



**IMPLEMENTASI METODE RULE – BASED *INTERLOCK* PADA SISTEM
KONTROL DAN MONITORING TANGKI *CAUSTIC* BERBASIS PLC
DAN SCADA**

LAPORAN TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat menyelesaikan pendidikan pada
Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro

Disusun oleh:
Adrian Romadhon Siregar
40040322650038

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN TEKNOLOGI REKAYASA OTOMASI
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR

IMPLEMENTASI METODE RULE – BASED *INTERLOCK* PADA SISTEM KONTROL DAN MONITORING TANGKI *CAUSTIC* BERBASIS PLC DAN SCADA

Diajukan Oleh:

Adrian Romadhon Siregar

40040322650038

TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH

Menyetujui,

Dosen Pembimbing



Megarini Hersaputri S.T, M.T

NIP.198902142020122012

Tanggal, 23 Juli 2026

Mengetahui

Ketua

Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi



Priyo Sasmito, S.T.,M.Eng

NIP.197009161998021001

Tanggal, 23 Juli 2026

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR IMPLEMENTASI METODE RULE – BASED *INTERLOCK* PADA SISTEM KONTROL DAN MONITORING TANGKI *CAUSTIC* BERBASIS PLC DAN SCADA

Disusun oleh:

Adrian Romadhon Siregar

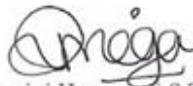
NIM 40040322650038

Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji

23 Juli 2026

Tim penguji,

Dosen Pembimbing



Megarini Hersaputri S.T., M.T

NIP.198902142020122012

Penguji 1



Rofiq Cahyo Prayogo, S.T., M.T.

NIP. 199505292024061001

Penguji 2



Priyo Sasnoko, S.T., M.Eng

NIP.197009161998021001

Mengetahui

Ketua Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro



Priyo Sasnoko, S.T., M.Eng

NIP.197009161998021001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Nama : Adrian Romadhon Siregar
NIM : 40040322650038
Program Studi : S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi
Judul Tugas Akhir : IMPLEMENTASI METODE RULE – BASED
INTERLOCK PADA SISTEM KONTROL DAN
MONITORING TANGKI *CAUSTIC* BERBASIS PLC
DAN SCADA

Dengan ini menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka. Apabila di kemudian hari terbukti plagiat dalam tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No 17 Tahun 2010 dan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, 23 Juli 2026

Penulis



Adrian Romadhon Siregar

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, Sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “IMPLEMENTASI METODE RULE – BASED *INTERLOCK* PADA SISTEM KONTROL DAN MONITORING TANGKI *CAUSTIC* BERBASIS PLC DAN SCADA” Tersusunnya laporan ini tentu tidak lepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan hikmah, kesehatan, dan kelancaran bagi penulis dalam setiap langkah penyusunan tugas akhir ini.
2. Prof. Dr. Ir. Budiyo, M.Si. selaku Dekan Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
3. Dr. Moh. Ridwan, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknologi Industri.
4. Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi D-IV Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
5. Megarini Hersaputri, ST, MT., selaku dosen pembimbing saya yang dengan sabar dan perhatian membimbing penulis hingga sampai pada titik ini. Terima kasih telah percaya, membantu, membimbing dan selalu mendorong penulis untuk terus berkembang
6. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan Teknologi Rekayasa Otomasi Fakultas Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro yang telah memberikan ilmu-ilmu dan membantu dalam setiap proses yang dilewati penulis.
7. Kepada kedua orang tua penulis, Papa dan Mama tercinta, yang senantiasa memberikan kasih sayang, doa, dukungan, serta kepercayaan kepada setiap keputusan yang penulis ambil. Terima kasih atas segala nasihat yang selalu menjadi penguat, terutama di saat-saat tersulit yang penulis hadapi. Terima kasih atas segala pengorbanan, kerja keras, keringat, air mata, dan tenaga yang telah dicurahkan demi memberikan yang terbaik bagi penulis. Semua pengorbanan tersebut merupakan anugerah yang tidak akan pernah dapat penulis balas, namun akan selalu penulis kenang dan jadikan motivasi untuk terus berusaha menjadi pribadi yang lebih baik.

8. Kepada saudara penulis, Kak Sheva dan Daffa, yang senantiasa menjadi panutan dan sumber semangat bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Terima kasih atas segala dukungan, doa, pengertian, dan pengorbanan yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan yang telah kalian curahkan mendapatkan balasan yang terbaik dan kita bisa sukses Bersama
9. Kepada Bagus, teman yang telah penulis anggap sebagai saudara. Terima kasih atas dukungan, motivasi, dan kebersamaan yang telah diberikan sejak awal hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga kita dapat terus berkembang dan meraih kesuksesan bersama.
10. Kepada teman-teman Cataim, yaitu Hafis, Bayu, dan Rehan, yang telah menemani perjalanan perkuliahan penulis dengan canda, tawa, dan kebersamaan. Terima kasih telah memberikan begitu banyak kenangan indah dan warna yang membekas selama masa perkuliahan. Semoga persahabatan ini tetap terjalin dan kita semua diberikan kesuksesan di masa depan.
11. Kepada teman-teman SATNAYAKA yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan perkuliahan penulis. Terima kasih atas segala kebersamaan, cerita, bantuan, dan dukungan yang telah diberikan sehingga masa perkuliahan menjadi pengalaman yang berkesan
12. Kepada Mas Samuel dan Mas Johan, yang telah banyak membantu dan memberikan arahan kepada penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini. Terima kasih atas segala bantuan, waktu, dan ilmu yang telah diberikan.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih kurang sempurna dan banyak kekurangan. Penulis berharap semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca.

Semarang, 23 Juli 2026



Adrian Romadhon Siregar

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN LAPORAN TUGAS AKHIR.....	i
HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR.....	ii
SURAT PENYETAAN BEBAS PLAGIAT.....	ii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xiii
INTISARI.....	xv
ABSTRAK	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Tugas Akhir.....	4
1.4 Manfaat Tugas Akhir.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Tugas Akhir	5
BAB II DASAR TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Programmable Logic Controller (PLC) Allen-Bradley L24ER	10
2.3 Proline Promas E 300 Flowmeter.....	12
2.4 Gateway EN2PA-R	13
2.5 Ball Valve SS Flange 3Inch	14
2.6 FactoryTalk View sebagai Sistem HMI/SCADA.....	15
2.7 <i>Caustic Soda</i>	17
2.8 Model Dinamika Tangki.....	19
2.9 <i>Rule Based Interlock System</i> pada Industri	21
2.10 Analisis Resiko Keselamatan Kerja	22
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Diagram Blok Komponen.....	25

3.1.1 OMRON S8VS Power Supply.....	25
3.1.2 Allen-Bradley CompactLogix L24ER.....	26
3.1.3 Promass E 300 / Flowmeter.....	26
3.1.4 Ball Valve SS Flange 3 Inch / ACV.....	26
3.1.5 Limit Switch.....	26
3.1.6 Level Indicator.....	26
3.1.7 ENPA-R Gateway.....	26
3.1.8 Solenoid valve.....	26
3.2 Diagram Blok Sistem Permissive <i>Interlock</i>	27
3.3 Flowchart Sistem Bongkar dan Transfer.....	28
3.4 Gambar Sistem.....	31
3.5 Desain Rangkaian Elektrikal.....	33
3.6 Spesifikasi Validasi Kapasitas Tanki Coustic Soda.....	34
3.7 Penetapan Batas Level Sebagai Syarat <i>Interlock</i>	35
3.7.1 Tangki PIT.....	35
3.7.2 Tangki CST (<i>Caustic Soda Tank</i>).....	36
3.8 Alat dan Bahan.....	37
3.9 Perancangan Logika Ladder Diagram.....	38
3.9.1 Arsitektur Program PLC.....	39
3.9.2 Perancangan AOI (<i>Add On Instructiont</i>).....	46
3.9.3 Perancangan <i>Rule Base Interlock</i>	54
3.9.4 Perancangan Sistem Bongkar.....	59
3.9.5 Perancangan Proses Transfer.....	62
3.10 Arsitektur Komunikasi Sistem.....	67
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA.....	70
4.1 Pengujian Komponen Individual.....	70
4.1.1 Pengujian PLC.....	70
4.1.2 Pengujian Konektivitas Sistem.....	74
4.1.3 Pengujian Pembacaan dan Flowmeter dan Level Indikator SCADA ...	76
4.1.4 Pengujian <i>Solenoid valve</i> dan ACV.....	80
4.2 Pengujian Akurasi Flowmeter PROMASS -PA.....	82
4.2.1 Perbandingan Flowrate Real dan Tampilan Flowrate SCADA.....	83
4.3 Pengujian Respon Sistem.....	86
4.3.1 Respon Sistem <i>Start</i> Proses Bongkar.....	86

