

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

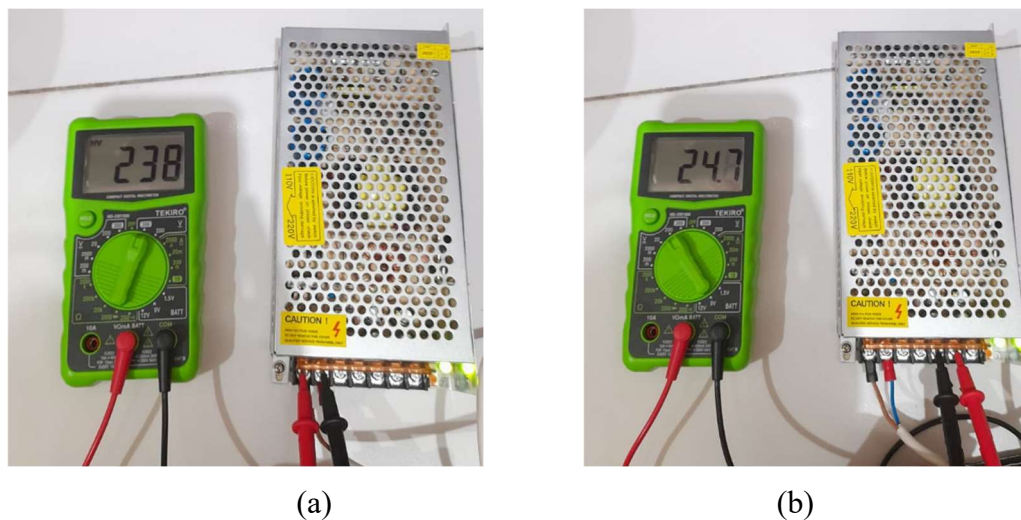
Setelah tahap perancangan sistem distribusi air berbasis kontrol PID menggunakan PLC dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian terhadap sistem. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi performa dari setiap komponen serta memastikan bahwa sistem kendali tekanan bekerja sesuai dengan parameter yang telah dirancang. Pengujian dilakukan bertahap yang dimulai dari pemeriksaan fungsional komponen yang digunakan lalu dilanjutkan dengan pengujian sistem secara keseluruhan untuk melihat seberapa efektif kontrol PID dalam menjaga tekanan air sesuai dengan nilai setpoint yang diharapkan.

4.1 Pengujian Fungsionalitas Komponen

Sebelum sistem diuji secara keseluruhan, dilakukan pengujian terhadap setiap komponen yang digunakan pada penelitian ini. Pengujian fungsionalitas komponen bertujuan untuk memastikan bahwa masing-masing perangkat dapat bekerja dengan baik sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Hal ini penting dilakukan agar tidak terjadi kesalahan pada tahap pengujian sistem secara menyeluruh.

4.1.1 Pengujian *Power Supply*

Power supply merupakan komponen utama yang berfungsi menyediakan sumber tegangan bagi seluruh perangkat dalam sistem. Pada penelitian ini digunakan catu daya 220 VAC sebagai input utama yang kemudian dikonversi menjadi 24 VDC dengan kapasitas arus 5A. Pengujian dilakukan dengan cara mengukur keluaran tegangan dan arus *power supply* menggunakan multimeter digital yang ditunjukkan pada **Gambar 4.1** (a) dan (b) serta **Gambar 4.2** (a) dan (b) untuk memastikan bahwa tegangan dan arus keluaran berada pada nilai nominal 24 VDC dengan toleransi error yang masih dapat diterima. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 4.1** dan **Tabel 4.2**.



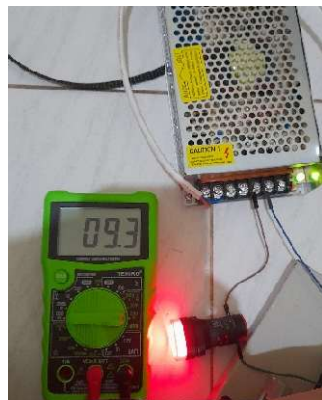
Gambar 4.1 Pengujian *Power Supply* (a) Pengukuran Tegangan *Input Power Supply* (b) Pengukuran Tegangan *Output Power Supply*

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Tegangan *Power Supply*

Pengujian Tegangan	Pengujian Ke-	Tegangan Terukur	Selisih (Volt)	Error (%)
Tegangan Input (220 VAC)	1	238 VAC	18	8.18%
	2	239 VAC	19	8.64%
	3	237 VAC	17	7.73%
	4	239 VAC	19	8.64%
	5	238 VAC	18	8.18%
Rata-rata		238.2 VAC	18.2	8.274%
Tegangan Output (24 VDC)	1	24.7 VDC	0.7	2.92%
	2	24.8 VDC	0.8	3.33%
	3	24.8 VDC	0.8	3.33%
	4	24.7 VDC	0.7	2.92%
	5	24.8 VDC	0.8	3.33%
Rata-rata		24.76 VDC	0.76	3.166%

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.1, dapat dianalisis bahwa pada sisi Tegangan Input (spesifikasi 220 VAC), nilai tegangan terukur rata-rata adalah 238.2 VAC. Nilai ini menunjukkan adanya selisih rata-rata sebesar 18.2 Volt di atas

spesifikasi, yang setara dengan persentase error rata-rata 8.274%. Sementara itu, pada sisi Tegangan Output, *power supply* dengan spesifikasi 24 VDC tercatat menghasilkan tegangan keluaran rata-rata sebesar 24.76 VDC. Data ini menunjukkan selisih rata-rata 0.76 Volt atau persentase error rata-rata 3.166%. Kenaikan tegangan keluaran ini tergolong wajar dan menunjukkan bahwa power supply berfungsi dengan baik serta masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima.



(a)



(b)

Gambar 4.2 Pengujian *Power Supply* (a) Pengujian Arus 1 (b) Pengujian Arus 2

Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Arus *Power Supply* dengan beban lampu 24 VDC

Pengujian Ke-	Tegangan (VDC)	Arus Terukur (Ampere)
1	24.7	0.0093
2	24.8	0.0094
3	24.8	0.0094
4	24.7	0.0093
5	24.8	0.0094
Rata-rata	24.76	0.00934

Selanjutnya, pengujian pada Tabel 4.2 difokuskan untuk mengukur karakteristik beban (lampu 24 VDC) yang digunakan. Berdasarkan hasil pengukuran, diketahui bahwa saat power supply memberikan tegangan keluaran rata-rata 24.76 VDC mengacu pada data Tabel 4.1, beban lampu tersebut menarik arus terukur dengan nilai rata-rata 0.00934 Ampere atau 9.34 mA. Nilai ini menyatakan bahwa beban

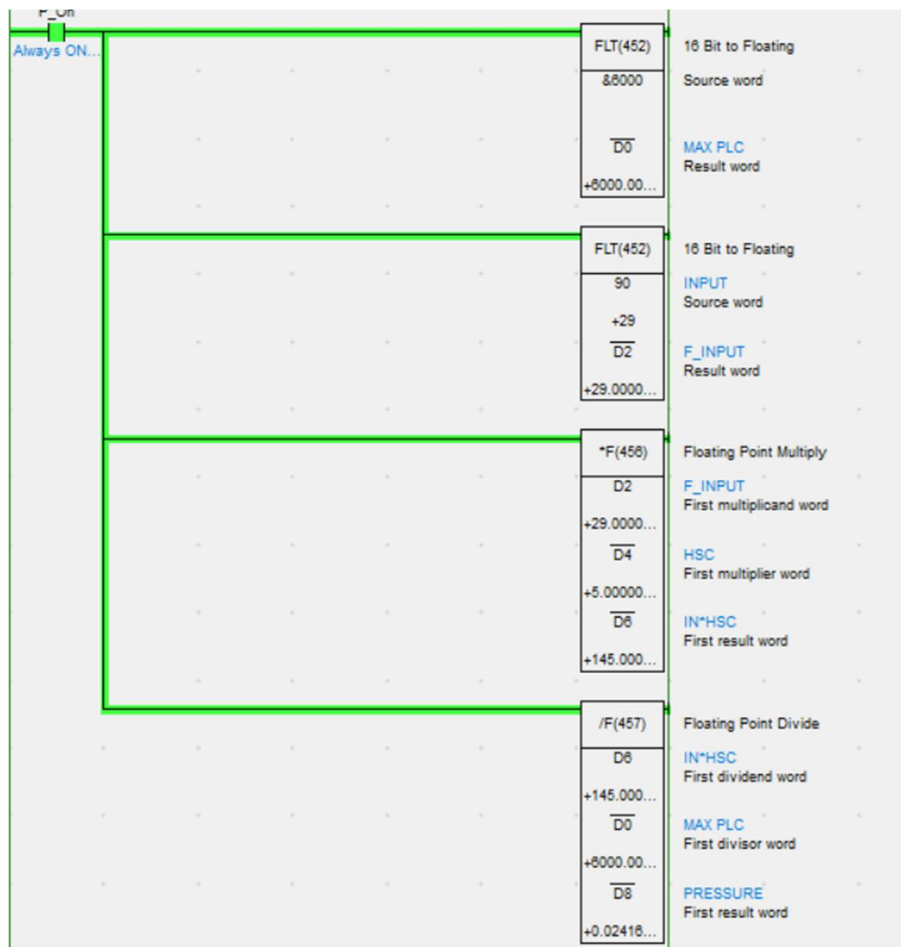
yang diuji adalah beban berdaya sangat rendah, yang konsisten dengan karakteristik lampu LED indikator.

