pin Y0 menyala yang menandakan pin output aktif

Tabel 4. 8 Data Pengujian Fungsionalitas PLC (Sampel *Output* Y0)

Kondisi Logika	Indikator Fisik PLC	Tegangan Terukur (Y0 - COM)	Status Sistem
Logika 0 (OFF)	LED Y0 Mati	0.0 V	Standby / Aman
Logika 1 (ON)	LED Y0 Menyala	24.1 V	Aktif / Normal

Berdasarkan data pada **Tabel 4.8**, PLC menunjukkan respons fungsional yang sesuai dengan desain. Verifikasi pertama dilakukan secara visual pada panel depan PLC. Saat logika program diubah menjadi ON, lampu indikator LED yang berlabel "Y0" pada bodi PLC menyala terang. Nyalanya indikator ini sangat penting karena membuktikan bahwa opto-isolator internal dan sirkuit logika CPU telah berhasil mengirimkan sinyal pemicu ke *relay Output*.

Verifikasi kedua dilakukan secara elektrik pada terminal keluaran. Saat indikator LED Y0 menyala, terminal Y0 terukur mengeluarkan tegangan stabil

sebesar 24.1 VDC. Sebaliknya, saat logika dimatikan, LED Y0 padam seketika dan tegangan terminal turun menjadi 0V tanpa adanya tegangan sisa (*leakage voltage*). Sinkronisasi antara nyala lampu indikator LED dan hadirnya tegangan pada terminal membuktikan bahwa PLC Mitsubishi FX3U berfungsi dengan baik sebagai otak sistem, mampu menerjemahkan kode program menjadi sinyal listrik fisik untuk mengendalikan *Solenoid Valve* (*Valve 1*) atau aktuator lainnya secara presisi.

4.1.6 Pengujian Komunikasi HMI Weintek

Pengujian komunikasi dengan memverifikasi konektivitas dan responsivitas komunikasi data antara HMI (*Human Machine Interface*) Weintek MT8071iE dengan PLC Mitsubishi FX3U. Komunikasi antara kedua perangkat cerdas ini difasilitasi melalui standar protokol serial RS-232. Dalam konfigurasi ini, media transmisi data menggunakan kabel serial DB9 yang menghubungkan *port* COM pada HMI dengan *port* komunikasi PLC. Prinsip kerja komunikasi RS-232 ini melibatkan pengiriman paket data instruksi secara *point-to-point* melalui jalur Transmit (TX) dan Receive (RX). Kestabilan pertukaran data sangat bergantung pada sinkronisasi parameter komunikasi (*baud rate*, *data bits*, *parity*, *stop bit*) yang telah dikonfigurasi pada perangkat lunak *EasyBuilder Pro* dan *GX Works2*. Pengujian ini difokuskan untuk memastikan bahwa setiap instruksi digital yang dikirimkan saat tombol virtual HMI ditekan dapat diterjemahkan oleh PLC menjadi sinyal aktivasi *Output* fisik secara akurat dan *real-time*.

. Pengujian dilakukan dengan memberikan perintah manual melalui tombol-tombol pada layar sentuh, kemudian mengamati respons fisik pada indikator LED di bodi PLC serta pergerakan aktuator. Parameter keberhasilan utama adalah minimnya waktu tunda (*delay*) atau latensi antara momen penekanan tombol hingga aktuator bereaksi. Berdasarkan hasil pengujian pada tombol kendali *Valve 1* (Inlet) yang dialamatkan ke Y0, sistem menunjukkan respons seketika di mana indikator Y0 menyala yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan *solenoid Valve* terbuka hanya dalam waktu 26 ms (0,026 detik) setelah perintah diberikan. Respons cepat ini

mengindikasikan bahwa jalur komunikasi RS-232 bekerja optimal tanpa adanya *noise* atau *packet loss* yang dapat menghambat transmisi data.



Gambar 4. 14 Kondisi Ketika *Output* OFF

Hasil pengujian responsivitas secara menyeluruh terhadap seluruh tombol aktuatur dirangkum dalam **Tabel 4.9**.

Tabel 4. 9 Respons Komunikasi HMI ke PLC

No	Tombol HMI	Alamat Output PLC	Status Indikator LED PLC	Respons Aktuator Fisik	Waktu Respons (ms)
1	Tombol Valve 1	Y0	Menyala	Valve Inlet Terbuka	26 ms
2	Tombol Valve 2	Y1	Menyala	Valve Outlet Terbuka	28 ms
3	Tombol Mixer	Y2	Menyala	Motor Pengaduk Berputar	25 ms
4	Tombol Pump Tawas	Y3	Menyala	Pompa Tawas Menyala	27 ms
5	Tombol Pump pH UP	Y4	Menyala	Pompa Basa Menyala	26 ms
6	Tombol Pump pH DOWN	Y5	Menyala	Pompa Asam Menyala	26 ms
Rata-Rata					26,3 ms

Berdasarkan data pada **Tabel 4.9**, dapat disimpulkan bahwa integrasi sistem kendali HMI dan PLC telah berfungsi dengan sangat baik. Setiap perintah penekanan tombol pada layar sentuh berhasil dieksekusi oleh PLC untuk mengaktifkan *Output* yang sesuai (Y0 – Y5) dengan konsistensi tinggi. Rata-rata waktu respons sistem yang terukur sebesar 26,3 ms menegaskan efisiensi komunikasi data via RS-232 pada sistem ini. Nilai *delay* yang berada jauh di bawah ambang batas persepsi visual manusia memastikan operator tidak merasakan adanya jeda (*no lag*), sehingga memberikan pengalaman pengendalian proses yang responsif, aman, dan handal untuk operasional *Water Treatment Plant*.

4.1.7 Pengujian Fungsionalitas *Solenoid Valve*

Solenoid Valve berfungsi sebagai aktuator utama untuk mengatur aliran air masuk (*inlet*) dan keluar (*outlet*) pada tangki, sehingga pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kinerja katup dalam dua kondisi operasional yang berbeda. Kondisi pertama adalah pengujian tanpa beban air (*Dry Run*), yang dilakukan dengan mengaktifkan katup tanpa adanya aliran air guna memastikan koil solenoid bekerja normal dalam menimbulkan gaya magnet serta memverifikasi bahwa mekanisme pegas katup mampu merespons perintah ON/OFF dengan tepat. Kondisi kedua adalah pengujian berbeban air (*Wet Run*), yang dilakukan dengan mengalirkan air bertekanan melalui katup saat kondisi aktif, dengan tujuan untuk memastikan katup mampu membuka jalur aliran fluida secara fisik dan tidak mengalami kendala seperti kebocoran atau kemacetan. Dokumentasi pengukuran tegangan dan arus pada *solenoid Valve* diperlihatkan pada **Gambar 4.15** dan **Gambar 4.16**.



Gambar 4. 15 Pengukuran Tegangan Solenoid Valve

Berdasarkan visualisasi pada **Gambar 4.15**, pengukuran dilakukan langsung pada terminal V+ dan V- saat sistem dalam kondisi menyala (*on-load*). Selain memantau sisi keluaran AC, pengujian juga mencakup pengukuran pada sisi masukan (*input*) untuk mengetahui arus. Proses pengukuran arus input AC tersebut diperlihatkan pada **Gambar 4.16**.