4.3.2 Respon Sistem <i>Start</i> Proses Transfer.....	87
4.3.3 Respon Sistem <i>Stop</i> Proses Transfer	89
4.3.4 Respon Sistem <i>Stop</i> Proses Bongkar	91
4.4 Pengujian Sistem Terintegrasi.....	92
4.4.1 Pengujian Proses Bongkar	92
4.4.2 Pengujian Proses Transfer	96
4.5 Hasil Analisis Resiko Keselamatan Kerja.....	100
BAB V PENUTUP.....	109
5.1 Kesimpulan.....	109
5.2 Saran.....	111
DAFTAR PUSTAKA	112
LAMPIRAN.....	115

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 PLC AB L24ER	11
Gambar 2.2 Flowmeter Coriolis	12
Gambar 2.3 Gateway EN2PA-R	13
Gambar 2.4 Ball Valve SS Flange	14
Gambar 2.5 FactoryTalk	15
Gambar 2.6 Tangki Caustik	18
Gambar 3.1 Diagram Blok Komponen	25
Gambar 3.2 Permissive <i>Interlock</i> System	27
Gambar 3.3 Flowchart Proses Bongkar	29
Gambar 3.4 Flowchart Proses Transfer	30
Gambar 3.5 Gambar P&ID Sistem	31
Gambar 3.6 Desain Rangkaian Elektrikal	33
Gambar 3.7 Controller Organizer Pada Software Studio5000	39
Gambar 3.8 Proses Main Routine	40
Gambar 3.9 Sub Routine Proses <i>Caustic</i>	45
Gambar 3.10 AOI Parameter Pada LS	47
Gambar 3.11 AOI Parameter Pada Vact Doble	50
Gambar 3.12 AOI Parameter Pada Motor	52
Gambar 3.13 AOI Parameter Untuk Transfer Tank	54
Gambar 3.14 Routine Bongkar Untuk <i>Interlock</i> Rule 1	56
Gambar 3.15 Routine Equipment <i>Rung</i> 0 dan 8 Untuk <i>Interlock</i> Rule 2	56
Gambar 3.16 Routine Bongkar <i>Rung</i> 2 Untuk Rule <i>Interlock</i> 3	57
Gambar 3.17 Routine Transfer <i>Rung</i> 1 Untuk Rule <i>Interlock</i> 4	57
Gambar 3.18 Routine Transfer <i>Rung</i> 3 Untuk Rule <i>Interlock</i> 4	57
Gambar 3.19 Routine Equipment <i>Rung</i> 20 Untuk Rule <i>Interlock</i> 5	58
Gambar 3.20 Routine Equipment <i>Rung</i> 13 Untuk Rule <i>Interlock</i> 5	58
Gambar 3.21 Routine Equipment <i>Rung</i> 29 Untuk Rule <i>Interlock</i> 6	58
Gambar 3.22 Routine Equipment <i>Rung</i> 14 – 16 Untuk Rule <i>Interlock</i> 7	59
Gambar 3.23 Routine Bongkar <i>Rung</i> 0 dan 1	60
Gambar 3.24 Routine Bongkar <i>Rung</i> 2	60
Gambar 3.25 Routine Equipment <i>Rung</i> 0	60
Gambar 3.26 Routine Equipment <i>Rung</i> 4 - 6	61
Gambar 3.27 Routine Equipment <i>Rung</i> 7 - 10	61
Gambar 3.28 Routine Proses Transfer Route 1A	63
Gambar 3.29 Routine Equipment <i>Rung</i> 1 dan 2	64
Gambar 3.30 Routine Equipment <i>Rung</i> 3	64
Gambar 3.31 Routine Equipment <i>Rung</i> 11 - 13	65
Gambar 3.32 Routine Equipment <i>Rung</i> 18 dan 20	65
Gambar 3.33 Routine Equipment <i>Rung</i> 21 - 24	66
Gambar 3.34 Routine Equipment <i>Rung</i> 25 - 28	66
Gambar 3.35 Routine Equipment <i>Rung</i> 29 – 31	67
Gambar 3.36 Arsitektur SCADA	68
Gambar 4.1 Ladder <i>Runninng</i> (Online)	71
Gambar 4.2 Software Terhubung Dengan PLC	71

Gambar 4.3 Controllor Tree Pada PLC.....	72
Gambar 4.4 Tag Yang Digunakan Pada Program	72
Gambar 4.5 Tag Yang Digunakan Pada Program	72
Gambar 4.6 Tag Yang Digunakan Pada Program	73
Gambar 4.7 Tag Yang Digunakan Pada Program	73
Gambar 4.8 IP PLC Terdeteksi Oleh RS Linx Enterprise	74
Gambar 4.9 IP Gateway Profibus Terdeteksi.....	76
Gambar 4.10 Tag Untuk Menghitung Mass Cairan <i>Caustic</i>	77
Gambar 4.11 Fucntion Block Routine <i>Caustic</i> Untuk Menghitung Volume dan Mass <i>Caustic</i>	77
Gambar 4.12 Nilai Flowrate 0 setelah sistem dihentikan	78
Gambar 4.13 Update Pembacaan data Flowrate Kurang dari 1 Detik.....	78
Gambar 4.14 Update Pembacaan data Flowrate Kurang dari 1 Detik.....	79
Gambar 4.15 Pemasangan <i>Solenoid valve</i> dan ACV	81
Gambar 4.16 Valve Close	81
Gambar 4.17 Valve Open.....	82
Gambar 4.18 Dokumentasi Pengambilan Data Flowmeter di Plan	83
Gambar 4.19 Dokumentasi Pengambilan Data Flowmeter di SCADA.....	83
Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Antara SCADA dan Hasil Perhitungan	84
Gambar 4.21 Pompa Bongkar Disable	93
Gambar 4.22 Pompa Enable	93
Gambar 4.23 Enable Cmd <i>Start</i>	94
Gambar 4.24 Valve Outlet Disable	94
Gambar 4.25 Valve Enable	94
Gambar 4.26 <i>Start</i> Proses Bongkar	95
Gambar 4.27 Proses Bongkar Berjalan.....	95
Gambar 4. 28 Operator Mulai <i>Start</i> Transfer	97
Gambar 4. 29 Valve Outlet Tangki dan Valve Transfer Enable dan Terbuka	97
Gambar 4.30 Flowmeter Counting Material Yang Keluar.....	97
Gambar 4.31 Operator Klik <i>Stop</i> Via SCADA	98
Gambar 4.32 Motor Pump Mati Terlebih Dahulu	98
Gambar 4.33 Valve Outlet dan Pump Mati.....	99
Gambar 4.34 Seluruh Aktuator Non-aktif	99
Gambar 4. 35 Flowmeter Berhenti Counting	99