4.1.2 Pengujian *Pressure Transmitter*

Pengujian *pressure transmitter* bertujuan untuk memvalidasi akurasi sinyal sensor serta memverifikasi logika scaling (penskalaan) yang telah diimplementasikan pada program PLC. Dalam sistem ini, pressure transmitter mengubah besaran tekanan fisik menjadi sinyal analog (umumnya 4-20 mA), yang kemudian dibaca oleh modul input PLC sebagai nilai raw integer. Pengujian PLC pada **Gambar 4.3** dan logika program yang ditunjukkan pada **Gambar 4.4** mengkonversi nilai raw tersebut menjadi nilai *engineering* unit (satuan jadi) yang sesuai.



Gambar 4.3 Pengujian *Pressure Transmitter*



Gambar 4.4 Tampilan pembacaan sensor tekanan pada ladder PLC

Berdasarkan monitoring pada program PLC yang ditunjukkan pada **Gambar 4.4**, proses scaling untuk *pressure transmitter* dapat diverifikasi. Pada kondisi tanpa beban tekanan (0 *pressure*), teridentifikasi bahwa transmitter mengirimkan nilai raw input (mentah) sebesar 29, yang mewakili batas bawah sinyal analog (4 mA). Logika PLC kemudian memproses nilai ini dalam dua langkah sesuai rumus pada **Persamaan 2.31** yaitu pertama, mengalikannya dengan konstanta pengali 5.0 (menghasilkan nilai perantara 145.0), dan kedua, membaginya dengan nilai raw maksimum yang telah ditentukan, yaitu 6000.0 (setara 20 mA). Hasil akhir dari kalkulasi 145.0 dibagi 6000.0 ini disimpan dalam register **PRESSURE** dengan nilai 0.0241666 yang dijelaskan pada **Lampiran 5**. Nilai ini berfungsi sebagai "zero offset" (titik nol) dari sensor, dan hasilnya yang sangat mendekati nol mengkonfirmasi bahwa sinyal input dan logika scaling telah dikonfigurasi dengan tepat.

4.1.3 Pengujian *Variable Frequency Drive* (VFD)

Pada tahap ini, dilakukan pengujian karakteristik kerja *Variable Frequency Drive* (VFD) satu fasa yang digunakan sebagai pengendali kecepatan motor pompa dalam sistem distribusi air berbasis PLC yang ditunjukkan pada **Gambar 4.5** (a) dan (b). Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi respons tegangan keluaran (*Output Voltage*) terhadap perubahan frekuensi (*Output Frequency*) yang diberikan. Pengukuran dilakukan dengan menaikkan frekuensi secara bertahap dari 0 Hz hingga 100 Hz, kemudian mencatat tegangan AC yang dihasilkan pada terminal keluaran VFD menuju motor. Data yang ditunjukkan pada **Tabel 4.3** dan **Tabel 4.4** digunakan untuk memastikan bahwa VFD beroperasi sesuai dengan prinsip kontrol V/f (Volt per Hertz) yang linear, guna menjamin torsi motor yang optimal dan mencegah kerusakan akibat tegangan berlebih atau kekurangan daya.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Pengujian VFD (a) Tegangan Input (b) Tegangan Output saat frekuensi 50 Hz

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian *Variable Frequency Drive* (VFD)

No.	Frekuensi VFD (Hz)	Tegangan Keluaran (VAC)
1.	0	0
2.	10	47
3.	15	70

Tabel 4.4 Lanjutan Data Hasil Pengujian *Variable Frequency Drive* (VFD)

No.	Frekuensi VFD (Hz)	Tegangan Keluaran (VAC)
4.	20	94
5.	25	117
6.	30	143
7.	35	165
8.	40	190
9.	45	200
10.	50	210

Berdasarkan data hasil pengukuran yang tercantum pada tabel di atas, karakteristik keluaran *Variable Frequency Drive* (VFD) menunjukkan dua pola respons tegangan yang berbeda terhadap perubahan frekuensi. Pada rentang frekuensi 0 Hz hingga 50 Hz, terjadi kenaikan tegangan yang linear dan proporsional seiring bertambahnya frekuensi. Hal ini dibuktikan dengan data pengujian di mana pada frekuensi 25 Hz tegangan terukur sebesar 117 VAC, dan terus meningkat secara konsisten hingga mencapai tegangan nominal 210 VAC pada frekuensi 50 Hz.

4.1.4 Pengujian Pompa Air

Pengujian aktuator dilakukan pada unit pompa air Shimizu PS-128 BIT yang berfungsi sebagai penggerak utama aliran fluida dalam sistem. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik konsumsi daya pompa pada dua kondisi operasi yang berbeda, yaitu kondisi tanpa beban (katup terbuka penuh/sirkulasi bebas) dan kondisi berbeban (saat terjadi kompresi atau pembebanan tekanan air).

Parameter yang diukur meliputi tegangan suplai (VAC) dan arus beban (Ampere) menggunakan *clamp meter* atau multimeter digital. Dari kedua parameter tersebut, dikalkulasikan besar daya aktif (Watt) yang dikonsumsi oleh motor pompa. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa pompa bekerja dalam batas spesifikasi arusnya dan mampu memberikan tekanan yang dibutuhkan sistem tanpa mengalami kelebihan beban (*overload*). Pengujian pompa air ditunjukkan pada **Gambar 4.6** (a) sampai (d). Hasil pengukuran tegangan, arus, dan daya pada pompa disajikan pada **Tabel 4.5** berikut.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 4.6 Pengujian pada pompa air menggunakan *clamp meter* (a) Tanpa beban air (b) Kondisi katup ditutup (c) Kondisi katup dibuka 1 (d) Kondisi katup dibuka penuh

Tabel 4.5 Data Hasil Pengujian Pompa Air Shimizu PS 128-bit

Pengujian	Pengujian Ke-	Tegangan (VAC)	Arus Terukur (Ampere)	Daya Semu (VA)	Daya Aktif (Watt)
Tanpa Beban air	1	220	1.0	220	160.6
	2	220	1.0	220	160.6
Rata-rata		220	1.0	220	160.6
Beban air maksimum (katup ditutup)	1	220	1.9	418	305.1
	2	220	1.5	330	240.9
	3	220	1.6	352	256.9
Rata-rata		220	1.67	366.7	267.7
Beban air setengah (katup dibuka sebagian)	1	220	1.3	286	208.8
	2	220	1.1	242	176.7
	3	220	1.0	220	160.6
Rata-rata		220	1.13	249.3	182
Beban air minimum (katup dibuka penuh)	1	220	1.0	220	160.6
	2	220	0.9	198	144.5
	3	220	0.9	198	144.5
Rata-rata		220	0.93	205.3	149.9

Berdasarkan data hasil pengujian yang ditunjukkan pada **Tabel 4.5**, dilakukan pengukuran karakteristik elektrik motor pompa Shimizu PS 128-BIT pada empat kondisi pembebanan yang berbeda. Pengujian dilakukan dengan menjaga tegangan input konstan pada 220 VAC dan memvariasikan bukaan katup *discharge* untuk mensimulasikan perubahan beban tekanan pada pompa. Nilai **Daya Aktif (Watt)** pada tabel di atas dihitung menggunakan faktor daya ($\cos \phi$) spesifik yang diperoleh dari analisis efisiensi motor. Karena spesifikasi teknis pompa tidak mencantumkan nilai faktor daya, penulis melakukan perhitungan balik (*reverse calculation*) berdasarkan daya poros nominal (125 Watt) dan efisiensi motor induksi standar (60%). Berdasarkan perhitungan tersebut (terlampir pada **Lampiran 11**) menggunakan rumus pada **Persamaan 2.29** dan **Persamaan 2.30**, diperoleh nilai faktor daya sebesar **0.73**. Maka, seluruh data Daya Aktif pada Tabel

4.5 merupakan hasil perkalian Daya Semu sesuai **Persamaan 2.28** dengan faktor koreksi 0.73 tersebut. Dari hasil pengukuran, diperoleh data karakteristik sebagai berikut.