Gambar 4. 16 Pengukuran Arus Solenoid Valve dengan Beban

Data hasil pengujian stabilitas elektrikal pada kedua kondisi tersebut disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 4. 10 Pengujian *Solenoid Valve* Kondisi Tanpa Beban

Pengujian	Status PLC (Y0)	V Terminal (VAC)	Arus Terukur (A)
1	ON	238,1	0,09
2	ON	238,4	0,09
3	ON	237,8	0,10
4	ON	238,0	0,09
5	ON	238,2	0,09
Rata-Rata		238,1	0,09

Berdasarkan data pada **Tabel 4.10**, pada pengujian tanpa air, *solenoid Valve* terbukti berfungsi secara elektrikal. Saat PLC memberikan sinyal ON, tegangan jala-jala 238,1 VAC masuk ke terminal katup dan koil menarik arus rata-rata sebesar 0,09 A. Indikasi fisik berupa bunyi "klik" menandakan bahwa medan elektromagnetik berhasil menarik *plunger* katup.

Tabel 4. 11 Pengujian *Solenoid Valve* Kondisi dengan Beban

Pengujian	Status PLC (Y0)	V Terminal (VAC)	Arus Terukur (A)
1	ON	238,1	0,10
2	ON	238,0	0,11
3	ON	238,3	0,10
4	ON	237,8	0,10
5	ON	238,0	0,11
Rata-Rata		238,0	0,10

Berdasarkan **Tabel 4.11**, pengujian dilakukan dengan mengalirkan air. Tegangan kerja tetap stabil di kisaran 238 VAC, namun terlihat sedikit kenaikan arus beban menjadi rata-rata 0,10 A. Kenaikan kecil ini wajar terjadi karena adanya usaha mekanis tambahan untuk menahan posisi bukaan melawan tekanan air yang mengalir. Secara fungsional, katup berhasil membuka penuh sehingga air mengalir deras ke dalam tangki, dan menutup rapat (tidak bocor) saat tegangan diputus.

4.1.8 Pengujian Fungsionalitas *Dosing Pump*

Dosing Pump (pompa peristaltik) berfungsi sebagai aktuator presisi untuk menginjeksikan larutan kimia (koagulan tawas, penurun pH, dan penaik pH) ke dalam tangki koagulasi, sehingga pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kinerja pompa dalam dua kondisi operasional yang berbeda. Kondisi pertama adalah pengujian tanpa beban cairan (*Dry Run*), yang dilakukan dengan mengaktifkan pompa tanpa selang terisi cairan guna memastikan motor DC dan roda *roller* bekerja normal dalam melakukan gerakan peristaltik serta merespons perintah ON/OFF dari PLC. Kondisi kedua adalah pengujian berbeban cairan (*Wet Run*), yang dilakukan dengan memompa cairan melalui selang saat kondisi aktif, dengan tujuan untuk memastikan pompa mampu memindahkan fluida secara fisik dengan debit yang stabil dan tidak mengalami kendala seperti selip atau kemacetan pada *roller*. Dokumentasi pengukuran arus pada *dosing pump* diperlihatkan pada **Gambar 4.17** dan **Gambar 4.18**.



Gambar 4. 17 Pengukuran Arus Dosing Pump tanpa Beban



Gambar 4. 18 Pengukuran Arus *Dosing Pump* dengan Beban

Data hasil pengujian stabilitas elektrikl pada kedua kondisi tersebut disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 4. 12 Pengujian *Dosing Pump* Kondisi tanpa Beban

Pengujian	Status PLC (Y3)	V Terminal (VDC)	Arus Terukur (A)
1	ON	24,1	0,07
2	ON	24,0	0,07
3	ON	24,1	0,06
4	ON	23,9	0,08
5	ON	24,0	0,07
Rata-Rata		24,0	0,07

Berdasarkan data pada **Tabel 4.12**, pada pengujian tanpa cairan, *dosing pump* terbukti berfungsi secara elektrikl dan mekanikal. Saat PLC memberikan sinyal ON, tegangan 24 VDC masuk ke terminal motor dan rotor menarik arus rata-rata sebesar 0,07 A. Indikasi fisik berupa putaran rotor yang halus menandakan bahwa motor DC dan *gearbox* internal bekerja dengan baik tanpa hambatan mekanis.

Tabel 4. 13 Pengujian Dosing Pump Kondisi dengan Beban

Pengujian	Status PLC (Y3)	V Terminal (VDC)	Arus Terukur (A)
1	ON	23,9	0,081
2	ON	24,0	0,080
3	ON	23,9	0,082
4	ON	23,8	0,081
5	ON	23,9	0,081
Rata-Rata		23,9	0,081

pada **Tabel 4.13**, pengujian dilakukan dengan memompa cairan. Tegangan kerja tetap stabil di kisaran 23,9 VDC, namun terlihat kenaikan arus beban menjadi rata-rata 0,081 A. Kenaikan arus ini wajar terjadi karena adanya beban torsi tambahan yang dibutuhkan motor untuk menekan selang silikon dan mendorong fluida melawan gesekan. Secara fungsional, pompa berhasil memindahkan cairan dengan aliran yang konstan sesuai prinsip kerja peristaltik, tanpa adanya kebocoran pada selang.

4.1.9 Pengujian Fungsionalitas *Mixer*

Motor pengaduk berperan vital sebagai aktuator mekanis yang bertugas mencampurkan air baku dengan larutan koagulan di dalam tangki reaksi, sehingga pengujian kinerjanya menjadi sangat penting untuk memverifikasi keandalan motor DC RS-555 yang digunakan. Proses pengujian ini dilakukan dalam dua kondisi operasional utama, yaitu kondisi tanpa beban air (*No-Load Test*) di mana motor diaktifkan di udara untuk memastikan poros berputar lancar tanpa getaran eksentrik serta memvalidasi arah putaran yang benar, dan kondisi berbeban air (*Load Test*) dengan merendam agitator ke dalam 3 liter air guna memastikan motor memiliki torsi yang memadai untuk menciptakan turbulensi yang diperlukan demi pencampuran yang optimal. Dokumentasi pengukuran arus pada *mixer* diperlihatkan pada **Gambar 4.19** dan **Gambar 4.20**.



Gambar 4. 19 Pengukuran Arus Mixer tanpa Beban

Berdasarkan visualisasi pada **Gambar 4.19**, pengukuran arus dilakukan saat sistem dalam kondisi menyala (*powered on*) namun poros motor berputar bebas tanpa hambatan fluida. Pengukuran ini bertujuan untuk mendapatkan nilai arus dasar (*baseline current*) yang dibutuhkan motor hanya untuk memutar porosnya sendiri dan mengatasi gesekan internal *bearing*. Nilai ini menjadi referensi untuk mengetahui seberapa berat beban kerja motor saat nanti dimasukkan ke dalam air.

Selanjutnya, pengujian dilakukan pada kondisi berbeban (*Load Test*) untuk mensimulasikan kondisi operasional yang sebenarnya. *Agitator* atau pengaduk direndam ke dalam tangki yang berisi 3 liter air baku guna memastikan motor memiliki torsi yang memadai untuk menciptakan turbulensi yang diperlukan demi pencampuran koagulan yang optimal. Proses pengukuran arus pada kondisi berbeban ini ditunjukkan pada **Gambar 4.20**.



Gambar 4. 20 Pengukuran Arus *Mixer* dengan Beban

Data hasil pengujian stabilitas elektrik pada kedua kondisi tersebut disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 4. 14 Pengujian *Mixer* Kondisi tanpa Beban

Pengujian	Status PLC (Y2)	V Terminal (VDC)	Arus Terukur (A)
1	ON	24,1	0,151
2	ON	24,1	0,152
3	ON	24,0	0,152
4	ON	24,0	0,153
5	ON	23,9	0,152
Rata-Rata		24,0	0,152

Berdasarkan data pada **Tabel 4.14**, pada kondisi tanpa beban, motor menarik arus rata-rata sebesar 0,152 A. Nilai ini merupakan arus dasar yang dibutuhkan untuk memutar rotor dan *gearbox* internal melawan gesekan mekanis. Putaran

motor terpantau stabil dan halus tanpa suara bising yang mengindikasikan kualitas perakitan mekanik yang baik.