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka.....	7
Tabel 2.2 Spesifikasi PLC	11
Tabel 2.3 Spesifikasi Gateway	13
Tabel 2.4 Analisis Risiko K3	22
Tabel 3.1 Spesifikasi Tangki CST	34
Tabel 3.2 Hasil Perhitungan.....	37
Tabel 3.3 Alat dan Fungsi.....	38
Tabel 3.4 Tag I/O Sub Routine Proses_00_Transfer	40
Tabel 3.5 Tag I/O Subroutine Proses_02_Bongkar.....	41
Tabel 3.6 Tag I/O Subroutine Proses_01_Equipment.....	42
Tabel 3.7 Implementasi Rule Based Interlock.....	55
Tabel 4.1 Hasil pengujian PLC.....	73
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Konektivitas	75
Tabel 4.3 Hasil Pengujian.....	79
Tabel 4.4 Hasil Pengujian.....	80
Tabel 4.5 Data Hasil Pengamatan.....	82
Tabel 4.6 Data Perbandingan Hasil Perhitungan	84
Tabel 4.7 Hasil Respon Sistem Start Bongkar.....	86
Tabel 4.8 Hasil Respon Sistem Start Transfer	88
Tabel 4.9 Hasil Respon Sistem Stop Transfer	89
Tabel 4.10 Hasil Respon Sistem Stop Bongkar	91
Tabel 4.11 Hasil Pengujian Proses Bongkar.....	95
Tabel 4.12 Hasil Pengujian Proses Transfer	100
Tabel 4.13 Identifikasi Potensi Bahaya	101
Tabel 4.14 Hasil Penilaian Risiko Sebelum Implementasi	101
Tabel 4.15 Hasil Penilaian Risiko Setelah Implementasi	102
Tabel 4.16 Nilai Reduksi Risiko.....	103

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Sheet Flowmeter.....	115
Lampiran 2 . Data Sheet PLC Allen Bradly L24ER.....	116
Lampiran 3. Data Sheet Power Supply	117
Lampiran 4. Data Sheet Actuator Control Valve.....	118
Lampiran 5. Proses Pengambilan Data Flowmeter	119
Lampiran 6. Ladder AOI Motor	120
Lampiran 7. Ladder AOI Transfer.....	121
Lampiran 8. Ladder Vact Parameter.....	122
Lampiran 9. Ladder LS_TYPE	123

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Singkatan	Keterangan
ACV	Automatic Control Valve
AOI	Add-On Instruction
CST	<i>Caustic</i> Soda Tank
DI	Digital <i>Input</i>
DO	Digital <i>Output</i>
EN2PA-R	Ethernet to PROFIBUS PA Gateway
FBD	Function Block Diagram
LS	Level Switch / Limit Switch
FT	Flow Transmitter
PLC	Programmable Logic Controller
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PIT	Pit Tank
RS	Risk Score
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SIL	Safety Integrity Level
TON	Timer On Delay

Simbol	Keterangan
A	Luas penampang tangki
h	Tinggi permukaan fluida
m	Massa fluida
Q_{in}	Laju aliran masuk
Q_{out}	Laju aliran keluar
t	Waktu
V	Volume fluida

p	Densitas fluida
Δ	Perubahan suatu besaran
$\frac{dh}{dt}$	Perubahan tinggi fluida terhadap waktu
$\frac{\Delta \text{ Totalizer}}{\Delta t}$	Perhitungan laju aliran berdasarkan perubahan totalizer terhadap waktu
L	Likelihood
S	Severity
RS	Risk Score

INTISARI

IMPLEMENTASI METODE RULE – BASED *INTERLOCK* PADA SISTEM KONTROL DAN MONITORING TANGKI *CAUSTIC* BERBASIS PLC DAN SCADA

Adrian Romadhon Siregar

Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

Proses bongkar dan transfer *caustic* soda pada industri sabun memiliki risiko keselamatan yang tinggi karena masih melibatkan intervensi langsung operator dalam pengoperasian valve serta pemantauan level tangki. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan kesalahan operasional, overfill, serta paparan bahan kimia korosif yang dapat membahayakan keselamatan kerja. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem otomasi tangki *caustic* soda berbasis Programmable Logic Controller (PLC) dan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) dengan menerapkan metode rule-based *interlock* untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan proses. Sistem dikembangkan menggunakan PLC Allen-Bradley CompactLogix 1769-L24ER-QBFC1B yang terintegrasi dengan Automatic Control Valve, Level Switch, dan Flowmeter dan Motor Pump. Logika kendali diimplementasikan menggunakan Add-On Instruction (AOI) untuk mengatur urutan operasi aktuator dan mencegah konflik proses. Pengujian dilakukan melalui verifikasi fungsi logika, urutan operasi sistem, waktu respons, serta analisis penurunan risiko berdasarkan metode Risk Assessment Matrix. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan proses bongkar dan transfer sesuai urutan rule-based *interlock* yang dirancang. Waktu respons sistem pada proses *start* bongkar sebesar 6,12 detik, *start* transfer sebesar 10,12 detik, *stop* transfer sebesar 26,13 detik, dan *stop* bongkar sebesar 9,12 detik. Selain itu, implementasi sistem otomasi berhasil menurunkan tingkat risiko keselamatan kerja sebesar 66,7% dibandingkan kondisi operasional manual berdasarkan hasil penilaian risiko. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan rule-based *interlock* pada sistem PLC dan SCADA mampu meningkatkan keselamatan kerja, mengurangi intervensi operator di area berbahaya, serta menghasilkan sistem kendali proses yang andal dan terintegrasi.

Kata kunci: PLC, SCADA, Rule-Based *Interlock*, *Caustic* Soda, Otomasi Industri, Keselamatan Kerja, Add On Instruction, Ladder Diagram.

ABSTRACT

Implementation of a Rule-Based *Interlock* Method for a PLC- and SCADA-Based *Caustic* Soda Tank Control and Monitoring System

Adrian Romadhon Siregar

Automation Engineering, Vocational School, Diponegoro University

The unloading and transfer processes of *caustic* soda in the soap manufacturing industry pose significant safety risks because they still require direct operator intervention for valve operation and tank level monitoring. These conditions may lead to operational errors, tank overfilling, and exposure to highly corrosive chemicals, thereby increasing occupational safety risks. This study aims to design and implement an automated *caustic* soda tank control system based on a Programmable Logic Controller (PLC) and Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) by applying a rule-based *interlock* method to improve process safety and reliability. The system was developed using an Allen-Bradley CompactLogix 1769-L24ER-QBFC1B PLC, integrated with Automatic Control Valves, Level Switches, Flowmeters, and Motor Pumps. The control logic was implemented using Add-On Instructions (AOIs) to manage actuator operating sequences and prevent process conflicts. System performance was evaluated through logic verification, operational sequence testing, system response time analysis, and occupational risk reduction assessment based on the Risk Assessment Matrix method. The test results demonstrated that the system successfully executed the unloading and transfer processes according to the designed rule-based *interlock* sequence. The measured response times were 6.12 seconds for unloading *start-up*, 10.12 seconds for transfer *start-up*, 26.13 seconds for transfer shutdown, and 9.12 seconds for unloading shutdown. Furthermore, the implementation of the automation system reduced occupational safety risks by 66.7% compared with the previous manual operating procedure based on the risk assessment results. These findings indicate that the implementation of a rule-based *interlock* on the PLC and SCADA system effectively enhances occupational safety, minimizes direct operator intervention in hazardous areas, and provides a reliable and integrated process control system.

Keywords: PLC, SCADA, Rule-Based *Interlock*, *Caustic* Soda, Industrial Automation, Occupational Safety, Add-On Instruction, Ladder Diagram.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri *Fast-Moving Consumer Goods* (FMCG), khususnya sektor produksi sabun, merupakan salah satu sektor manufaktur dengan kebutuhan bahan kimia yang sangat tinggi. *Caustic soda* (NaOH) atau natrium hidroksida merupakan bahan baku utama dalam proses saponifikasi, yakni reaksi kimia antara trigliserida dari lemak atau minyak dengan basa kuat yang menghasilkan sabun dan gliserol [1]. Pasar sabun global bernilai USD 34,6 miliar pada tahun 2023 dengan pertumbuhan tahunan sebesar 4,8%, dan seluruh produksi ini bergantung pada NaOH sebagai agen reaksi utamanya [2]. Pada skala industri, *caustic soda* umumnya digunakan dalam bentuk larutan cair berkonsentrasi 49–50%, yang memerlukan sistem penyimpanan bertangki khusus berkapasitas besar untuk menjamin ketersediaan pasokan bahan baku secara berkelanjutan [2]. Di balik perannya yang vital, *caustic soda* merupakan senyawa yang sangat korosif dengan pH mendekati 14, sehingga dapat menyebabkan luka bakar kimiawi parah pada kulit, mata, dan saluran pernapasan apabila terjadi paparan langsung [3]. Sifat korosifnya juga berpotensi merusak infrastruktur perpipaan dan sistem kontrol yang tidak kompatibel. Data dari Tennessee Department of Health menunjukkan bahwa sekitar 75% insiden pelepasan sodium hidroksida di lingkungan industri disebabkan oleh *human error* [4].