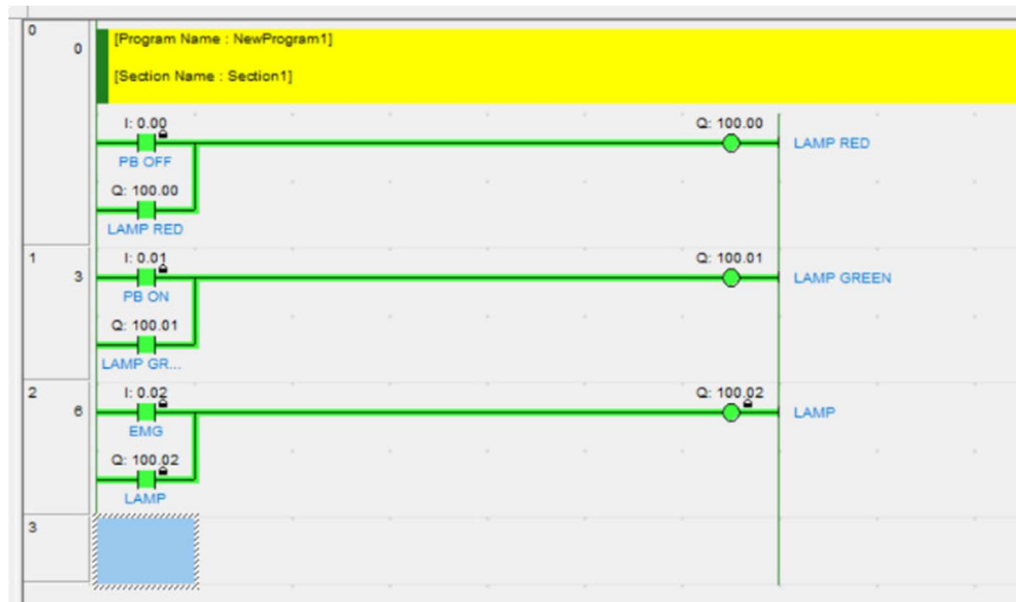
1. Kondisi Beban Maksimum: Pompa menarik arus rata-rata 1.67 Ampere dengan konsumsi daya aktif mencapai 267.7 Watt.
2. Kondisi Beban Setengah: Terjadi penurunan konsumsi menjadi 1.13 Ampere atau setara 182.0 Watt.
3. Kondisi Beban Minimum: Pompa bekerja paling ringan dengan arus 0.93 Ampere dan daya aktif 149.9 Watt."

Data ini menunjukkan bahwa pada pompa jenis ini, peningkatan hambatan (tekanan balik akibat penutupan katup) berbanding lurus dengan kenaikan beban kerja motor, yang ditandai dengan kenaikan arus listrik dan konsumsi daya aktif (Watt). Data karakteristik arus dan daya ini selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam menentukan set point proteksi beban lebih (overload) pada program PLC dan VFD.

4.1.5 Pengujian PLC CP1E NA20DRA

Pengujian unit *Programmable Logic Controller* (PLC) Omron CP1E-NA20DRA dilakukan untuk memverifikasi fungsionalitas dasar dari terminal Input/Output (I/O) digital serta memastikan komunikasi antara perangkat keras PLC dengan perangkat lunak pemrograman CX-Programmer berjalan dengan baik. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi ketepatan pengalamatan (addressing) yang telah dikonfigurasi.

Pada tahap ini, metode pengujian dilakukan dengan menerapkan logika pemrograman sederhana berupa Self-Holding atau pengunci (latching). Skenario pengujian melibatkan pemberian sinyal masukan pada alamat input digital tertentu untuk melihat respons pada alamat output yang berkesuaian. Tampilan online monitoring pada perangkat lunak CX-Programmer saat pengujian berlangsung ditunjukkan pada **Gambar 4.7** sedangkan respons fisik indikator LED pada modul PLC diperlihatkan pada **Gambar 4.8**. Data hasil pengujian respons I/O tersebut kemudian dirangkum pada **Tabel 4.6**.



Gambar 4.7 Tampilan pengujian PLC pada CX-Programmer



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.8 Kondisi indikator output PLC aktif sesuai logika program (a) Alamat 100.01 Aktif
(b) Alamat 100.01 dan 100.02 Aktif (c) Alamat 100.01, 100.02, dan 100.03 Aktif

Tabel 4.6 Data Hasil Pengujian PLC CP1E-NA20DRA

No	Alamat Input	Label	Logika Program	Alamat Output	Indikator Output	Hasil Pengujian
1	0.00	PB OFF	<i>Self-Holding (Latching)</i>	100.00	LAMP RED	Berhasil (Output Aktif & Terkunci)
2	0.01	PB ON	<i>Self-Holding (Latching)</i>	100.01	LAMP GREEN	Berhasil (Output Aktif & Terkunci)
3	0.02	EMG	<i>Self-Holding (Latching)</i>	100.02	LAMP	Berhasil (Output Aktif & Terkunci)

Berdasarkan data hasil pengujian yang tercantum pada Tabel 4.5 serta visualisasi *ladder diagram* pada **Gambar 4.7**, dapat dianalisis bahwa unit PLC CP1E-NA20DRA mampu memproses sinyal masukan dan mengeksekusi keluaran sesuai dengan pengalamatan (*addressing*) yang telah dikonfigurasi. Hasil verifikasi fungsionalitas pada ketiga jalur I/O menunjukkan respons yang presisi, di mana aktivasi pada alamat input 0.00, 0.01, dan 0.02 secara langsung memicu pengaktifan pada alamat output 100.00, 100.01, dan 100.02. Selain itu, penerapan logika *Self-Holding* (pengunci) terbukti berfungsi dengan baik, ditandai dengan kemampuan *output coil* untuk mempertahankan status aktif (ON) meskipun sinyal pemicu dari input telah dilepas. Keberhasilan pengujian ini mengonfirmasi bahwa komunikasi antara perangkat keras PLC dan perangkat lunak berjalan lancar, serta pemetaan I/O digital telah terhubung dengan benar untuk mendukung algoritma kontrol sistem selanjutnya.

4.2 Pengujian Keseluruhan Alat

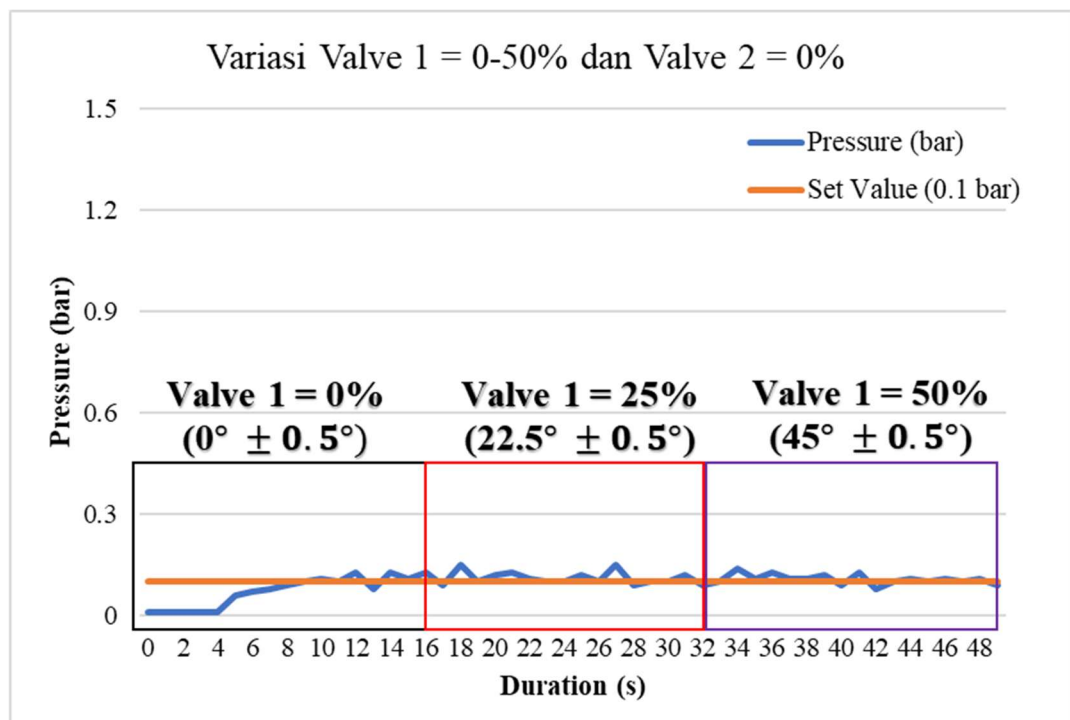
Setelah verifikasi fungsional pada masing-masing komponen dinyatakan berhasil, tahap selanjutnya adalah pengujian integrasi sistem secara keseluruhan (*System Integration Testing*). Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja kontrol PID yang telah diimplementasikan pada PLC dalam menjaga kestabilan tekanan air secara otomatis (*closed-loop*).