Tabel 4. 15 Pengujian Mixer Kondisi dengan Beban

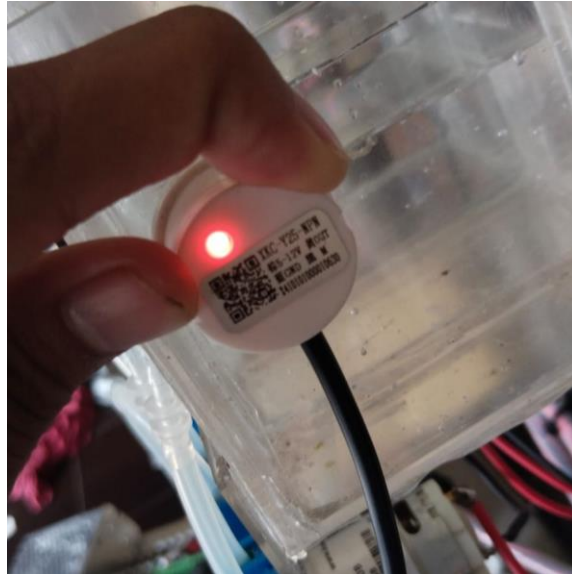
Pengujian	Status PLC (Y2)	V Terminal (VDC)	Arus Terukur (A)
1	ON	23,9	0,160
2	ON	23,9	0,159
3	ON	23,8	0,161
4	ON	23,9	0,160
5	ON	23,8	0,160
Rata-Rata		23,9	0,160

Berdasarkan pada **Tabel 4.15**, saat baling-baling mengaduk air, arus kerja mengalami kenaikan menjadi rata-rata 0,160 A. Kenaikan arus (*delta*) sebesar 0,008 A ini merepresentasikan beban torsi yang dibutuhkan untuk melawan viskositas air. Kenaikan yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa beban pengadukan 3 liter air masih sangat ringan bagi motor RS-555 yang memiliki kapasitas arus maksimal hingga 3-6 Ampere.

4.1.10 Pengujian Fungsionalitas *Water Level*

Pengujian fungsionalitas sensor *water level* tipe *non-contact* (XKC-Y25-NPN) dilakukan untuk memvalidasi kemampuan perangkat dalam mendeteksi keberadaan cairan di balik dinding wadah tanpa bersentuhan langsung. Tujuan utama pengujian ini adalah memastikan akurasi logika deteksi sensor pada material akrilik setebal 3 mm yang digunakan sebagai bahan utama tangki, serta mengukur batas maksimum ketebalan dinding yang masih dapat ditembus oleh medan kapasitif sensor. Prosedur pengujian dijalankan dengan menempelkan sensor pada dinding tangki akrilik, kemudian mengamati respons indikator LED pada bodi sensor dalam dua kondisi berbeda: saat tangki kosong dan saat air diisikan hingga mencapai level sensor. Selain itu, pengujian juga dilakukan pada berbagai sampel material penghalang dengan ketebalan bervariasi hingga 10 mm untuk mengetahui batas sensitivitasnya. Dokumentasi visual respons sensor terhadap kondisi tangki

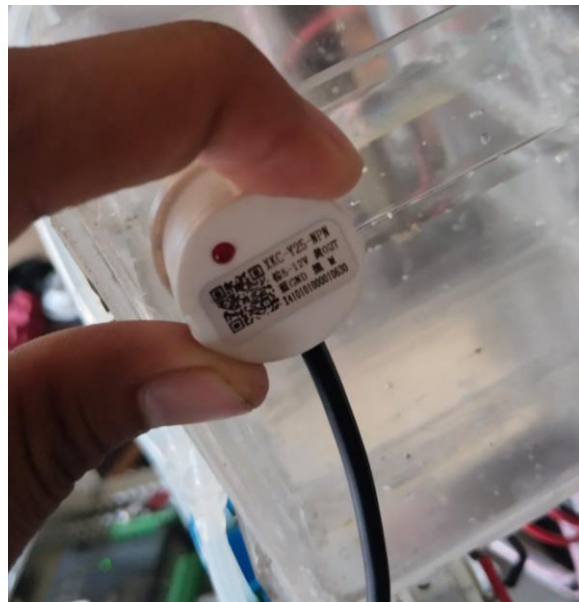
kosong dan terisi air pada dinding akrilik 3 mm diperlihatkan berturut-turut pada **Gambar 4.21** dan **Gambar 4.22**.



Gambar 4. 21 Indikator Sensor Menyala Saat Mendeteksi Air

Berdasarkan **Gambar 4.21**, terlihat bahwa indikator LED pada bodi sensor menyala (aktif). Hal ini menunjukkan bahwa sensor berhasil mendeteksi keberadaan air di balik dinding akrilik dengan ketebalan 3 mm. Secara teknis, keberadaan air yang memiliki konstanta dielektrik tinggi di balik dinding tangki menyebabkan perubahan nilai kapasitansi parasitik pada permukaan sensor, yang kemudian memicu sinyal output menjadi aktif (*High*).

Sebaliknya, pengujian dilanjutkan dengan mengosongkan tangki di bawah level sensor untuk memverifikasi bahwa sensor tidak memberikan pembacaan palsu (*false positive*). Respons sensor terhadap kondisi tangki kosong ini didokumentasikan pada **Gambar 4.22**.



Gambar 4. 22 Indikator Sensor Mati Saat Tangki Kosong

Data hasil pengujian sensitivitas sensor terhadap variasi ketebalan dinding disajikan dalam **Tabel 4.16**.

Tabel 4. 16 Pengujian *Water Level*

No	Ketebalan Dinding	Kondisi Tangki	Indikator LED Sensor	Hasil Deteksi
1	3 mm	Kosong	Mati (OFF)	Berhasil
2	3 mm	Terisi	Menyala (ON)	Berhasil
3	5 mm	Terisi	Menyala (ON)	Berhasil
4	8 mm	Terisi	Menyala (ON)	Berhasil
5	10 mm	Terisi	Mati (OFF)	Gagal

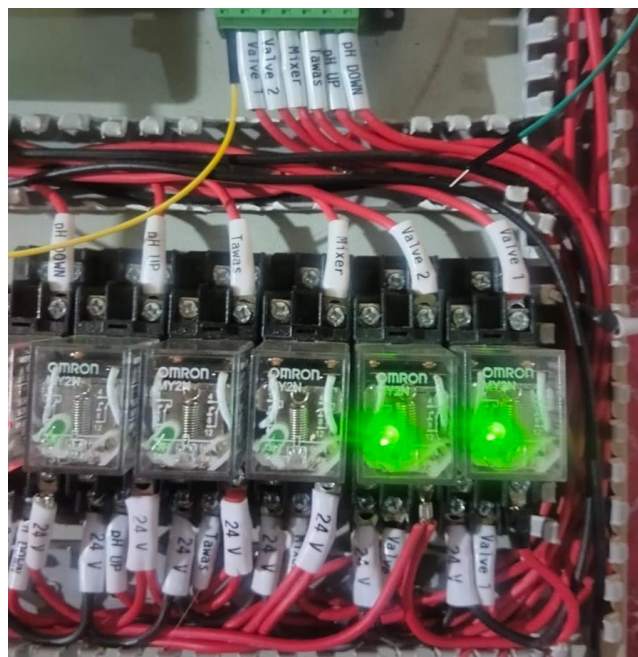
Berdasarkan pembuktian visual pada **Gambar 4.21** dan **Gambar 4.22**, serta data yang tertera pada **Tabel 4.16**, kinerja sensor menunjukkan hasil yang sangat memuaskan pada implementasi desain alat yang sebenarnya. Pada pengujian menggunakan dinding akrilik dengan ketebalan 3 mm, sensor bekerja dengan presisi tinggi di mana indikator LED tetap mati saat tangki kosong dan menyala seketika saat level air mencapai posisi sensor. Hal ini mengonfirmasi bahwa tidak ada kesalahan pembacaan (*false triggering*) pada material tangki yang dipilih. Selanjutnya, pada pengujian batas sensitivitas, sensor terbukti masih mampu mendeteksi air hingga ketebalan dinding mencapai 8 mm. Namun, kemampuan