Kondisi ini menegaskan bahwa faktor manusia adalah titik kerentanan utama dalam operasional tangki *caustic soda*, dan bahwa sistem pengelolaan yang lebih terstruktur dan terautomasi merupakan kebutuhan yang tidak dapat ditawar.

Pada fasilitas produksi sabun yang menjadi objek penelitian ini, terdapat dua proses utama pemindahan *caustic soda*, yaitu proses bongkar dan proses transfer. Proses bongkar merupakan pemindahan cairan dari tangki truk menuju tangki penyimpanan utama melalui PIT penampung sementara, sedangkan proses transfer merupakan pendistribusian *caustic soda* dari tangki penyimpanan ke tangki-tangki di area *plant* produksi. Kedua proses tersebut saat ini masih dijalankan secara manual, di mana operator harus

mengoperasikan katup dan pompa secara langsung di lapangan. Pemantauan level tangki dilakukan secara visual tanpa instrumen terstandarisasi, sementara pencatatan data stok masih dilakukan secara konvensional tanpa integrasi sistem digital. Kondisi ini meningkatkan risiko kecelakaan kerja akibat paparan *caustic soda*, potensi *overflow*, kesalahan transfer antar tangki, serta menyulitkan investigasi ketika terjadi penyimpangan proses.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan implementasi sistem otomasi berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) yang diintegrasikan dengan SCADA, sensor Level Switch (LS) pada PIT, *Automatic Control Valve* (ACV), serta *Coriolis Mass Flow Meter* untuk monitoring aliran. Level Switch (LS) berfungsi mendeteksi kondisi level pada titik kritis PIT yakni kondisi High dan Low dan mengirimkan sinyal diskrit ke PLC sebagai salah satu syarat *permissive interlock* [5]. Automatic Control Valve (ACV) menggantikan katup manual dengan aktuator yang dikendalikan operator melalui SCADA, sehingga pengaturan aliran *caustic soda* dapat dilakukan secara terkontrol tanpa kehadiran fisik operator di area tangki [6]. Coriolis Mass Flow Meter digunakan untuk mengukur laju aliran massa secara akurat pada jalur masuk tangki, yang nilainya ditampilkan secara *real-time* di SCADA sebagai referensi monitoring operator [7]. Logika pengendalian sistem ini dirancang menggunakan metode *rule-based permissive interlock*, di mana PLC mendefinisikan serangkaian aturan kondisional berlapis yang harus dipenuhi secara bersamaan sebelum operator dapat mengeksekusi perintah *Start* melalui SCADA misalnya proses bongkar hanya dapat dijalankan apabila LS PIT mendeteksi kondisi High, ACV inlet dalam kondisi terbuka, dan pompa telah di-*enable* oleh operator. Pendekatan ini menempatkan PLC sebagai penjaga prosedur operasional, sementara operator tetap menjadi pengambil keputusan utama melalui antarmuka SCADA.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkonfirmasi efektivitas arsitektur otomasi ini. Das et al. (2013) mengimplementasikan sistem otomasi level tangki berbasis PLC Siemens S7-300 dengan SCADA/HMI menggunakan WinCC, dan membuktikan bahwa sistem mampu mengendalikan level tangki secara otomatis sekaligus mencegah kondisi

overflowing melalui mekanisme alarm terintegrasi [8]. Min et al. (2019) mengembangkan sistem kontrol level seri multi-tangki berbasis PLC-HMI yang berhasil mengotomasi pengisian tangki dan menutup katup *inlet* secara otomatis ketika level telah mencapai batas yang ditetapkan [9]. Lebih spesifik, penelitian pada sistem distribusi cairan berbasis PLC dan SCADA memvalidasi bahwa konsep *permissive interlock* berbasis operator di mana sistem memblokir perintah *Start* apabila syarat proses belum terpenuhi mampu mencegah kesalahan operasional secara efektif sekaligus tetap memberikan kendali penuh kepada operator melalui antarmuka terpusat [10].

Berdasarkan uraian di atas, terdapat urgensi yang nyata untuk melakukan digitalisasi dan otomatisasi sistem tangki *caustic soda* pada fasilitas produksi sabun yang menjadi objek penelitian ini. Penelitian ini mengusulkan implementasi metode *rule-based permissive interlock* pada sistem kontrol dan monitoring tangki *caustic soda* berbasis PLC dan SCADA, sebagai pendekatan yang terstruktur untuk menjamin keamanan prosedur operasional secara sistematis. Implementasi sistem ini diharapkan mampu mengeliminasi risiko keselamatan kerja akibat operasi manual, meningkatkan akurasi monitoring aliran dan level, serta menyediakan basis data operasional yang terstruktur sebagai fondasi pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*) di era industri modern.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana mengembangkan sistem otomasi tangki *caustic soda* berbasis PLC dan SCADA yang terintegrasi dengan *Level Switch*, *Automatic Control Valve*, dan *Flow Transmitter* pada fasilitas produksi sabun?
2. Bagaimana mengimplementasikan metode *rule-based interlock* pada PLC sebagai logika kendali antar tangki?
3. Bagaimana penerapan sistem kendali otomatis berbasis *rule-based interlock* dapat mengurangi risiko keselamatan kerja akibat intervensi fisik operator di area tangki *caustic soda*?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

1. Merancang sistem otomasi tangki *caustic soda* berbasis PLC dan SCADA yang terintegrasi dengan *Level Switch*, *Automatic Control Valve*, dan *Flow Transmitter*.
2. Mengimplementasikan metode *rule-based interlock* pada PLC sebagai logika kendali otomatis antar tangki.
3. Mengurangi risiko kecelakaan kerja dengan mengeliminasi intervensi fisik operator di area tangki *caustic soda* melalui sistem kendali otomatis.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

1. Meningkatkan pemahaman dan kompetensi praktis dalam perancangan sistem kontrol otomasi industri berbasis PLC dan SCADA.
2. Mengembangkan kemampuan dalam mengimplementasikan metode *rule-based interlock* sebagai solusi nyata terhadap permasalahan keselamatan dan efisiensi operasional di lingkungan industri.
3. Melatih kemampuan analisis dan pemecahan masalah (problem solving) dalam konteks digitalisasi dan otomatisasi proses industri FMCG secara nyata.

1.5 Batasan Masalah

1. Lingkup Sistem Kontrol Penelitian ini hanya mencakup perancangan dan implementasi logika *rule-based permissive interlock* pada PLC untuk proses bongkar dan transfer *caustic soda*. Tidak mencakup perancangan sistem kontrol untuk fluida atau bahan kimia lain di luar *caustic soda*.
2. Instrumen yang Digunakan Sistem hanya menggunakan instrumen yang telah terpasang sesuai P&ID, yaitu *Level Switch* (LS) pada PIT, *Automatic Control Valve* (ACV), dan *Coriolis Mass Flow Meter*. Tidak dilakukan penambahan instrumen baru di luar yang telah direncanakan.
3. Antarmuka Operator Monitoring dan pengendalian sistem hanya dilakukan melalui antarmuka SCADA yang dirancang. Tidak mencakup pengembangan aplikasi *mobile*, *web-based dashboard*, maupun integrasi dengan platform *IoT* seperti Node-RED, ThingsBoard, atau

sejenisnya karena pengembangan tersebut berada di luar lingkup tanggung jawab divisi.