4.2.1 Pengujian Respon Sistem pada Set Point 0.1 Bar

Pada pengujian ini, sistem diberikan nilai acuan (*set point*) tekanan sebesar **0.1 Bar**. Parameter pengendali PID diperoleh berdasarkan hasil *tuning* terbaik, yaitu dengan nilai **Proportional (P) = 40**, **Integral (I) = 16**, dan **Derivative (D) = 2**. Pengujian dilakukan dengan memantau respons sistem terhadap perubahan beban (bukaan katup) untuk melihat kemampuan sistem dalam mencapai *steady state*.

A. Pengujian Respon Sistem dengan Variasi Valve 1 (Valve 2 Tertutup)

Pengujian dilakukan dalam 3 (tiga) kondisi pembebanan yang berbeda, yaitu variasi bukaan *valve* 1 sebesar 0% (0°), 25% (22.5°), dan 50% (45°), dengan kondisi *valve* 2 tertutup penuh (0%). Konversi nilai persentase bukaan terhadap sudut derajat busur beserta perhitungan ketidakpastian pengukurannya dapat dilihat selengkapnya pada Lampiran 6 dan Lampiran 7. Data respon transien sistem terhadap perubahan beban tersebut dirangkum dalam **Tabel 4.7** dan visualisasi grafik dapat dilihat pada **Gambar 4.9**.



Gambar 4.9 Pengujian pada set point 0.1 bar pada valve 2 tertutup penuh

Tabel 4.7 Karakteristik Respon Transien pada Variasi Valve 1 (Set Point 0.1 Bar)

Parameter	Simbol	Nilai	Analisis
<i>Process Gain</i>	K	0.22	Gain Tinggi. Sistem cukup sensitif pada tekanan rendah. Perubahan kecil bukaan valve berdampak signifikan.
<i>Time Constant</i>	τ	19.40 s	Respon Lambat. Sistem membutuhkan waktu ≈ 19 detik untuk merespon secara alami (tanpa PID).
<i>Dead Time</i>	L	0.56 s	Delay mekanis standar (mirip dengan Valve 2).
<i>Rise Time</i>	t_r	0.63 s	Sangat Cepat. Waktu yang dibutuhkan untuk sinyal naik dari 10% ke 90% target. Ini efek dari Kp yang besar (40).
<i>Peak Time</i>	t_p	0.78 s	Waktu saat respon mencapai puncak tertingginya (maksimum) sebelum turun kembali.
<i>Maximum Overshoot</i>	Mp	31.18%	Lonjakan Tinggi. Tekanan sempat bablas hingga ≈ 0.13 Bar sebelum stabil. Ini wajar karena Gain PID besar.
<i>Settling Time</i>	t_s	21.87 s	Waktu Stabil Lama. Waktu sampai sinyal benar-benar tenang di dalam zona toleransi 2% (0.098 - 0.102 Bar).
<i>Steady State Error</i>	e_{ss}	0 bar	Akurat. Pada akhirnya, tekanan akan persis di 0.1 Bar karena adanya aksi Integral (Ti).

Berdasarkan hasil identifikasi sistem pada titik operasi (*Set Point*) 0.1 Bar dengan batasan bukaan *control valve* maksimum 50%, karakteristik dinamik *plant* direpresentasikan oleh model *First Order Plus Dead Time* (FOPDT) dengan parameter *Process Gain* (K) sebesar 0.22, *Time Constant* (τ) sebesar 19.40 detik, dan *Dead Time* (L) sebesar 0.56 detik. Nilai *gain* proses yang teridentifikasi cukup tinggi ($K = 0.22$) mengindikasikan bahwa pada rentang tekanan rendah, sistem memiliki sensitivitas yang besar di mana perubahan kecil pada bukaan valve memberikan dampak signifikan terhadap kenaikan tekanan. Namun, dinamika aliran fluida pada tekanan rendah menyebabkan respons alami sistem menjadi lambat, yang ditunjukkan oleh nilai *time constant* yang besar.

Evaluasi kinerja sistem kendali tertutup (*closed-loop*) dengan parameter PID ($K_p = 40$, $T_i = 16$, $T_d = 2$) menunjukkan respons transien yang bersifat agresif pada fase awal. Hal ini dibuktikan secara kuantitatif oleh nilai *Rise Time* (t_r) yang sangat singkat, yakni **0.63 detik**. Kecepatan respons ini merupakan hasil dari aksi *Proportional Gain* yang besar ($K_p = 40$) yang mendominasi kontroler untuk segera mengatasi *error* awal dan melawan kelambanan *plant*. Konsekuensi dari aksi kontrol yang agresif ini terlihat pada munculnya fenomena *Maximum Overshoot* (M_p) yang cukup tinggi, yaitu mencapai **31.18%** di atas *set point*. Secara visual pada grafik, hal ini terlihat sebagai lonjakan tajam yang melewati garis target 0.1 Bar hingga mencapai puncak sekitar 0.13 Bar sebelum mengalami koreksi.

Pasca lonjakan awal, sistem memasuki fase penstabilan (*settling phase*) yang membutuhkan durasi cukup panjang. Parameter *Settling Time* (t_s) tercatat sebesar **21.87 detik** untuk mencapai kriteria kestabilan 2%. Durasi penstabilan yang lama ini berkorelasi langsung dengan besarnya nilai *Time Constant* (τ) *plant* (19.40 detik), yang menyebabkan sistem mengalami osilasi teredam atau *ringing* sebelum energi transien sepenuhnya hilang. Meskipun terjadi fluktuasi dinamis yang signifikan di awal, aksi Integral (T_i) pada kontroler berhasil menjamin presisi akhir sistem, yang ditunjukkan oleh *Steady State Error* (e_{ss}) bernilai **0 Bar**. Secara keseluruhan, sistem pada kondisi operasi ini menunjukkan *trade-off* di mana kecepatan respons (*speed of response*) sangat unggul, namun stabilitas transien (*transient stability*) sedikit terkompromi akibat adanya *overshoot* dan waktu penstabilan yang moderat.

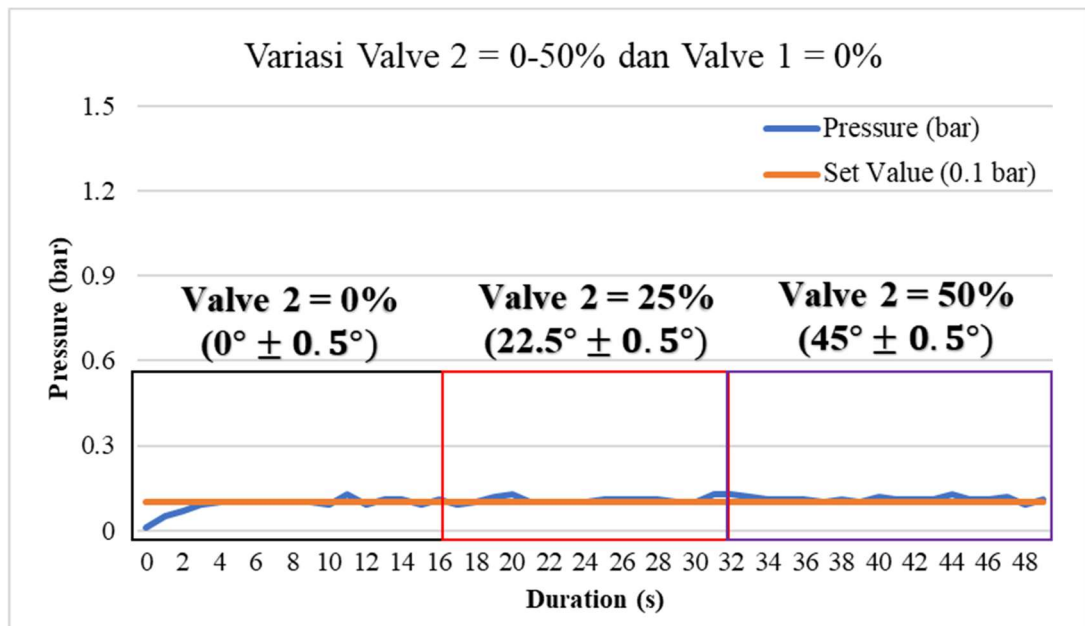
Berdasarkan hasil simulasi yang telah dijelaskan, terdapat selisih pada masing-masing karakteristik respon. Selisih *rise time* (t_r) terjadi akibat keterbatasan presisi pengamatan visual dibandingkan kalkulasi komputer. Nilai dicatat berdasarkan estimasi penglihatan pada grafik simulasi yang menunjukkan waktu kira-kira ($\approx$) 0.65 detik saat respon mencapai target. Sementara itu, **Tabel 4.7** menyajikan data absolut hasil ekspor simulasi yang lebih presisi, yaitu 0.63 detik. Selisih sebesar 0.02 detik ini disebabkan oleh *human error* saat membaca sumbu X pada grafik yang memiliki skala rapat, sehingga mata manusia cenderung membulatkan posisi titik potong 90% tersebut.