penetrasi sinyal kapasitif mulai hilang ketika ketebalan dinding ditingkatkan menjadi 10 mm (1 cm), yang ditandai dengan tidak menyala indikator LED meskipun terdapat air di balik dinding tersebut. Meskipun terdapat batas keterbacaan pada ketebalan 1 cm, hal ini tidak mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan karena ketebalan dinding tangki pada alat ini hanya 3 mm, yang mana masih berada jauh di dalam rentang kerja optimal sensor sehingga sistem pendeteksian level air dinyatakan aman.

4.1.11 Pengujian Fungsionalitas *Relay MY2N*

Komponen *Relay MY2N* memegang peranan yang sangat krusial dalam arsitektur sistem kendali *Water Treatment Plant* ini. Komponen ini berfungsi sebagai saklar elektromagnetik perantara (*interface*) yang bertugas mengisolasi sirkuit kontrol berdaya rendah (PLC) dari sirkuit beban yang memiliki daya lebih besar atau karakteristik tegangan yang berbeda. Dalam sistem ini, relay memiliki dua tugas distribusi daya utama: pertama, untuk mensaklar tegangan tinggi arus bolak-balik (220-238 VAC) yang digunakan oleh *solenoid valve*, dan kedua, untuk mensaklar tegangan arus searah (24 VDC) yang digunakan oleh *Motor Mixer* dan *Dosing Pump*. Oleh karena itu, pengujian fungsionalitas relay dilakukan secara ketat dan menyeluruh terhadap keenam unit yang terpasang pada panel. Tujuan utamanya adalah untuk memastikan bahwa setiap unit relay mampu merespons sinyal pemicu dari PLC dengan cepat, serta mampu mengalirkan tegangan suplai ke beban dengan stabil tanpa adanya penurunan kualitas tegangan (*voltage drop*) atau kegagalan kontak (*contact failure*).

Prosedur pengujian dilaksanakan dengan memberikan sinyal logika aktif dari PLC ke terminal koil masing-masing relay secara bergantian. Parameter keberhasilan pengujian ditinjau dari tiga aspek: indikasi visual, indikasi audio, dan pengukuran elektrik. Secara visual, aktifnya relay ditandai dengan menyalnya lampu LED indikator pada bodi komponen. Secara audio, perpindahan posisi kontak mekanis dari *Normally Open* (NO) ke *Closed* ditandai dengan bunyi "klik". Sedangkan secara elektrik, keberhasilan fungsi saklar dibuktikan dengan terukurnya tegangan pada terminal *Output* yang menuju ke aktuator. Dokumentasi kondisi relay saat beroperasi dapat dilihat pada **Gambar 4.23** dan **Gambar 4.24**.



Gambar 4. 23 Indikator LED Menyala Pada Modul *Relay* Saat Pengujian



Gambar 4. 24 Tegangan Pada Saat Relay Menyala

Data hasil pengukuran tegangan *Output* dan status operasional keenam unit relay dirangkum dalam **Tabel 4.17**.

Tabel 4. 17 Data Pengujian Fungsionalitas Relay dan Tegangan Beban

No	Aktuator (Beban)	Tegangan <i>Output</i>	Status Indikator LED	Status Relay
1	Solenoid <i>Valve</i> Inlet	238,1 VAC	Menyala	ON
2	Solenoid <i>Valve</i> Outlet	238,0 VAC	Menyala	ON
3	Motor Mixer	24,1 VDC	Menyala	ON
4	Dosing Pump Tawas	23,9 VDC	Menyala	ON
5	Dosing Pump pH UP	24,0 VDC	Menyala	ON
6	Dosing Pump pH DOWN	23,8 VDC	Menyala	ON

Berdasarkan data yang disajikan pada **Tabel 4.17**, dapat dilakukan analisis mendalam mengenai kinerja sistem *interface* ini. Pada pengujian Relay 1 dan Relay 2 yang terhubung ke beban induktif AC (*Solenoid Valve*), kontak relay terbukti mampu mengalirkan tegangan jala-jala PLN dengan sangat baik, di mana terukur tegangan rata-rata sebesar **238 VAC**. Kehadiran tegangan tinggi ini pada terminal *Output* membuktikan bahwa material kontak relay mampu menahan arus AC tanpa mengalami loncatan bunga api (*arcing*) atau panas berlebih, sehingga katup dapat membuka dengan tenaga penuh. Sementara itu, pada pengujian Relay 3 hingga

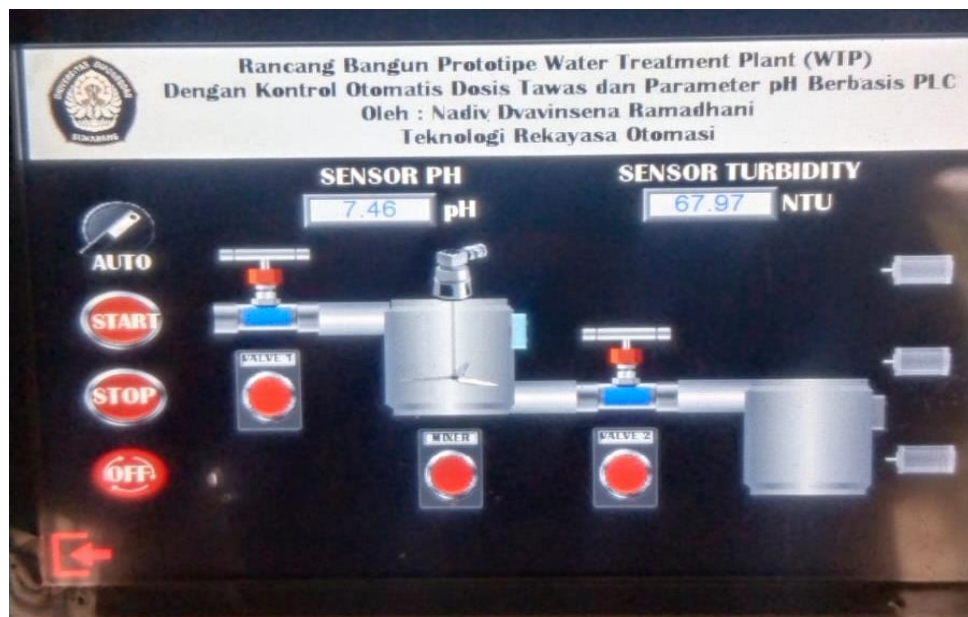
Relay 6 yang menangani beban DC (*Mixer* dan *Pompa*), tegangan *Output* terukur stabil di kisaran 24,0 VDC. Kestabilan tegangan ini sangat penting untuk menjamin motor DC berputar dengan torsi dan kecepatan yang konstan. Keseragaman respons pada seluruh relay di mana status kontak berubah menjadi "ON" berbarengan dengan menyalnya LED indicator mengonfirmasi bahwa koil elektromagnetik dalam kondisi baik dan pegas pengembalian (*return spring*) bekerja normal. Dengan demikian, sistem relay ini dinyatakan aman dan handal untuk menjalankan fungsi isolasi elektrik dan kendali daya pada alat.