4. Jenis *Interlock Interlock* yang dirancang bersifat *permissive* hanya memblokir atau mengizinkan aksi operator, bukan *safety interlock* otomatis berstandar SIL (Safety Integrity Level) yang memerlukan sertifikasi.
5. Evaluasi Sistem Pengujian dan evaluasi sistem dilakukan dalam kondisi operasional normal.
6. Penelitian ini tidak melakukan analisis akurasi dinamis flowmeter secara detail karena sistem SCADA belum dilengkapi fitur *logging* data *flowrate* dan *timestamp* per detik, sehingga pengambilan data dilakukan secara manual berdasarkan interval waktu dalam satuan menit.

1.6 Sistematika Tugas Akhir

Penyusunan laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika penulisan laporan yang terdiri atas beberapa bab dan lampiran sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam bab ini membahas tentang latar belakang masalah, tujuan tugas akhir, perumusan masalah, tujuan tugas akhir, manfaat tugas akhir, pembatasan masalah, dan sistematika tugas akhir.

BAB II DASAR TEORI

Dalam bab ini membahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan masing-masing bagian yang digunakan dalam Implementasi *Metode Rule Based Interlock* Pada Sistem Kontrol dan Monitoring

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini membahas tentang rancang bangun alat yang terdiri dari diagram blok sistem, diagram alir sistem, spesifikasi, dan fungsi alat.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Dalam bab ini membahas tentang hasil pengujian dan analisa data yang diperoleh dari Implementasi *Metode Rule Based Interlock* Pada Sistem Kontrol dan Monitoring.

BAB V PENUTUP

Dalam bab ini memaparkan kesimpulan yang didapat dari hasil pengujian yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA**LAMPIRAN**

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka ini mencakup beberapa referensi yang telah dievaluasi terkait Implementasi *Rule Base Interlock* untuk otomatisasi sistem transfer bahan baku cair *coustic* dalam rangka pembuatan proyek tugas akhir. Hasil dari tinjauan pustaka dapat dilihat pada **Tabel 2.1** berikut ini.

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka

No	Judul Penelitian	Penulis dan Tahun	Persamaan	Perbedaan
1	<i>Automation of Tank Level Using PLC and Establishment of HMI by SCADA</i>	Das, Dutta, Sarkar & Samanta (2013)	Menggunakan PLC sebagai pengendali utama dengan logika <i>interlock</i> berbasis kondisi level tangki; sistem memblokir operasi pompa apabila kondisi level tidak terpenuhi; menggunakan SCADA/HMI sebagai antarmuka monitoring	<i>Interlock</i> bersifat otomatis penuh PLC mengeksekusi aksi aktuator langsung tanpa konfirmasi operator; fluida yang ditangani adalah air biasa, bukan bahan kimia berbahaya; tidak terdapat logika <i>mutual exclusion</i> antar jalur transfer
2	<i>Automation of Series Tank Level Control</i>	Min, Moe & Mon (2019)	Mengimplementasikan kontrol level pada konfigurasi	Sistem sepenuhnya otomatis tanpa

	<i>Using PLC and HMI</i>		multi-tangki berbasis PLC-HMI; menggunakan <i>level switch</i> sebagai sensor deteksi level High dan Low; sistem mencegah kondisi <i>overflow</i> dan <i>dry run</i> pompa secara terprogram	peran aktif operator dalam mengeksekusi proses; tidak menggunakan SCADA sebagai pusat kendali terpusat; tidak terdapat fitur <i>pop-up</i> konfirmasi <i>Start/Stop</i> maupun <i>mutual exclusion</i> antar jalur
3	<i>Sphere Tank Safety Interlock Using PLC</i>	Giraldo et al.	Menggunakan PLC sebagai pengendali <i>interlock</i> berbasis aturan kondisional (IF-THEN) pada sistem tangki penyimpanan bahan berbahaya; sistem memblokir operasi valve apabila kondisi prasyarat tidak terpenuhi; terdapat integrasi alarm pada HMI	<i>Interlock</i> dirancang sebagai safety <i>interlock</i> otomatis untuk kondisi darurat (kebocoran gas, suhu berlebih); fluida yang ditangani adalah LPG, bukan <i>caustic soda</i> ; eksekusi aktuator dilakukan PLC secara langsung tanpa

				keterlibatan operator
4	<i>Liquid Level Monitoring and Flow Based Liquid Distribution System Using PLC and SCADA[11]</i>	Ashok & Murthy (2019)	operator harus mengkonfirmasi operasi melalui tombol <i>Confirm</i> dan <i>Start</i> di SCADA sebelum proses transfer dijalankan; sistem menampilkan <i>interlock warning screen</i> apabila syarat belum terpenuhi; menggunakan <i>level switch</i> dan <i>flow transmitter</i> sebagai syarat <i>permissive interlock</i> ; terdapat pemilihan tangki tujuan via SCADA	Sistem menggunakan flow meter sebagai pemicu <i>stop</i> otomatis berdasarkan volume yang ditentukan; tidak terdapat logika <i>mutual exclusion</i> antar jalur; fluida yang ditangani adalah pelarut farmasi, bukan <i>caustic soda</i> pada industri FMCG
5	PLC-SCADA Automation of Inlet Wastewater Treatment Processes:	Mansouri, Feham & Boucheca m (2024)	Mengintegrasikan PLC Siemens S7-300 dengan SCADA untuk pengendalian pompa dan valve	Sistem dirancang untuk proses pengolahan air limbah yang bersifat kontinu, bukan proses

Design, Implementation, and Evaluation [12]	pada proses fluida industri; logika PLC memverifikasi status instrumen lapangan sebelum mengizinkan operasi berlanjut; menyediakan monitoring <i>real- time</i> level dan aliran melalui antarmuka SCADA	batch transfer bahan kimia; tidak terdapat konsep permissive berbasis konfirmasi operator; sistem lebih bersifat otomatis penuh dengan intervensi operator yang minimal
--	--	--

2.2 Programmable Logic Controller (PLC) Allen-Bradley L24ER

Programmable Logic Controller (PLC) merupakan perangkat kontrol digital yang digunakan dalam sistem otomasi industri untuk mengendalikan proses secara otomatis berdasarkan logika yang telah diprogram. PLC mampu menerima sinyal *input* dari sensor, mengolahnya sesuai program, dan menghasilkan *output* untuk mengendalikan aktuator seperti valve, motor, dan pompa. Dalam penelitian ini, PLC digunakan sebagai pengendali utama dalam sistem monitoring dan kontrol tangki *caustic*, khususnya untuk mengimplementasikan logika kontrol level dan sistem *interlock*.

PLC yang digunakan adalah Allen-Bradley L24ER yang termasuk dalam keluarga CompactLogix dari Rockwell Automation. PLC ini dilengkapi dengan fitur embedded Ethernet yang memungkinkan komunikasi dengan sistem HMI atau SCADA melalui protokol industri seperti EtherNet/IP. Selain itu, PLC ini dirancang untuk aplikasi otomasi skala kecil hingga menengah dengan performa yang cukup tinggi dan fleksibilitas dalam pengembangan sistem. Secara spesifikasi, PLC L24ER memiliki beberapa karakteristik utama, antara lain dapat dilihat pada **Table 2.2**.

Tabel 2.2 Spesifikasi PLC

Charactericric	L24ER-QB1B
Available user memory	0.75 MB
Memory card	1784-SD1 (1 GB), shipped with controller 1784-SD2 (2 GB)
Communication ports	2 EtherNet/IP 1 USB
Embedded I/O	16 sinking/sourcing 24V DC digital <i>input</i> points 16 sourcing 24V DC digital <i>output</i> points
Embedded power supply	24V DC

Spesifikasi tersebut memungkinkan PLC L24ER untuk menangani proses kontrol secara *real-time*, termasuk pengolahan data sensor level dan eksekusi logika *interlock* dengan respons yang cepat dan andal. PLC Allen Bradley L24ER dapat dilihat pada **Gambar 2.1** berikut.

**Gambar 2.1** PLC AB L24ER

Pemrograman PLC Allen-Bradley L24ER dilakukan menggunakan software Studio 5000 Logix Designer dengan bahasa *Ladder Diagram* (LD). Bahasa ini banyak digunakan karena menyerupai rangkaian listrik konvensional sehingga memudahkan dalam perancangan dan analisis logika

kontrol. Dalam penelitian ini, *ladder diagram* digunakan untuk mengimplementasikan kontrol level berbasis on-off, logika *interlock* berbasis aturan (*rule-based*), serta urutan proses (*sequence control*) dalam sistem transfer cairan *caustic*.