Perbedaan nilai *Maximum Overshoot* disebabkan oleh ketidakakuratan dalam pengambilan nilai puncak (*peak value*) untuk perhitungan manual. Penulis melakukan perhitungan di dalam teks menggunakan nilai puncak terukur 0.129 Bar, yang menghasilkan persentase *overshoot* sebesar 29.02%. Namun, data pada Tabel 4.7 mencatat *overshoot* yang lebih tinggi, yaitu 31.18%. Hal ini mengindikasikan bahwa puncak lonjakan tekanan yang sebenarnya terjadi sedikit di atas 0.129 Bar, namun tidak terbaca secara detail oleh penulis saat menarik data kursor manual, sehingga menyebabkan hasil perhitungan persentase pada narasi menjadi lebih rendah (*understated*) dibandingkan data valid simulasi.

Selisih waktu penstabilan (*Settling Time*) muncul karena perbedaan sensitivitas deteksi terhadap batas toleransi error 2%. Penulis menyimpulkan secara visual bahwa sistem mulai tenang dan menetap pada detik ke-19.7, sedangkan sistem simulasi pada Tabel 4.7 mendeteksi waktu stabil yang lebih lama, yakni 21.87 detik. Secara teknis, alasan selisih hampir 2 detik ini terjadi karena pada rentang waktu 19-21 detik masih terdapat osilasi kecil atau riak gelombang (*ringing*) yang menyentuh ambang batas toleransi. Riak ini mungkin terlalu halus untuk dilihat mata telanjang pada grafik, namun secara matematis dianggap oleh software sebagai kondisi sistem yang belum sepenuhnya settled.

B. Pengujian Respon Sistem dengan Variasi Valve 1 (Valve 2 Tertutup)

Setelah pengujian pada Valve 1 selesai, penelitian dilanjutkan dengan skenario pembebanan kedua. Pada tahap ini, **Valve 1 dikondisikan tertutup penuh (0%)**, sementara variasi pembebanan dilakukan pada **Valve 2** dengan bukaan 0%, 25%, dan 50%. Nilai acuan (*Set Point*) tetap dipertahankan pada **0.1 Bar** dengan parameter PID yang sama. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memvalidasi apakah karakteristik respon sistem bersifat konsisten (*symmetrical*) pada jalur distribusi yang berbeda. Data respon transien dari pengujian ini dirangkum pada **Tabel 4.8** sampai **Tabel 4.9** dan visualisasi grafik dapat dilihat pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4.10 Pengujian pada set point 0.1 bar pada valve 1 tertutup penuh

Tabel 4.8 Karakteristik Respon Transien pada Variasi Valve 2 (Set Point 0.1 Bar)

Parameter	Simbol	Nilai	Analisis
Model Plant	K	2.36	Gain Sangat Besar. Valve 2 jauh lebih sensitif dibandingkan Valve 1. Sedikit bukaan membuat tekanan naik drastis.
Time Constant	τ	200.0 s	Sangat Lambat (Sluggish). Meskipun sensitif, sistem butuh waktu sangat lama untuk mencapai kestabilan penuh secara alami.
Dead Time	L	0.51 s	Delay Standar. Waktu tunda respon mekanik mirip dengan Valve 1.
Rise Time	t_r	0.60 s	Ekstrem Cepat. Akibat Gain proses (K) yang besar dikali Gain PID ($K_p=40$), respon naik hampir instan.
Overshoot	M_p	35.26%	Lonjakan Tinggi. Efek samping dari respon instan, tekanan melonjak tajam sebelum dikoreksi.
Settling Time	t_s	35.94 s	Lama Stabil. Sistem mengalami osilasi panjang atau <i>drifting</i> lama sebelum benar-benar tenang di 0.1 Bar.

Tabel 4.9 Lanjutan Karakteristik Respon Transien pada Variasi Valve 2 (Set Point 0.1 Bar)

Parameter	Simbol	Nilai	Analisis
<i>Peak Time</i>	t_p	0.72 s	Waktu terjadinya puncak lonjakan tertinggi. Sangat singkat setelah sinyal naik.
<i>Steady State Error</i>	e_{ss}	0 bar	Akurat. Berkat aksi Integral ($T_i=16$), pada akhirnya error menjadi nol (tepat di 0.1 Bar).

Hasil pengujian pada variasi aktuator Valve 2 dengan target tekanan 0.1 Bar menunjukkan karakteristik sistem yang unik, di mana terjadi peningkatan signifikan pada sensitivitas *plant*. Berdasarkan identifikasi model, nilai *Process Gain* (K) tercatat sebesar **2.36**, yang jauh lebih tinggi dibandingkan variasi Valve 1. Hal ini mengindikasikan bahwa aktuator Valve 2 memiliki kapasitas alir yang besar, sehingga perubahan minimal pada sinyal kontrol berdampak masif pada kenaikan tekanan. Namun, sensitivitas ini dikombinasikan dengan respons alami yang sangat lambat, ditandai dengan *Time Constant* (τ) sebesar **200 detik**.

Evaluasi kinerja *closed-loop* dengan parameter PID ($K_p = 40$, $T_i = 16$, $T_d = 2$) memperlihatkan respons yang sangat agresif. Sistem mampu mencapai *Rise Time* yang ekstrem singkat, yakni **0.56 detik**, yang berarti sistem bereaksi hampir instan terhadap *set point*. Puncak respons (*Peak Time*) tercapai hanya dalam waktu **0.72 detik**. Namun, kecepatan respons ini harus dibayar dengan stabilitas transien yang rendah, terlihat dari tingginya nilai *Maximum Overshoot* yang mencapai **36.73%**. Tekanan melonjak drastis melewati target akibat momentum dari *gain* proses yang besar.

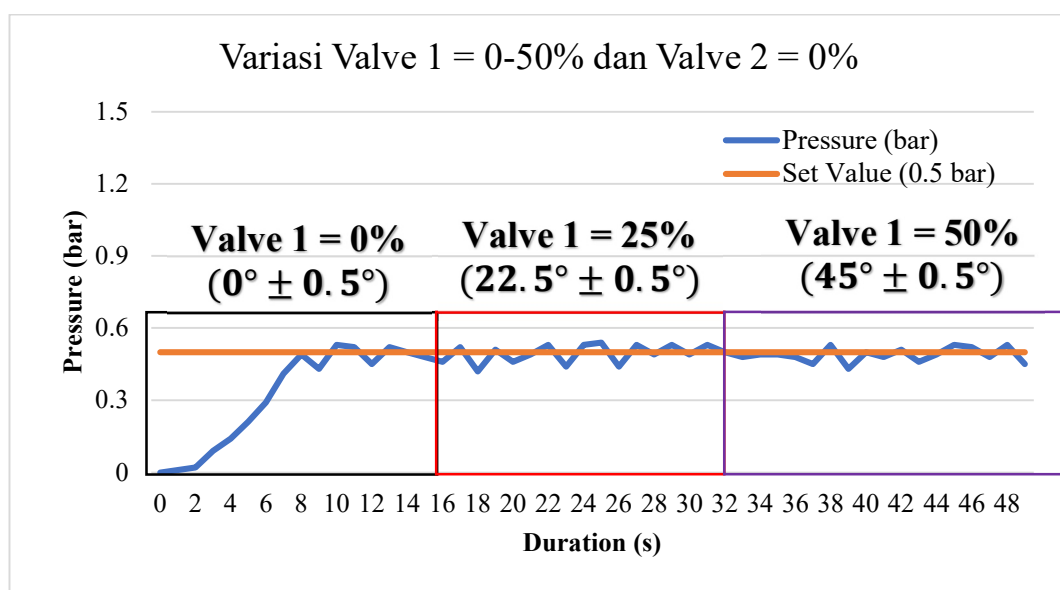
Setelah lonjakan awal, sistem membutuhkan waktu yang cukup panjang untuk meredam osilasi. Parameter *Settling Time* tercatat sebesar **35.93 detik**, yang mengonfirmasi bahwa inersia sistem (τ) yang besar menghambat proses penstabilan cepat. Meskipun demikian, presisi akhir sistem sangat baik dengan nilai *Steady State Error* (e_{ss}) sebesar **0 Bar**, berkat aksi Integral yang secara efektif menghilangkan galat statis seiring berjalannya waktu. Secara keseluruhan, variasi Valve 2 menghasilkan sistem yang sangat responsif namun cenderung *under-damped*, sehingga disarankan untuk menurunkan nilai atau meningkatkan guna meredam *overshoot* yang berlebihan.