4.2 Hasil Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem (*integrated testing*) bertujuan untuk memverifikasi kinerja alat Prototipe *Water Treatment Plant* (WTP) ketika seluruh komponen subsistem mulai dari pembacaan sensor, pemrosesan logika PLC, hingga eksekusi *actuator* bekerja secara simultan dan terintegrasi. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa alat mampu beroperasi secara otomatis dalam mengolah air baku dengan berbagai kondisi awal (asam, basa, dan keruh) menjadi air bersih yang memenuhi parameter *setpoint* yang telah ditentukan, yaitu pH 6,5–8,5 dan kekeruhan < 100 NTU. Pengujian ini dibagi menjadi beberapa parameter utama, yaitu fungsionalitas logika kontrol, efektivitas perbaikan kualitas air, efisiensi waktu produksi, dan efisiensi penggunaan bahan kimia.

4.2.1 Pengujian Fungsionalitas Logika Kontrol Otomatis

Pengujian fungsionalitas logika kontrol bertujuan untuk memvalidasi respons *Programmable Logic Controller* (PLC) dalam menerjemahkan data *Input* sensor menjadi sinyal kendali aktuator yang tepat. Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan tiga kondisi ekstrem pada air baku: asam, basa, dan keruh. Respons sistem terhadap simulasi tersebut diamati melalui indikator LED pada PLC dan pergerakan fisik aktuator, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 4.25**.



Gambar 4. 25 Tampilan Hasil dari Water Treatment Plant

Pada kondisi sampel air asam ($\text{pH} < 6,5$), sistem berhasil mendeteksi nilai pH rendah dan mengaktifkan *Dosing Pump pH UP* (Y4) dengan ritme *pulse* (ON 4 detik, OFF 10 detik). Sebaliknya, pada kondisi air basa ($\text{pH} > 8,5$), sistem beralih mengaktifkan *Dosing Pump pH DOWN* (Y5). Untuk kekeruhan tinggi (> 100 NTU), sensor memicu *Dosing Pump Tawas* (Y3). Data lengkap hasil pengujian logika kontrol dirangkum dalam **Tabel 4.18**.

Tabel 4. 18 Hasil Pengujian Fungsionalitas Logika Kontrol Otomatis

No	Kondisi Sampel (<i>Input</i>)	Respons Logika PLC (<i>Process</i>)	Status Aktuator (<i>Output</i>)	Hasil
1	Air Asam ($\text{pH} < 6,5$)	Mengaktifkan Dosing Basa	Pompa pH UP: ON	Sesuai
2	Air Basa ($\text{pH} > 8,5$)	Mengaktifkan Dosing Asam	Pompa pH DOWN: ON Pompa pH UP: OFF Mixer: ON	Sesuai
3	Air Keruh (NTU > 100)	Mengaktifkan Dosing Tawas	Pompa Tawas: ON Mixer: ON	Sesuai
4	Air Normal ($\text{pH} 6,5\text{-}8,5$ & NTU < 20)	Mengaktifkan Valve 2	Valve Outlet: ON (Buka)	Sesuai

Berdasarkan **Tabel 4.18**, dapat disimpulkan bahwa algoritma *Ladder Diagram* telah berhasil dieksekusi oleh PLC tanpa adanya kesalahan logika (*bug*) dan sesuai dengan batasan parameter kekeruhan 100 NTU yang ditetapkan.

4.2.2 Pengujian Efektivitas Kualitas Air

Pengujian efektivitas kualitas air bertujuan untuk memverifikasi kemampuan sistem prototipe dalam mengolah air baku yang terkontaminasi menjadi air bersih yang memenuhi parameter standar baku mutu, yaitu pH 6,5–8,5 dan kekeruhan di bawah 100 NTU. Keberhasilan proses perbaikan kualitas air ini sangat dipengaruhi oleh pemilihan jenis dan konsentrasi bahan kimia yang digunakan. Dalam proses netralisasi derajat keasaman, sistem ini menggunakan larutan Kalium Hidroksida dengan konsentrasi 10% sebagai penaik pH dan larutan Asam Fosfat dengan konsentrasi 10% sebagai penurun pH. Pemilihan kedua jenis bahan kimia ini terbukti memberikan dampak signifikan terhadap stabilitas hasil pengolahan. Konsentrasi 10% yang diterapkan memungkinkan reaksi kimia terjadi secara moderat dan terkendali, sehingga mencegah terjadinya perubahan pH yang terlalu drastis (*overshoot*) saat proses injeksi otomatis berlangsung.

Pengujian efektivitas bertujuan mengukur kemampuan alat dalam memperbaiki kualitas air baku menjadi air bersih sesuai *setpoint*. Pengujian dilakukan dengan membandingkan parameter air sebelum (*pre-test*) dan sesudah (*post-test*) pengolahan pada lima sampel berbeda seperti pada **Gambar 4.26**.



Gambar 4. 26 Hasil dari Water Treatment Plant

Data kuantitatif hasil pengujian kualitas air disajikan pada **Tabel 4.19** di bawah ini.

Tabel 4. 19 Data Pengujian Efektivitas Kualitas Air

No	Jenis Sampel	Parameter Awal	Parameter Akhir (Output)	Efisiensi Penurunan Kekeruhan (NTU)	Koreksi pH	Status Akhir
1	Air Asam Keruh	pH: 4.2 NTU: 486,82	pH: 7.1 NTU: 69,33	85,76%	+ 2.9 pH (Netral)	Berhasil
2	Air Basa Jernih	pH: 9.5 NTU: 54,84	pH: 7.8 NTU: 54,84	(Tidak Perlu Treatment)	- 1.7 pH (Netral)	Berhasil
3	Air Netral Keruh	pH: 7.0 NTU: 231,63	pH: 7.0 NTU: 34,47	85,12%	0 pH (Stabil)	Berhasil
4	Air Limbah Ekstrem	pH: 3.5 NTU: 685,15	pH: 7.2 NTU: 41,24	93,98%	+ 3.7 Poin (Netral)	Berhasil

Berdasarkan pada **Tabel 4.19**, sistem mampu mendapatkan efisiensi rata-rata penurunan kekeruhan sebesar 88,29%. Angka rata-rata yang tinggi ini mengindikasikan bahwa mekanisme sedimentasi dan logika *timer* yang diterapkan mampu memisahkan sebagian besar partikel polutan dari air secara efektif pada

berbagai kondisi operasional. Pada pengujian kondisi limbah ekstrem, sistem mencapai performa puncak dengan efisiensi penyisihan sebesar 93,98%, di mana kekeruhan berhasil diturunkan secara drastis dari 685,15 NTU menjadi 41,24 NTU.

Selain pada parameter kekeruhan sistem juga mampu mengendalikan (pH). Seluruh sampel uji berhasil diproses hingga memenuhi baku mutu yang ditetapkan, sehingga sistem mencatatkan 100% Tingkat Keberhasilan (*Success Rate*). Artinya, tidak ada satupun sampel yang gagal dalam proses *treatment*; seluruh *output* akhir secara konsisten berada pada ambang batas aman, yakni pH netral (antara 6,5–8,5) dan kekeruhan di bawah 100 NTU. Keberhasilan total ini memvalidasi akurasi kendali umpan balik (*closed-loop control*) dan mekanisme *dosing* bertahap yang bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan air olahan yang layak dan aman bagi lingkungan. alat mampu menetralkan pH air ekstrem ke rentang aman (rata-rata akhir pH 7,27) dan menurunkan kekeruhan secara signifikan hingga jauh di bawah batas *setpoint* 100 NTU (rata-rata akhir <48.12 NTU). Hal ini membuktikan efektivitas sistem koagulasi otomatis yang diterapkan sangat handal.