2.3 Proline Promas E 300 Flowmeter

Flowmeter merupakan instrumen yang digunakan untuk mengukur laju aliran fluida dalam suatu sistem perpipaan. Pada penelitian ini, digunakan flowmeter tipe Coriolis yaitu Proline Promass E 300 dari Endress+Hauser yang berfungsi untuk mengukur laju aliran massa cairan *caustic* secara akurat. Pemilihan flowmeter tipe Coriolis didasarkan pada kemampuannya dalam mengukur aliran massa secara langsung tanpa dipengaruhi secara signifikan oleh perubahan sifat fluida seperti densitas, viskositas, dan temperatur.

Flowmeter Coriolis bekerja berdasarkan prinsip gaya Coriolis, dimana fluida yang mengalir melalui pipa sensor akan menyebabkan getaran pada tabung pengukur. Ketika fluida bergerak, terjadi pergeseran fase getaran antara sisi inlet dan outlet yang sebanding dengan laju aliran massa fluida. Selain itu, sensor ini juga mampu mengukur densitas fluida berdasarkan perubahan frekuensi getaran, sehingga memberikan informasi tambahan yang penting dalam proses industri. Flowmeter Coriolis dapat dilihat pada **Gambar 2.2** berikut.



Gambar 2.2 Flowmeter Coriolis

Dalam sistem yang dirancang, flowmeter ini berfungsi sebagai sensor utama untuk memonitor laju aliran selama proses pengisian dan transfer antar tangki. Data yang dihasilkan oleh flowmeter akan dikirim ke PLC untuk

diproses lebih lanjut, serta ditampilkan pada sistem SCADA sebagai bagian dari monitoring real-time dan data logging.

2.4 Gateway EN2PA-R

Gateway merupakan perangkat komunikasi yang berfungsi untuk menghubungkan dua sistem dengan protokol yang berbeda agar dapat saling bertukar data. Dalam penelitian ini, digunakan gateway EN2PA-R yang berfungsi sebagai penghubung antara flowmeter Proline Promass E 300 dengan sistem PLC berbasis EtherNet/IP.

Gateway EN2PA-R memungkinkan integrasi antara perangkat lapangan yang menggunakan protokol komunikasi tertentu dengan PLC, sehingga data pengukuran seperti laju aliran, densitas, dan temperatur dapat dikirim dan diproses secara real-time. Dengan adanya gateway ini, sistem menjadi lebih fleksibel dalam mengintegrasikan berbagai perangkat industri yang memiliki perbedaan protokol komunikasi. Pada **Gambar 2.3** merupakan gateway yang digunakan.



Gambar 2.3 Gateway EN2PA-R

Dalam implementasinya, gateway ini berperan penting dalam memastikan data dari flowmeter dapat digunakan oleh PLC untuk kebutuhan monitoring, kontrol, serta mendukung sistem *interlock* dalam proses distribusi cairan *caustic*. Pada **Tabel 2.3** disajikan spesifikasi gateway sebagai berikut:

Tabel 2.3 Spesifikasi Gateway

Parameter	Spesifikasi
Fungsi Utama	Gateway komunikasi industri
Protokol Komunikasi Utama	EtherNet/IP

Protokol Sisi Field Device	PROFIBUS PA
Interface Ethernet	RJ45, 10/100 Mbps
Jumlah port Ethernet	1 port
Supply tegangan	24 VDC

2.5 Ball Valve SS Flange 3Inch

Ball valve merupakan katup yang digunakan untuk mengatur aliran fluida dengan mekanisme buka-tutup menggunakan bola (*ball*) yang diputar sebesar 90° (*quarter turn*). Pada penelitian ini digunakan ball valve berbahan stainless steel (SS) ukuran 3 inch dengan koneksi flange, yang dilengkapi dengan aktuator pneumatik, limit switch (LS), dan dua buah *solenoid valve* (2SOL) sebagai sistem penggerak dan umpan balik posisi valve.

Penggunaan material stainless steel (SS304/SS316) bertujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, mengingat fluida yang digunakan adalah *caustic* yang bersifat korosif. Valve ini tidak dioperasikan secara manual, melainkan secara otomatis menggunakan aktuator yang dikendalikan oleh PLC. Pada **Gambar 2.4** diperlihatkan gambar dari Ball Valve SS Flange Pneumatic



Gambar 2.4 Ball Valve SS Flange

Aktuator pneumatik berfungsi untuk menggerakkan valve membuka dan menutup dengan bantuan tekanan udara. Pergerakan aktuator dikontrol oleh

solenoid valve yang menerima sinyal dari PLC. Dalam konfigurasi ini digunakan dua *solenoid valve* (2SOL), yang masing-masing berfungsi untuk mengatur arah aliran udara sehingga aktuator dapat bergerak membuka (*open*) dan menutup (*close*) secara terkontrol.

Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan *limit switch* (LS) yang berfungsi sebagai umpan balik posisi valve. *Limit switch* akan memberikan sinyal ke PLC untuk menunjukkan apakah valve berada pada posisi terbuka penuh (*fully open*) atau tertutup penuh (*fully close*). Informasi ini sangat penting dalam implementasi sistem *interlock* untuk memastikan bahwa proses hanya berjalan jika kondisi valve sesuai dengan yang diharapkan.

2.6 FactoryTalk View sebagai Sistem HMI/SCADA

FactoryTalk View merupakan perangkat lunak HMI/SCADA yang digunakan untuk melakukan monitoring, pengendalian, serta akuisisi data dalam sistem otomasi industri. Software ini dikembangkan oleh Rockwell Automation dan dirancang untuk terintegrasi dengan sistem PLC, khususnya keluarga Allen-Bradley. Dalam penelitian ini, FactoryTalk View digunakan sebagai antarmuka utama antara operator dan sistem kontrol tangki *caustic*, sehingga memungkinkan operator untuk memantau kondisi proses secara *real-time* sekaligus melakukan pengendalian terhadap peralatan di lapangan. Berikut tampilan *Software* FactoryTalk pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 FactoryTalk

FactoryTalk View memiliki dua jenis utama, yaitu FactoryTalk View *Machine Edition* (ME) yang digunakan untuk aplikasi berbasis panel HMI, serta FactoryTalk View *Site Edition* (SE) yang digunakan untuk sistem SCADA berbasis jaringan dengan cakupan lebih luas. Pemilihan jenis sistem disesuaikan dengan kebutuhan penelitian, dimana fungsi utama yang

dimanfaatkan meliputi monitoring, kontrol, serta pencatatan data proses. Dalam implementasinya, software ini menampilkan kondisi sistem dalam bentuk visualisasi berupa mimic diagram yang merepresentasikan alur proses secara nyata, sehingga memudahkan operator dalam memahami kondisi operasi.

Dalam sistem yang dirancang, FactoryTalk View berfungsi untuk menampilkan parameter proses seperti level tangki, laju aliran fluida, serta status valve dan pompa. Selain itu, sistem ini juga memungkinkan operator untuk memberikan perintah kontrol seperti membuka atau menutup valve, serta mengaktifkan atau menghentikan proses melalui interface yang tersedia. Komunikasi antara FactoryTalk View dan PLC dilakukan melalui jaringan industri menggunakan protokol EtherNet/IP, dimana PLC berperan sebagai pengolah data utama dan FactoryTalk View sebagai media visualisasi serta interaksi dengan operator.

Selain fungsi monitoring dan kontrol, FactoryTalk View juga dilengkapi dengan fitur alarm dan data logging yang sangat penting dalam sistem industri. Alarm digunakan untuk memberikan peringatan apabila terjadi kondisi abnormal seperti level tinggi, level rendah, atau kegagalan sistem, sehingga operator dapat segera mengambil tindakan yang diperlukan. Sementara itu, data logging memungkinkan penyimpanan data historis seperti perubahan level tangki dan laju aliran terhadap waktu, yang kemudian dapat digunakan untuk analisis performa sistem.