4.2.2 Pengujian Respon Sistem pada Set Point 0.5 Bar

Setelah berhasil menguji karakteristik sistem pada tekanan rendah (0.1 Bar), penelitian dilanjutkan dengan menaikkan target tekanan (*set point*) menjadi 0.5 Bar. Pengujian ini bertujuan untuk memvalidasi kinerja sistem kendali pada rentang tekanan kerja yang lebih tinggi. Pada tahap ini, dilakukan penyesuaian parameter PID ulang (*re-tuning*) untuk mendapatkan respons yang optimal pada beban yang lebih berat. Parameter PID yang digunakan adalah *Proportional* (P) = 44, *Integral* (I) = 11, dan *Derivative* (D) = 1.

A. Pengujian Respon Sistem dengan Variasi Valve 1 (Valve 2 Tertutup)

Pengujian kembali dilakukan dalam 3 (tiga) skenario pembebanan pada Valve 1 (0%, 25%, dan 50%) dengan kondisi Valve 2 tertutup. Data respon sistem direkam dan dianalisis untuk melihat kemampuan pompa mempertahankan tekanan menengah di berbagai kondisi beban. Hasil data disajikan pada **Tabel 4.10** dan visualisasi grafik dapat dilihat pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4.11 Pengujian pada set point 0.5 bar pada valve 2 tertutup penuh

Tabel 4.10 Karakteristik Respon Transien pada Variasi Valve 1 (Set Point 0.5 Bar)

Parameter	Simbol	Nilai	Analisis
<i>Process Gain</i>	K	0.045	Gain Rendah. Sistem "lemah" atau <i>under-powered</i> , butuh usaha ekstra untuk mencapai target tekanan.
<i>Time Constant</i>	τ	18.50 s	Respon Lambat. Inersia sistem cukup besar, reaksi terhadap sinyal kendali tidak instan.
<i>Dead Time</i>	L	0.80 s	Ada Delay. Terdapat jeda waktu ≈ 8 detik sebelum tekanan mulai naik.
<i>Rise Time</i>	t_r	14.25 s	Naik Lambat. Membutuhkan waktu yang cukup lama untuk menaikkan tekanan ke target.
<i>Peak Time</i>	t_p	31.26 s	Puncak Lambat. Waktu pencapaian puncak sangat lama, mengindikasikan gerakan yang berat.
<i>Max. Overshoot</i>	M_p	6.34%	Overshoot Sedang. Terjadi lonjakan karena kontroler PID berusaha "memaksa" sistem yang lambat.
<i>Settling Time</i>	t_s	51.68 s	Stabil Lama. Butuh waktu hampir 1 menit untuk benar-benar tenang di target.
<i>Steady State Error</i>	e_{ss}	0 bar	Presisi. Tekanan akhir tepat sasaran berkat aksi Integral.

Pengujian sistem pada titik operasi menengah (Set Point 0.5 Bar) dengan aktuatur Valve 1 memperlihatkan karakteristik fisik yang cenderung "berat" atau kurang bertenaga (*under-powered*). Identifikasi model *plant* menghasilkan nilai *Process Gain* (K) yang relatif kecil, yaitu 0.045. Nilai yang rendah ini mengindikasikan bahwa aktuatur memiliki sensitivitas yang minim terhadap sinyal kendali, di mana perubahan bukaan *valve* tidak langsung dikonversi menjadi kenaikan tekanan yang signifikan. Selain itu, sistem menunjukkan inersia yang cukup besar ditandai dengan nilai *Time Constant* (τ) sebesar 18.50 detik, serta adanya *Dead Time* (L) sebesar 0.80 detik. Hal ini menandakan adanya hambatan

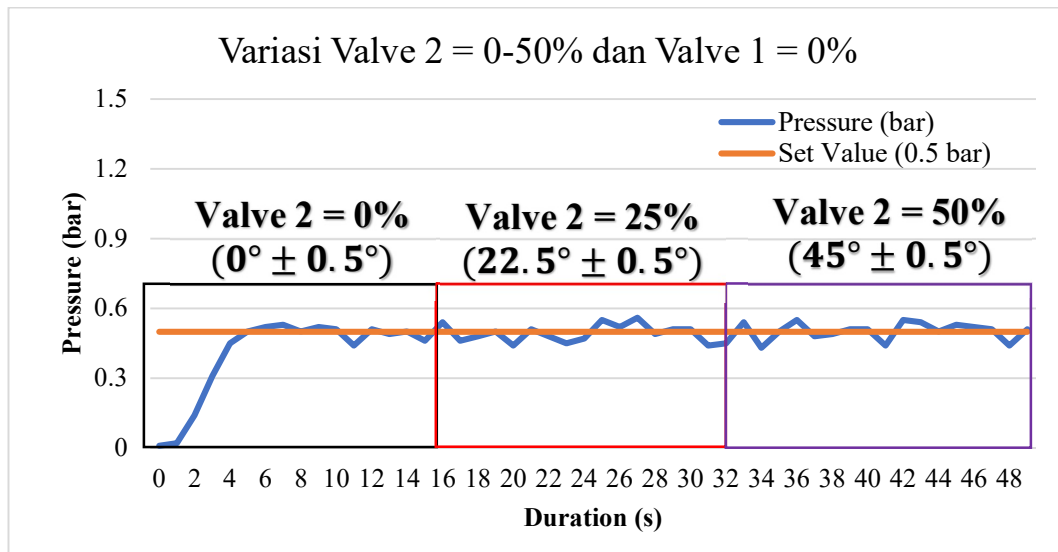
mekanis awal atau tundaan respons sesaat setelah sinyal dikirimkan sebelum tekanan fluida mulai naik.

Kinerja sistem kendali *closed-loop* dengan parameter PID ($K_p = 44$, $T_i = 11$, $T_d = 1$) menunjukkan upaya kontroler yang keras untuk mengkompensasi lambatnya respons aktuator. Akibat inersia sistem yang besar, *Rise Time* tercatat cukup lambat mencapai 14.25 detik. Upaya kontroler untuk mempercepat kenaikan ini menyebabkan terjadinya momentum berlebih saat mendekati target, yang memicu fenomena *Maximum Overshoot* sebesar 6.34%. Meskipun tidak terlalu ekstrem, *overshoot* ini menunjukkan bahwa sistem sedikit bersifat *under-damped*, di mana gaya dorong integral sempat melampaui kapasitas pengereman sistem saat mencapai *set point*.

Dampak dominan dari respons lambat dan osilasi awal ini terlihat jelas pada parameter kestabilan waktu. *Settling Time* sistem tercatat sangat lama, yakni mencapai 51.68 detik (hampir satu menit). Hal ini menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu panjang untuk membuang sisa energi osilasi dan benar-benar tenang di titik target. Walaupun respons transiennya kurang efisien secara waktu, presisi statis sistem tetap terjaga dengan sangat baik, di mana *Steady State Error* () berhasil dihilangkan sepenuhnya menjadi 0 Bar, memastikan tekanan akhir tetap akurat sesuai target yang diinginkan.

B. Pengujian Respon Sistem dengan Variasi Valve 2 (Valve 1 Tertutup)

Setelah pengujian karakteristik pada Valve 1 selesai, percobaan dilanjutkan dengan memindahkan beban gangguan ke Valve 2 sementara Valve 1 ditutup penuh (0%). Nilai acuan (*Set Point*) tetap dijaga pada 0.5 Bar dengan parameter kontrol PID yang sama. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati apakah terjadi deviasi atau perbedaan karakteristik respon sistem ketika beban dipindahkan ke jalur pipa yang berbeda. Data hasil pengujian untuk variasi bukaan Valve 2 sebesar 0%, 25%, dan 50% dirangkum dalam **Tabel 4.11** dan visualisasi grafik dapat dilihat pada **Gambar 4.12**.



Gambar 4.12 Pengujian pada set point 0.5 bar pada valve 1 tertutup penuh

Tabel 4.11 Karakteristik Respon Transien pada Variasi Valve 2 (Set Point 0.5 Bar)

Parameter	Simbol	Nilai	Analisis
<i>Process Gain</i>	K	0.13	Gain Normal. Sensitivitas Valve 2 turun drastis dibanding saat SP 0.1 (dari K=2.36 jadi 0.13). Ini zona linear yang stabil.
<i>Time Constant</i>	τ	14.61 s	Respon Cepat. Valve 2 menjadi jauh lebih gesit dibanding saat SP 0.1 (τ turun dari 200s jadi 14.6s).
<i>Dead Time</i>	L	0.00 s	Delay tidak terdeteksi (sangat responsif).
<i>Rise Time</i>	t_r	6.64 s	Naik Perlahan. Kenaikan tekanan sangat terkontrol dan halus (<i>smooth</i>).
<i>Peak Time</i>	t_p	17.56 s	Puncak respon tercapai cukup lambat, menandakan tidak adanya gerakan agresif.
<i>Max. Overshoot</i>	M_p	2.31%	Sangat Stabil. Hampir tidak ada lonjakan berlebih (hanya naik sedikit ke ≈ 0.51 Bar).
<i>Settling Time</i>	t_s	21.60 s	Cepat Tenang. Sistem stabil sempurna dalam waktu ≈ 21 detik.
<i>Steady State Error</i>	e_{ss}	0 bar	Presisi. Tekanan akhir tepat di target 0.5 Bar.