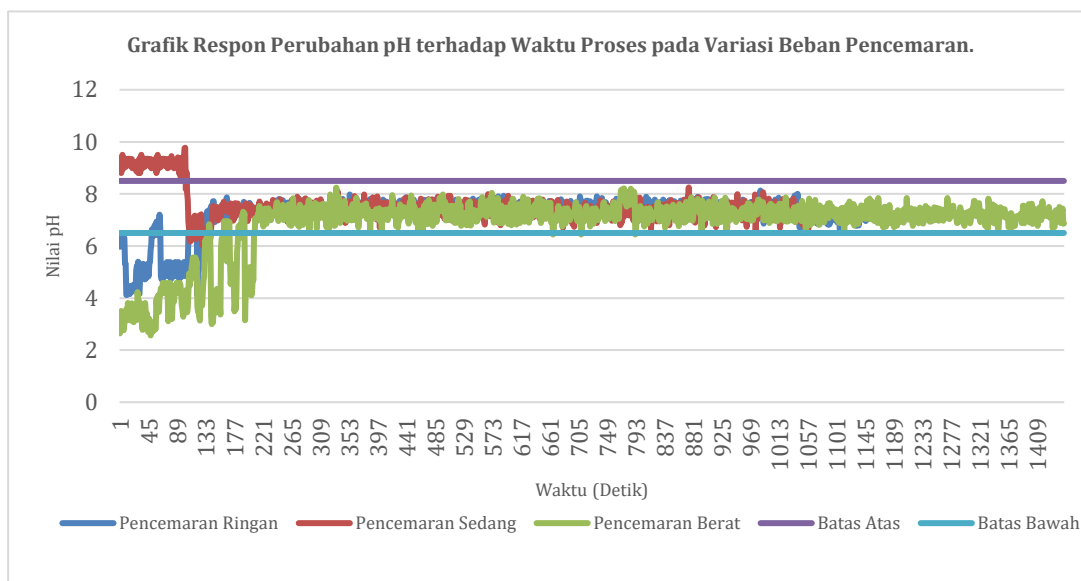
4.2.3 Pengujian Efisiensi Terhadap Bahan Kimia

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur performa sistem dalam aspek durasi proses (*cycle time*) yang dibutuhkan untuk mengolah air dari kondisi tercemar hingga memenuhi baku mutu. Analisis ini penting untuk mengetahui kapasitas produksi alat dan respons sistem terhadap berbagai tingkat beban pencemaran. Pengujian dibagi menjadi dua parameter utama, yaitu efisiensi bahan kimia pada koreksi pH dan efisiensi bahan kimia pada penurunan kekeruhan (NTU).

4.2.3.1 Pengujian Efisiensi Terhadap Bahan Kimia Produksi pH

Pada pengujian ini, diamati hubungan antara tingkat keasaman/kebasaan air baku dengan durasi waktu yang dibutuhkan sistem untuk menetralkannya. Sistem dirancang dengan logika *looping* cerdas yang menyesuaikan jumlah siklus *dosing* berdasarkan pembacaan sensor pH secara *real-time*.

Hasil pengujian respon waktu terhadap koreksi pH dapat dilihat pada **Tabel 4.27** dan visualisasi pergerakan data pH pada **Gambar 4.20** berikut.



Gambar 4. 27 Grafik Respon Perubahan pH pada Variasi Beban Pencemaran.

Grafik pada **Gambar 4.27** di atas memperlihatkan dinamika perubahan nilai pH dari kondisi awal hingga mencapai titik netral. Terlihat bahwa garis grafik pada kondisi pencemaran berat (garis curam/ekstrem) membutuhkan rentang waktu (*settling time*) yang lebih panjang untuk mencapai area *setpoint* (garis stabil) dibandingkan dengan kondisi ringan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem sedang melakukan pengulangan siklus (*looping*) injeksi bahan kimia untuk mengejar target pH yang diinginkan tanpa menyebabkan *overshoot*.

Rincian data kuantitatif mengenai jumlah siklus aksi pompa, total volume bahan kimia yang dikeluarkan, serta total waktu proses untuk setiap kategori beban pencemaran dirangkum dalam **Tabel 4.20** berikut.

Tabel 4. 20 Kinerja Kontrol Ph dan Volume Koagulan

No	Kondisi Air Baku	pH Awal	Rata-Rata pH Akhir	Aksi Dosing Pump	Volume Obat mL)	Total Waktu Siklus WTP
1	Pencemaran Ringan	5,97	7,29	3x pH Up (Basa)	22,5 mL	1.051 Detik
2	Pencemaran Sedang	9,17	7,34	3x Down + 1x Up	30,0 mL	1.058 Detik
3	Pencemaran Berat	2,64	7,15	4x pH Up (Basa)	30,0 mL	1.450 Detik

Berdasarkan data pengujian, sistem menunjukkan karakteristik yang sangat baik dari segi waktu maupun konsumsi bahan kimia. Pada parameter pH, efisiensi pemakaian terlihat jelas pada kondisi pencemaran ringan (asam lemah), di mana sistem bekerja optimal dengan hanya menginjeksikan 22,5 mL larutan basa melalui tiga siklus *dosing* (total 15 detik) untuk mencapai pH ideal 7,29 tanpa pemborosan reagen. efektivitas mekanisme umpan balik (*closed-loop*) ditunjukkan pada kondisi beban sedang (basa ekstrem pH 9,17) melainkan didistribusikan secara strategis: 22,5 mL larutan asam untuk penurunan drastis awal dan 7,5 mL larutan basa sebagai penyeimbang akhir. Strategi volumetrik ini terbukti efektif mencegah terjadinya *overshoot* berlebihan dan menjaga stabilitas hasil akhir di angka 7,34. Sementara itu, pada kondisi terberat (asam kuat pH 2,64), sistem beroperasi pada kapasitas maksimalnya menggunakan 30,0 mL larutan basa dalam empat siklus.. Perpanjangan waktu proses menjadi 1.450 detik pada fase ini merupakan langkah krusial untuk mengatasi skala logaritmik pH yang ekstrem, memastikan air olahan aman dibuang dengan pH akhir 7,15 meskipun beban awalnya sangat tinggi.

Untuk memvalidasi keunggulan sistem otomatis, dilakukan analisis komparatif antara konsumsi bahan kimia aktual sistem dengan simulasi metode manual. Pada simulasi manual ini, diasumsikan operator menerapkan prinsip dosis aman bertingkat karena parameter pH tidak dapat dilihat secara visual, operator cenderung menetapkan dosis dasar yang cukup tinggi (40 mL) untuk memastikan reaksi terjadi, lalu menaikkannya secara bertahap (45 mL & 50 mL) jika beban diperkirakan lebih berat. Pendekatan ini dilakukan untuk menghindari risiko air gagal netral (*under-dosing*), namun konsekuensinya adalah terjadinya pemborosan bahan kimia.