Dalam penelitian ini, peran FactoryTalk View tidak hanya terbatas sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai bagian dari sistem evaluasi. Data yang diperoleh dari sistem SCADA digunakan untuk menganalisis respon sistem terhadap perubahan kondisi, mengevaluasi efektivitas logika *interlock*, serta menilai keandalan sistem dalam mencegah terjadinya kondisi abnormal. Dengan demikian, penggunaan FactoryTalk View mendukung terciptanya sistem kontrol yang tidak hanya otomatis, tetapi juga terintegrasi dan berbasis data, sehingga mampu meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional pada sistem tangki *caustic*.

2.7 Caustic Soda

Natrium hidroksida atau yang secara umum dikenal dengan istilah *caustic soda* adalah senyawa anorganik dengan formula kimia NaOH yang tergolong sebagai basa kuat. Secara fisik, senyawa ini dapat dijumpai dalam berbagai bentuk, mulai dari padatan berwarna putih hingga tidak berwarna dalam bentuk larutan, dan bersifat tidak berbau [13]. Dalam konteks industri modern, *caustic soda* merupakan salah satu bahan kimia dengan tingkat konsumsi tertinggi secara global, mengingat perannya yang sangat luas di berbagai sektor produksi. Pada industri *Fast-Moving Consumer Goods* (FMCG) khususnya produksi sabun, NaOH menjadi komponen tidak tergantikan dalam proses saponifikasi, yakni reaksi kimia yang mengubah lemak dan minyak menjadi sabun dan gliserol sebagai produk sampingan [13].

Dari sisi karakteristik kimiawi, *caustic soda* memiliki sifat higroskopis yang tinggi, artinya senyawa ini dengan mudah menyerap kelembaban dan karbon dioksida dari udara sehingga memerlukan sistem penyimpanan yang tertutup rapat [13]. Kelarutan NaOH dalam air sangat tinggi dan proses pelarutannya bersifat eksotermis, menghasilkan panas yang cukup signifikan. Selain itu, *caustic soda* bereaksi secara reaktif dengan berbagai zat lain, termasuk asam organik, asam anorganik, agen pengoksidasi, serta sejumlah logam seperti aluminium, seng, dan tembaga, yang dapat menghasilkan gas hidrogen yang mudah terbakar sebagai produk samping reaksi. Karakteristik reaktivitas tinggi ini menjadikan penanganan *caustic soda* memerlukan perhatian khusus terhadap material peralatan yang bersentuhan langsung dengannya, termasuk sistem perpipaan dan tangki penyimpanan. Pada **Gambar 2.6** merupakan tangka yang digunakan pada proses pemindahan material.



Gambar 2.6 Tangki Caustik

Aspek keselamatan kerja merupakan dimensi yang tidak dapat dipisahkan dari operasional *caustic soda* di lingkungan industri. Senyawa ini diklasifikasikan sebagai bahan yang sangat korosif dan berbahaya bagi jaringan tubuh manusia. Paparan pada kulit dapat menimbulkan iritasi hingga luka bakar kimiawi yang serius, sementara kontak pada mata berpotensi menyebabkan kerusakan permanen termasuk kebutaan [3]. Dalam hal paparan melalui inhalasi, uap atau debu NaOH dapat mengakibatkan iritasi parah pada saluran pernapasan bagian atas. Batas paparan yang diizinkan di lingkungan kerja ditetapkan pada nilai yang sangat rendah, yakni 2 mg/m^3 sebagai nilai ambang batas yang tidak boleh dilampaui pada waktu tertentu (*ceiling value*), menunjukkan betapa seriusnya potensi bahaya senyawa ini bagi kesehatan pekerja [3].

Dari perspektif data insiden industri, *caustic soda* tercatat sebagai salah satu dari sepuluh bahan kimia yang paling sering terlibat dalam kejadian tumpahan atau pelepasan tidak terkendali. Investigasi terhadap insiden-insiden tersebut mengungkapkan bahwa mayoritas besar kejadian disebabkan oleh

kelalaian atau kesalahan manusia, dan proporsi signifikan di antaranya terjadi di area penyimpanan atau selama proses pemindahan antar wadah [14]. Temuan ini secara langsung menggarisbawahi kerentanan yang melekat pada sistem pengelolaan manual, di mana keterlibatan fisik operator secara berulang dalam proses pemindahan bahan kimia berbahaya membuka peluang terjadinya kesalahan yang berujung pada insiden. Kondisi inilah yang menjadi salah satu justifikasi utama perlunya sistem otomasi berbasis *permissive interlock* pada pengelolaan tangki *caustic soda*, sebagaimana yang diusulkan dalam penelitian ini.

2.8 Model Dinamika Tangki

Model dinamika tangki merupakan representasi matematis yang menggambarkan perilaku perubahan level fluida di dalam tangki sebagai fungsi dari laju aliran masuk dan keluar terhadap waktu. Model ini diturunkan dari prinsip dasar kesetimbangan massa (*mass balance*), yang menyatakan bahwa laju perubahan massa fluida di dalam tangki sama dengan selisih antara massa yang masuk dan massa yang keluar [22]. Dalam konteks tangki *caustic soda* pada sistem ini, model dinamika tangki menjadi landasan matematis untuk memahami karakteristik pengisian dan pengosongan tangki, sekaligus menjadi dasar penentuan titik-titik *setpoint* pada logika *rule-based interlock*. Persamaan dasar model dinamika tangki dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A} \quad \text{Persamaan 2.8. 1}$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa laju perubahan level tangki berbanding lurus dengan selisih aliran masuk dan keluar, serta berbanding terbalik dengan luas penampang tangki [22]. Dalam kondisi pengisian tangki di mana tidak ada aliran keluar ($Q_{out}=0$), persamaan disederhanakan menjadi:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_{in}}{A} \quad \text{Persamaan 2.8. 2}$$

yang berarti level tangki naik secara linier terhadap waktu selama laju aliran masuk konstan. Pada penelitian ini, model dinamika tangki digunakan untuk menghitung laju perubahan level tangki *caustic soda* berdasarkan spesifikasi dimensi tangki dan kapasitas pompa transfer yang tersedia.

Pada kondisi tertentu, volume cairan di dalam tangki dinyatakan sebagai:

$$V = A \times h \quad \textbf{Persamaan 2.8. 3}$$

Sedangkan hubungan antara massa, densitas, dan volume Adalah

$$m = \rho \times V \quad \textbf{Persamaan 2.8. 4}$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2.8.3) ke dalam Persamaan (2.8.4) diperoleh:

$$m = \rho \times A \times h \quad \textbf{Persamaan 2.8. 5}$$

Sehingga tinggi cairan di dalam tangki dapat dinyatakan sebagai

$$h = \frac{m}{(\rho \times A)} \quad \textbf{Persamaan 2.8. 6}$$

Keterangan:

h = adalah tinggi level fluida dalam tangki (m)

t = adalah waktu (s)

Q_{in} = adalah laju aliran masuk (m^3/s)

Q_{out} = adalah laju aliran keluar (m^3/s)

A = adalah luas penampang tangki (m^2)

Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung batas level cairan di dalam tangki berdasarkan massa larutan *caustic soda* yang tersimpan. Nilai tinggi cairan hasil perhitungan selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam menentukan batas level minimum, level operasi, dan level maksimum pada tangki.