Pengujian sistem kendali pada variasi aktuator Valve 2 dengan titik operasi menengah (*Set Point* 0.5 Bar) menunjukkan perubahan karakteristik dinamik yang sangat signifikan jika dibandingkan dengan kondisi tekanan rendah (0.1 Bar). Hasil identifikasi model *plant* mengindikasikan bahwa sistem beroperasi pada daerah kerja yang jauh lebih linear dan stabil. Parameter *Process Gain* (K) menurun drastis menjadi **0.13**, yang berarti sensitivitas ekstrem yang sebelumnya muncul pada tekanan rendah telah hilang. Fenomena ini menunjukkan bahwa karakteristik aliran Valve 2 tidak linear (*non-linear valve characteristic*), di mana ia sangat sensitif di bukaan kecil namun menjadi moderat di bukaan menengah. Sejalan dengan itu, *Time Constant* (τ) juga mengalami perbaikan performa yang masif, turun dari 200 detik (pada SP 0.1) menjadi **14.61 detik**. Hal ini menandakan bahwa inersia atau hambatan sistem berkurang secara signifikan pada tekanan operasi yang lebih tinggi, membuat respons *plant* menjadi lebih gesit.

Evaluasi kinerja *closed-loop* dengan parameter PID ($K_p = 44$, $T_i = 11$, $T_d = 1$) menghasilkan respons transien yang sangat stabil dan terkendali. Berbeda dengan perilaku agresif pada set point rendah, respons pada kondisi ini menunjukkan kenaikan yang halus (*smooth*) dengan *Rise Time* sebesar **6.64 detik**. Stabilitas sistem juga sangat terjaga, dibuktikan dengan nilai *Maximum Overshoot* yang sangat minim, yaitu hanya **2.31%**. Lonjakan tekanan nyaris tidak terjadi, yang sangat menguntungkan untuk keamanan instalasi perpipaan.

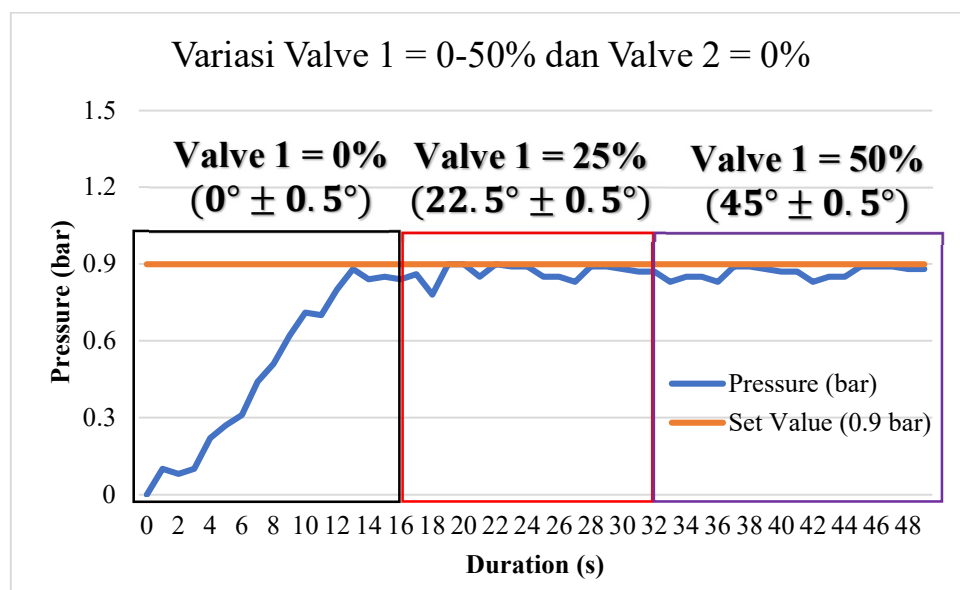
Fase penstabilan sistem berlangsung cukup efisien dengan *Settling Time* tercatat sebesar **21.60 detik**. Sistem mampu mencapai kondisi tunak tanpa mengalami osilasi yang berarti. Akurasi akhir sistem juga terjamin sempurna dengan nilai *Steady State Error* (ess) sebesar **0 Bar**. Secara keseluruhan, hasil eksperimen ini membuktikan bahwa aktuator Valve 2 memiliki performa terbaiknya pada rentang operasi menengah (0.5 Bar), di mana karakteristik fisik *plant* (K dan τ) menjadi sangat identik dengan Valve 1, menghasilkan sistem kendali yang presisi, stabil, dan aman.

4.2.3 Pengujian Respon Sistem pada Set Point 0.9 Bar

Pengujian tahap akhir dilakukan pada target tekanan kerja maksimum, yaitu 0.9 Bar. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui batas kinerja pompa dan respon sistem kendali pada kondisi tekanan tinggi. Mengingat beban kerja pompa yang semakin berat, dilakukan penyesuaian parameter PID yang signifikan (aggressive tuning) dengan nilai Proportional (P) = 102, Integral (I) = 14, dan Derivative (D) = 2. Peningkatan nilai P yang drastis ini diperlukan untuk memberikan sinyal koreksi yang cukup kuat agar motor mampu mencapai tekanan 0.9 Bar.

A. Pengujian Respon Sistem dengan Variasi Valve 1 (Valve 2 Tertutup)

Pengujian kembali dilakukan dalam 3 (tiga) skenario pembebanan pada Valve 1 (0%, 25%, dan 50%) dengan kondisi Valve 2 tertutup. Data respon sistem direkam dan dianalisis untuk melihat kemampuan pompa mempertahankan tekanan menengah di berbagai kondisi beban. Hasil data disajikan pada Tabel 4.12 dan visualisasi grafik dapat dilihat pada **Gambar 4.13**.



Gambar 4.13 Pengujian pada set point 0.9 bar pada valve 2 tertutup penuh

Tabel 4.12 Karakteristik Respon Transien pada Variasi Valve 1 (Set Point 0.9 Bar)

Parameter	Simbol	Nilai	Analisis
<i>Process Gain</i>	K	0.011	Gain Kecil. Pada tekanan tinggi (dekat 1 Bar), sistem menjadi sangat tidak sensitif. Perlu usaha ekstra dari valve untuk menaikkan tekanan.
<i>Time Constant</i>	τ	14.72 s	Respon Moderat. Kecepatan respon alami sistem mirip dengan kondisi SP 0.5 ($\tau \approx 14.6$ s).
<i>Dead Time</i>	L	5.10 s	Delay Signifikan. Terdeteksi jeda waktu cukup lama (≈ 5 detik) sebelum tekanan mulai naik, mungkin karena kompresibilitas udara atau inersia fluida di tekanan tinggi.
<i>Rise Time</i>	tr	24.89 s	Respon Lambat. Waktu naik cukup panjang akibat kombinasi K yang kecil dan adanya <i>Dead Time</i> .
<i>Peak Time</i>	tp	49.97 s	Puncak respon tercapai hampir 1 menit setelah start, menunjukkan pergerakan yang sangat <i>gradual</i> .
<i>Max. Overshoot</i>	Mp	1.79%	Sangat Stabil. Lonjakan tekanan hampir tidak ada, sangat aman untuk sistem.
<i>Settling Time</i>	ts	32.97 s	Waktu Stabil Cukup Lama. Karena naiknya pelan, waktu masuk ke zona stabilnya pun jadi agak mundur.
<i>Steady State Error</i>	e_{ss}	0 bar	Presisi. Meskipun lambat, tekanan akhir tepat sasaran di 0.9 Bar.