Data perbandingan antara kebutuhan presisi sistem otomatis dan estimasi manual disajikan pada **Tabel 4.21**

Tabel 4. 21 Perbandingan Konsumsi pH Regulator

No	Kondisi Air Baku	Kebutuhan Aktual (Sistem Otomatis)	Dosis Estimasi Manual (Safety Factor)	Status Mode Manual
1	Pencemaran Ringan	22,5 mL	40,0 mL	Over-Dosing (+17,5 mL)
2	Pencemaran Sedang	30,0 mL	45,0 mL	Over-Dosing (+15,0 mL)
3	Pencemaran Berat	30,0 mL	50,0 mL	Over-Dosing (+20,0 mL)

Berdasarkan analisis terhadap data tabel, terlihat jelas adanya fenomena *Blind Dosing* pada metode manual yang mengakibatkan inefisiensi signifikan. Mengacu pada selisih volume di kondisi beban ringan tersebut, perhitungan efisiensi penghematan bahan kimia dilakukan dengan membandingkan selisih volume manual dan otomatis, Dosis kecil ini terbukti mendapatkan efisiensi penghematan bahan kimia sebesar 75% yang didapatkan dengan rumus :

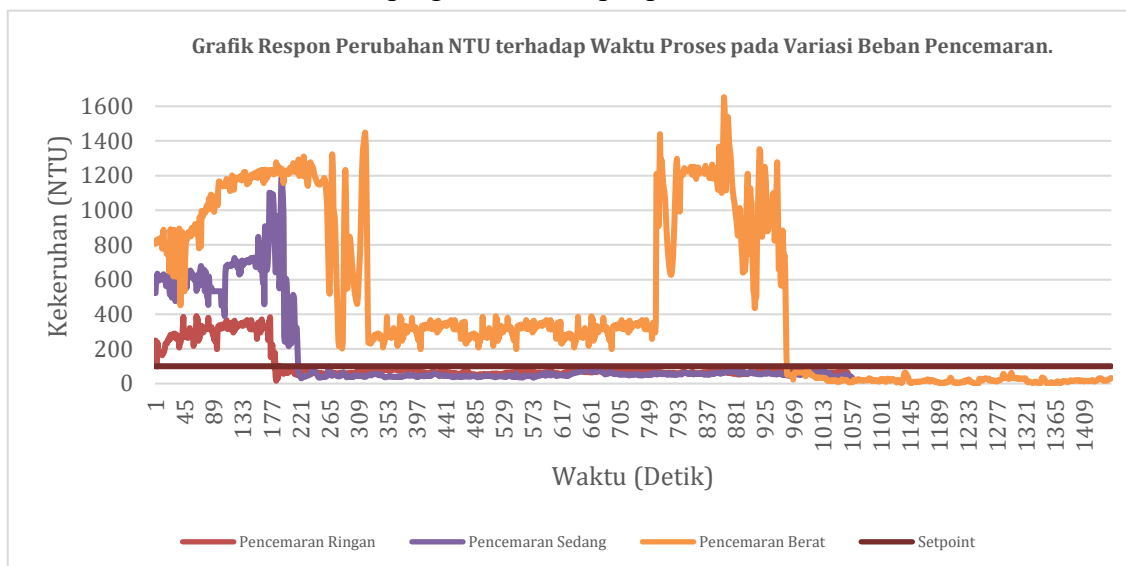
$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{Volume Otomatis} - \text{Volume Manual}}{\text{Volume Otomatis}} \times 100\%$$

Dimana menghasilkan nilai efisiensi terbesar sebanyak 43,75%. Angka ini membuktikan bahwa penerapan kendali otomatis berbasis sensor pH mampu menghemat hampir separuh konsumsi bahan kimia operasional. Hal ini sekaligus mengonfirmasi keberhasilan sistem dalam menghilangkan faktor ketidakpastian operator (*human error*) saat menakar dosis tanpa alat ukur *real-time*, memastikan dosis yang diberikan presisi sesuai kebutuhan kimiawi air.

4.2.3.2 Pengujian Efisiensi Terhadap Bahan Kimia Turbidity

Pengujian ini berfokus pada korelasi antara tingkat kekeruhan awal, durasi waktu sedimentasi, dan volume koagulan (penjernih) yang dibutuhkan. Sistem dirancang untuk menyuntikkan koagulan secara sedikit untuk air yang agak keruh, dan banyak untuk air yang sangat kotor untuk mengoptimalkan biaya operasional.

Hasil pengujian respon waktu terhadap koreksi turbidity dapat dilihat pada **Tabel 4.28** dan visualisasi pergerakan data pH pada **Gambar 4.21** berikut.



Gambar 4. 28 Grafik Respon Perubahan Turbidity pada Variasi Beban Pencemaran.

Grafik pada **Gambar 4.28** di atas memperlihatkan respons sistem terhadap berbagai variasi beban pencemaran. Terlihat pola penurunan kekeruhan yang berbeda-beda; pada kondisi pencemaran berat, grafik menunjukkan penurunan bertahap yang adanya pengulangan siklus injeksi koagulan dan proses sedimentasi yang berulang untuk memastikan partikel terlarut mengendap sempurna.

Rincian data kuantitatif mengenai kinerja sistem dalam menurunkan kadar kekeruhan, termasuk jumlah aksi pompa dan total waktu yang dibutuhkan, dirangkum dalam **Tabel 4.22** berikut.

Tabel 4. 22 Kinerja Kontrol kekeruhan (NTU) dan Volume Koagulan

No	Kondisi Air Baku	NTU Awal	Rata-Rata NTU Akhir	Aksi Dosing Pump	Total Volume Obat	Total Waktu Siklus WTP
1	Pencemaran Ringan	248,9	58,55	1 Kali	7,5 mL	1.051 Detik
2	Pencemaran Sedang	522,6	51,85	2 Kali	15,0 mL	1.058 Detik
3	Pencemaran Berat	806,1	51,11	4 Kali	30,0 mL	1.450 Detik

Berdasarkan data pengujian, sistem menunjukkan karakteristik yang sangat baik dari segi waktu maupun konsumsi bahan kimia. pada pengujian efisiensi penurunan kekeruhan atau NTU, penerapan prinsip terlihat nyata melalui korelasi antara tingkat kekeruhan awal, durasi sedimentasi, dan volume koagulan. Penghematan signifikan terjadi pada kondisi pencemaran ringan 248 NTU, di mana sistem hanya mengaktifkan pompa selama 5 detik dengan volume minimal 7,5 mL koagulan. Volume koagulan kemudian meningkat secara proporsional mengikuti beban pencemaran, naik menjadi 15,0 mL pada kondisi sedang dan mencapai puncaknya 30,0 mL pada kondisi berat. Temuan menarik dari pengujian ini adalah penggunaan volume maksimal 30,0 mL pada kondisi berat yang dikombinasikan dengan waktu sedimentasi terlalu lama 1.450 detik justru menghasilkan kualitas air paling jernih dengan nilai 51,11 NTU. Hal ini memvalidasi ketepatan algoritma kontrol sistem, di mana investasi volume obat yang lebih besar pada air yang sangat kotor memberikan timbal balik berupa kualitas hasil yang baik.

Untuk memvalidasi efisiensi sistem, dilakukan perbandingan konsumsi bahan kimia antara metode kendali otomatis berbasis sensor dengan metode manual berbasis estimasi visual operator. Pada metode manual, dosis tidak diset konstan, melainkan divariasikan oleh operator menyesuaikan tingkat kekeruhan air yang terlihat secara kasat mata. Namun, karena keterbatasan mata manusia dalam mengukur nilai NTU secara presisi, operator cenderung menerapkan faktor keamanan (*safety factor*) dengan melebihkan dosis injeksi untuk menghindari risiko air gagal jernih (*under-dosing*).

Data simulasi dosis manual dibandingkan dengan kebutuhan aktual sistem otomatis disajikan pada **Tabel 4.23**.

Tabel 4. 23 Perbandingan Konsumsi NTU Regulator

No	Kondisi Air Baku	Kebutuhan Aktual (Sistem Otomatis)	Dosis Estimasi Manual (Safety Factor)	Status Mode Manual
1	Pencemaran Ringan	7,5 mL	18,0 mL	Over-Dosing (+10,5 mL)
2	Pencemaran Sedang	15,0 mL	25,0 mL	Over-Dosing (+10,0 mL)
3	Pencemaran Berat	30,0 mL	35,0 mL	Over-Dosing (+5,0 mL)

Berdasarkan analisis terhadap data tabel, terlihat perbedaan pola konsumsi bahan kimia yang signifikan antara kedua metode. Sistem otomatis menunjukkan kinerja presisi berbasis *closed-loop*, di mana injeksi pada kondisi beban ringan dapat diputus tepat di angka 7,5 mL setelah sensor mendeteksi kejernihan air. Sebaliknya, pada sistem manual, meskipun operator berupaya menyesuaikan dosis secara bertahap (18 mL hingga 35 mL), ketiadaan umpan balik yang akurat mendorong penerapan dosis berlebih sebagai faktor keamanan; hal ini terlihat dari penggunaan 18,0 mL untuk kondisi ringan yang seharusnya cukup ditangani dengan 7,5 mL. Mengacu pada kondisi dengan deviasi pemborosan tertinggi tersebut, perhitungan efisiensi dilakukan dengan membandingkan selisih volume keduanya terhadap volume manual, yang menghasilkan nilai penghematan sebesar 58,33%. Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun operator manual telah melakukan estimasi, ketidakakuratan visual tetap menyebabkan pemborosan bahan kimia hingga lebih dari separuh kebutuhan aktual.

4.3 Analisa Pengujian

Hasil pengujian catu daya yang menggunakan *Switching Power Supply* 24VDC 5A dan modul *stepdown* LM2596 dengan keluaran 5VDC menunjukkan performa yang stabil dalam menyuplai daya ke seluruh komponen. Tegangan keluaran 24V untuk PLC dan pompa tercatat stabil mendekati nilai nominal meskipun terjadi fluktuasi beban saat pompa *dosing* aktif dan non-aktif secara bergantian. Sementara itu, suplai 5V untuk sensor pH dan turbidity tetap konstan tanpa *voltage drop* yang

berarti, memastikan pembacaan sensor tidak terganggu oleh *noise* dari aktivitas motor pompa. Efisiensi daya dinilai baik karena catu daya mampu menangani lonjakan arus sesaat saat keempat pompa menyala bersamaan pada kondisi pengujian ekstrem.

Pengujian pada PLC Mitsubishi FX3U dilakukan melalui program *ladder diagram* yang melibatkan instruksi analog input (ADPRW) dan logika *timer*. Hasil pengujian menunjukkan PLC dapat mengeksekusi instruksi aritmatika untuk konversi nilai sensor dan logika komparasi *threshold* dengan presisi tinggi tanpa *delay* yang signifikan. Komunikasi serial antara PLC dan HMI berjalan lancar secara *real-time*, di mana perubahan data pada register PLC langsung tertampil pada layar HMI dengan latensi yang sangat minim, membuktikan kehandalan komunikasi Modbus yang diterapkan.

Pengujian pada *Dosing Pump* Kamoer NKP-DA-S10B menunjukkan bahwa pompa dapat mengalirkan larutan kimia dengan debit rata-rata terukur sebesar 1,5 mL/detik. Meskipun terdapat sedikit deviasi mekanis akibat viskositas cairan, hasil kalibrasi menunjukkan konsistensi volume yang tinggi, di mana durasi nyala 5 detik secara konsisten menghasilkan volume $\pm 7,5$ mL. Stabilitas debit ini membuktikan bahwa pompa mampu bekerja linear terhadap waktu, sehingga metode *time-based dosing* yang diterapkan pada PLC valid untuk digunakan sebagai acuan takaran bahan kimia.

Pengujian pada sensor pH-4502C dan *Analog Turbidity Sensor* dilakukan untuk memastikan akurasi pembacaan parameter kualitas air. Setelah dilakukan proses kalibrasi *offset* pada program PLC, pembacaan sensor pH menunjukkan nilai yang sangat presisi dengan selisih *error* rata-rata di bawah 3,6% dibandingkan alat ukur standar. Pada sensor *turbidity*, konversi tegangan analog ke satuan NTU menunjukkan respons linear, di mana tegangan keluaran sensor turun secara proporsional seiring meningkatnya kekeruhan air. Hal ini menyimpulkan bahwa filter rata-rata (*averaging filter*) pada algoritma PLC berhasil meredam fluktuasi sinyal sensor akibat guncangan air.

Hasil pengujian sistem kontrol pH menunjukkan respons yang akurat terhadap variasi tingkat keasaman. Pada kondisi asam ekstrem (pH 2,64), sistem mampu melakukan koreksi bertahap melalui 4 siklus *dosing* hingga mencapai pH netral (6,59) dengan tingkat keberhasilan 100%. Tidak terjadi fenomena *overshoot* yang berlebihan pada kondisi pencemaran sedang, karena sistem berhasil membagi volume *dosing* asam dan basa secara proporsional. Stabilitas pH akhir yang terjaga di rentang 6,5–7,5 menunjukkan bahwa algoritma kontrol *feedback* bekerja optimal dalam menstabilkan reaksi kimia.

Hasil pengujian efisiensi penyisihan kekeruhan (*Turbidity Removal*) menunjukkan performa filtrasi yang sangat baik, terutama pada kondisi beban berat. Efisiensi penyisihan mencapai angka tertinggi 93,98% pada sampel limbah ekstrem, dengan nilai akhir kekeruhan turun drastis dari ± 806 NTU menjadi 51,11 NTU. Meskipun nilai akhir ini sedikit berfluktuasi tergantung waktu sedimentasi, rata-rata hasil olahan konsisten berada di bawah ambang batas 60 NTU. Hal ini membuktikan bahwa durasi sedimentasi variabel yang diterapkan sistem efektif dalam mengendapkan partikel koloid.

Analisa efisiensi waktu dan bahan kimia menunjukkan bahwa sistem bekerja secara dinamis sesuai kebutuhan beban. Pada kondisi pencemaran ringan, sistem secara cerdas memangkas waktu proses menjadi 1.051 detik dan menghemat penggunaan bahan kimia hingga 58,33% pada NTU dan 43,75% pada pH dibandingkan dengan metode manual. Sebaliknya, pada beban berat, sistem memperpanjang durasi menjadi 1.450 detik untuk menjamin kualitas hasil. Perbedaan durasi yang signifikan ini menegaskan bahwa sistem tidak bekerja berdasarkan waktu tetap (*fixed timer*), melainkan berdasarkan kondisi aktual air (*condition-based*), sehingga tercipta efisiensi operasional yang maksimal.

Pengujian keseluruhan sistem (*integrated testing*) bertujuan untuk memverifikasi kinerja alat Prototipe *Water Treatment Plant* (WTP) ketika seluruh komponen subsistem mulai dari pembacaan sensor, pemrosesan logika PLC, hingga eksekusi *actuator* bekerja secara simultan dan terintegrasi. Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa alat mampu beroperasi secara otomatis dalam mengolah

air baku dengan berbagai kondisi awal (asam, basa, dan keruh) menjadi air bersih yang memenuhi parameter *setpoint* yang telah ditentukan, yaitu pH 6,5–8,5 dan kekeruhan < 100 NTU. Pengujian ini dibagi menjadi beberapa parameter utama, yaitu fungsionalitas logika kontrol, efektivitas perbaikan kualitas air, efisiensi waktu produksi, dan efisiensi penggunaan bahan kimia.