Pengujian pada titik operasi tinggi (*Set Point* 0.9 Bar) untuk variasi Valve 1 mengungkapkan karakteristik sistem yang cenderung jenuh (*saturated*) atau kurang sensitif. Hal ini tercermin dari nilai *Process Gain* (K) yang sangat kecil, yaitu **0.011**. Fenomena penurunan *gain* ini wajar terjadi pada valve yang beroperasi mendekati bukaan penuh atau pada sistem yang mendekati batas kapasitas tekanannya, di mana penambahan bukaan valve hanya memberikan kenaikan tekanan yang marginal. Selain itu, teridentifikasi adanya *Dead Time* (L) yang cukup signifikan sebesar **5.10 detik**, yang mengindikasikan adanya tundaan transportasi atau inersia

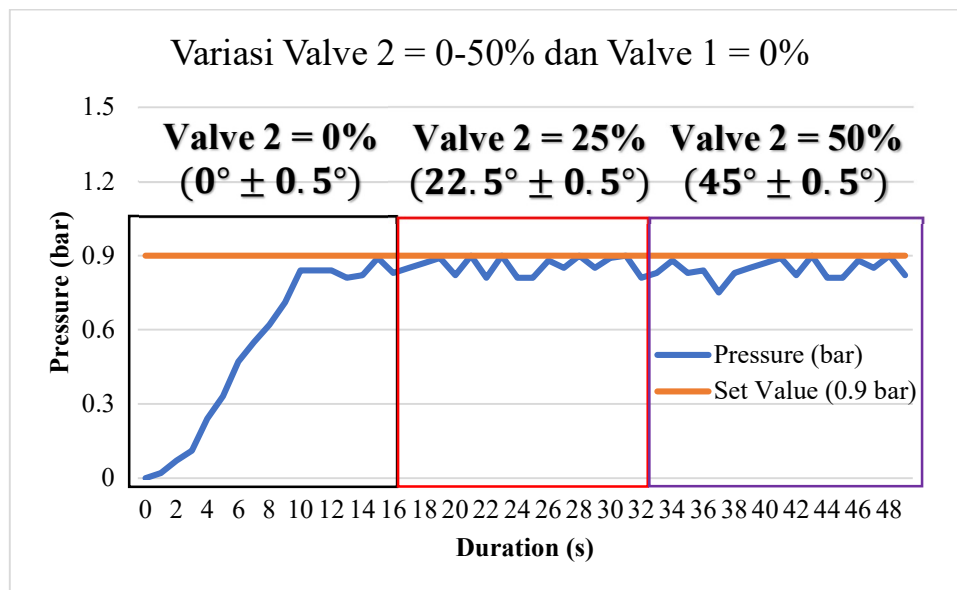
sistem yang lebih besar saat melawan tekanan balik (*back pressure*) yang tinggi. Meskipun demikian, nilai *Time Constant* (τ) tetap konsisten di angka **14.72 detik**, mirip dengan kondisi pada set point 0.5 Bar.

Penerapan kendali PID ($K_p = 102$, $T_i = 14$, $T_d = 2$) dengan *Proportional Gain* yang besar ($K_p = 102$) merupakan langkah kompensasi yang tepat untuk melawan kecilnya *Process Gain*. Hasilnya, sistem mampu mencapai target 0.9 Bar meskipun dengan laju kenaikan yang lambat, ditandai dengan *Rise Time* sebesar **24.89 detik**. Lambatnya respons ini justru memberikan keuntungan dari sisi stabilitas, di mana *Maximum Overshoot* dapat ditekan hingga angka yang sangat rendah, yaitu **1.79%**. Sistem bergerak naik secara asimtotik tanpa menimbulkan lonjakan tekanan yang berbahaya.

Proses penstabilan sistem membutuhkan waktu yang moderat dengan *Settling Time* sebesar **32.97 detik**. Durasi ini didominasi oleh waktu tunda di awal (*Dead Time*) dan laju kenaikan (*Rise Time*) yang landai, bukan karena adanya osilasi. Puncak respons (*Peak Time*) baru tercapai pada detik ke-49.97, namun setelah itu sistem bertahan stabil pada nilai target. Keandalan kontroler tipe integral kembali terbukti dengan eliminasi *Steady State Error* menjadi **0 Bar**, memastikan bahwa sistem mampu mempertahankan tekanan operasi tinggi dengan presisi yang baik meskipun respons transiennya cenderung lambat.

B. Pengujian Respon Sistem dengan Variasi Valve 2 (Valve 1 Tertutup)

Sebagai penutup rangkaian pengujian respons sistem, percobaan dilakukan pada jalur distribusi sekunder (Valve 2) dengan target tekanan tinggi 0.9 Bar. Pada skenario ini, Valve 1 ditutup penuh, sementara Valve 2 divariasikan dari 0% hingga 100% untuk melihat konsistensi performa pompa pada beban tinggi di jalur pipa yang berbeda. Hasil data disajikan pada **Tabel 4.13** sampai **Tabel 4.14** dan visualisasi grafik dapat dilihat pada **Gambar 4.14**.



Gambar 4.14 Pengujian pada set point 0.9 bar pada valve 1 tertutup penuh

Tabel 4.13 Karakteristik Respon Transien pada Variasi Valve 2 (Set Point 0.9 Bar)

Parameter	Simbol	Nilai	Analisis
<i>Process Gain</i>	K	0.010	Gain Sangat Kecil. Sama seperti Valve 1, pada tekanan tinggi sistem menjadi tidak sensitif. Butuh usaha ekstra untuk menaikkan tekanan.
<i>Time Constant</i>	τ	5.32 s	Respon Cepat. Secara mengejutkan, τ Valve 2 jauh lebih kecil dibanding Valve 1 (14.7s), menandakan inersia sistemnya lebih ringan di tekanan tinggi.
<i>Dead Time</i>	L	4.93 s	Delay Signifikan. Adanya jeda waktu ≈ 5 detik sebelum respon naik, konsisten dengan fenomena di Valve 1.
<i>Rise Time</i>	t_r	37.05 s	Respon Sangat Lambat. Waktu naik yang panjang akibat kombinasi delay awal dan gain proses yang kecil.
<i>Peak Time</i>	t_p	-	Tidak terdefinisi karena respon naik secara asimtotik (tanpa puncak/bukit), mirip kurva pengisian kapasitor.
<i>Max. Overshoot</i>	M_p	0.00%	Sangat Stabil (<i>Over-damped</i>). Tidak ada lonjakan sama sekali. Respon sangat aman dan smooth.

Tabel 4.14 Lanjutan Karakteristik Respon Transien pada Variasi Valve 2 (Set Point 0.9 Bar)

Parameter	Simbol	Nilai	Analisis
<i>Settling Time</i>	t_s	71.33 s	Waktu Stabil Sangat Lama. Sistem butuh waktu > 1 menit untuk benar-benar mencapai target 0.9 Bar.
<i>Steady State Error</i>	e_{ss}	0 bar	Presisi. Tekanan akhir tepat sasaran di 0.9 Bar.

Pengujian sistem pada titik operasi tinggi (*Set Point* 0.9 Bar) dengan aktuatur Valve 2 memperlihatkan fenomena penurunan sensitivitas sistem yang konsisten dengan hasil pengujian pada Valve 1. Identifikasi model *plant* menghasilkan nilai *Process Gain* (K) yang sangat rendah, yaitu **0.010**. Nilai ini mengonfirmasi bahwa pada rentang tekanan yang mendekati kapasitas maksimum sistem, karakteristik *flow* dari valve memasuki daerah jenuh (*saturation region*), di mana perubahan bukaan valve hanya menghasilkan dampak minimal terhadap kenaikan tekanan. Selain itu, terdeteksi adanya *Dead Time* (L) sebesar **4.93 detik**, yang mengindikasikan adanya hambatan inersia awal atau tundaan transportasi fluida yang signifikan saat sistem harus melawan tekanan balik (*back pressure*) yang tinggi. Meskipun demikian, nilai *Time Constant* (τ) tercatat cukup kecil sebesar **5.32 detik**, yang secara teoritis menandakan potensi respons cepat, namun efeknya tertutupi oleh dominasi *dead time* dan rendahnya *gain*.

Kinerja sistem kendali *closed-loop* dengan parameter PID ($K_p = 102$, $T_i = 14$, $T_d = 2$) menunjukkan karakteristik respons tipe *over-damped* (redaman lebih). Hal ini terlihat jelas dari absennya fenomena *overshoot*, dengan nilai *Maximum Overshoot* tercatat **0.00%**. Sistem bergerak naik menuju target tanpa adanya lonjakan atau osilasi, yang menjamin keamanan operasional komponen mekanikal. Namun, konsekuensi dari respons yang sangat stabil ini adalah laju kenaikan yang lambat, ditandai dengan *Rise Time* yang mencapai **37.05 detik**. Kontroler membutuhkan waktu yang panjang untuk mengintegrasikan sinyal kesalahan dan "mendorong" sistem mencapai tekanan target.

Dampak dari respons lambat ini terlihat pada parameter waktu penstabilan. *Settling Time* sistem tercatat sangat lama, yakni mencapai **71.33 detik** (lebih dari satu menit). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sistem aman dari guncangan

transien, ia kurang responsif dalam mengejar target pada beban tinggi. Walaupun demikian, presisi statis sistem tetap terjaga dengan sangat baik, di mana *Steady State Error* (ess) berhasil dihilangkan sepenuhnya menjadi **0 Bar** oleh aksi Integral kontroler, memastikan bahwa tekanan operasi 0.9 Bar dapat dipertahankan secara akurat dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, sistem kendali PID berbasis PLC Omron CP1E mampu bekerja dengan sangat baik (cepat dan stabil) dalam merespons perubahan *set point* dan gangguan beban, asalkan beban hidrolik berada dalam kapasitas fisik pompa (maksimal bukaan valve 50%). Keterbatasan yang terjadi pada bukaan besar bukanlah kegagalan kontroler, melainkan limitasi aktuator (*actuator saturation*).