2.9 Perhitungan Laju Alir Berdasarkan Totalizer

Laju alir (flowrate) merupakan besaran yang menyatakan jumlah massa atau volume fluida yang mengalir melalui suatu penampang dalam satuan waktu. Berdasarkan mekanika fluida, laju alir didefinisikan sebagai perubahan massa atau volume terhadap selang waktu tertentu. Pada sistem pengukuran menggunakan flowmeter, selain menampilkan nilai instantaneous flowrate, instrumen juga menyediakan nilai totalizer yang menunjukkan akumulasi massa atau volume fluida yang telah mengalir selama periode operasi. Oleh karena itu, nilai flowrate rata-rata dapat dihitung dari perubahan nilai totalizer

terhadap selang waktu pengamatan [25], [26]. Persamaan perhitungan flowrate rata-rata dinyatakan sebagai berikut.

$$Q = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \text{Persamaan 2.9.1}$$

Dengan:

Q = Laju alir rata-rata (kg/jam atau m³/jam)

ΔT = perubahan nilai totalizer (kg atau m³)

Δt = selang waktu pengamatan (jam)

Persamaan tersebut digunakan untuk memperoleh nilai *flowrate* rata-rata berdasarkan data totalizer selama interval pengamatan. Pada penelitian ini, persamaan digunakan sebagai metode verifikasi terhadap nilai *flowrate* yang ditampilkan pada sistem SCADA dengan membandingkan hasil perhitungan berdasarkan perubahan totalizer terhadap nilai *flowrate* yang dibaca secara langsung oleh *flowmeter* [2].

2.10 Rule Based Interlock System pada Industri

Rule-based interlock system merupakan metode kendali keselamatan yang bekerja berdasarkan serangkaian aturan kondisional (*if-then rules*) yang telah didefinisikan sebelumnya, di mana sistem secara otomatis mengeksekusi tindakan protektif apabila kondisi proses menyimpang dari parameter yang diizinkan [20]. Dalam konteks sistem kontrol berbasis PLC, sinyal masukan dari lapangan akan dipantau dan secara *real time* mengaktifkan atau menonaktifkan aktuator agar terhindari dari kondisi bahaya [21]. Pendekatan berbasis aturan ini menjadikan sistem kontrol mampu beroperasi secara deterministik dan konsisten, karena setiap respons sistem terhadap kondisi proses tertentu telah terdefinisi secara eksplisit tanpa bergantung pada penilaian subjektif operator.

Secara umum terdapat dua klasifikasi dari *rule based interlock* dalam konteks industri, yaitu *process interlock* dan *safety interlock*. *Process interlock* berfungsi menjaga kelangsungan operasi dengan mencegah urutan aksi yang tidak sesuai prosedur, misalnya memastikan pompa hanya dapat beroperasi apabila katup inlet dalam kondisi terbuka. Sementara itu, *safety interlock* dirancang untuk melindungi personel, peralatan, dan lingkungan dari kondisi berbahaya, seperti menutup seluruh katup secara otomatis apabila terdeteksi

kebocoran atau level tangki melampaui batas aman [18]. Verifikasi logika *interlock* pada sistem PLC telah menjadi praktik standar dalam perancangan *Safety Instrumented System* (SIS) sebagaimana diatur dalam standar internasional IEC 61511, yang mewajibkan setiap lapisan proteksi independen (Independent Protection Layer/IPL) bekerja secara andal dan terverifikasi [19].

Implementasi rule-based *interlock* pada sistem tangki fluida industri telah dibuktikan efektivitasnya melalui sejumlah penelitian. Giraldo et al. memvalidasi bahwa sistem *interlock* berbasis PLC pada tangki bola (sphere tank) mampu mendeteksi kondisi overpressure dan overflow secara otomatis serta mengeksekusi tindakan pengamanan tanpa intervensi operator [16]. Dalam konteks tangki *caustic* soda pada fasilitas produksi sabun, penerapan rule-based *interlock* menjadi sangat relevan mengingat sifat korosif fluida yang ditangani, di mana satu kesalahan operasional dapat mengakibatkan kerusakan peralatan maupun paparan bahan kimia berbahaya bagi operator.

2.11 Analisis Resiko Keselamatan Kerja

Analisis risiko keselamatan kerja dilakukan untuk mengukur sejauh mana implementasi sistem rule-based permissive *interlock* berbasis PLC dan SCADA dapat berkontribusi dalam menurunkan tingkat risiko yang dihadapi operator pada operasional tangki *caustic* soda. Metode yang digunakan adalah risk matrix berdasarkan standar AS/NZS 4360 yang mengevaluasi risiko berdasarkan dua parameter utama yaitu Likelihood (kemungkinan kejadian) dan Severity (tingkat keparahan dampak) [x]. Hasil perkalian kedua parameter tersebut menghasilkan Risk Score yang merepresentasikan tingkat risiko:

$$\text{Risk Score} = \text{Likelihood} \times \text{Severity} \quad \text{Persamaan 2.11. 1}$$

Tabel 2.4 Analisis Risiko K3

		Severity				
		Negligible (1)	Minor (2)	Moderate (3)	Major (4)	Extreme (5)
Likelihood	Almost Certain (5)	M	H	H	E	E
	Likely (4)	M	M	H	H	E
	Possible (3)	L	M	M	H	H
	Unlikely (2)	L	M	M	M	H
	Rare (1)	L	L	L	M	M

Analisis dilakukan secara komparatif antara kondisi operasional manual sebelum implementasi sistem dan kondisi setelah implementasi, sehingga

dapat diperoleh nilai reduksi risiko yang terukur. Sebelum dilakukan penilaian risiko, terlebih dahulu dilakukan identifikasi terhadap seluruh aktivitas operasional yang mengandung potensi bahaya pada kondisi sistem manual. Identifikasi ini dilakukan berdasarkan dua sumber utama yaitu karakteristik bahaya *caustic* soda yang telah dijabarkan pada **Subbab 2.7**, serta kondisi operasional aktual di lapangan yang menjadi latar belakang penelitian ini.

Caustic soda dengan pH mendekati 14 diklasifikasikan sebagai bahan kimia yang sangat korosif dan dapat menyebabkan luka bakar kimiawi parah pada kulit dan mata apabila terjadi kontak langsung [3]. Data dari Tennessee Department of Health menunjukkan bahwa sekitar 75% insiden pelepasan sodium hidroksida di lingkungan industri disebabkan oleh human error, dan proporsi signifikan di antaranya terjadi di area penyimpanan atau selama proses pemindahan [4]. Kondisi ini menjadi dasar identifikasi bahwa aktivitas fisik operator di area tangki merupakan titik kerentanan utama yang harus dievaluasi

Berdasarkan identifikasi potensi bahaya tersebut, dilakukan penilaian risiko terhadap setiap aktivitas kerja baik pada kondisi sebelum maupun sesudah penerapan sistem otomasi. Penilaian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana implementasi sistem berbasis PLC dan SCADA mampu menurunkan tingkat risiko yang dihadapi operator selama proses bongkar dan transfer *caustic*. Tingkat efektivitas penerapan sistem kemudian dievaluasi melalui perhitungan persentase reduksi risiko dengan membandingkan nilai risiko awal (sebelum implementasi) dan nilai risiko setelah implementasi sistem. Persentase reduksi risiko dihitung menggunakan Persamaan (2.10.2) sebagai berikut.

$$\text{Reduksi Risiko} = \frac{RS_{\text{sebelum}} - RS_{\text{setelah}}}{RS_{\text{sebelum}}} \times 100\% \quad \text{Persamaan 2.11. 2}$$

Semakin besar persentase reduksi risiko yang diperoleh, semakin efektif sistem otomasi dalam mengurangi potensi bahaya dan meningkatkan keselamatan kerja operator pada proses bongkar dan transfer larutan *caustic*.

2.12 Analisis Efisiensi Waktu Operasi

Efisiensi waktu operasi merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengevaluasi peningkatan kinerja suatu sistem setelah dilakukan

implementasi atau perbaikan proses. Dalam sistem otomasi industri, penerapan teknologi kontrol berbasis Programmable Logic Controller (PLC) dan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) bertujuan mengurangi aktivitas manual operator, mempercepat pelaksanaan proses, serta meningkatkan efektivitas operasi tanpa mengurangi aspek keselamatan. Oleh karena itu, evaluasi efisiensi waktu dilakukan dengan membandingkan total waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan suatu proses sebelum dan sesudah implementasi sistem otomasi [23].

Analisis efisiensi waktu pada penelitian ini menggunakan pendekatan before-after comparison, yaitu membandingkan kondisi operasi manual dengan kondisi setelah sistem otomasi diterapkan. Pendekatan ini banyak digunakan dalam penelitian rekayasa untuk menilai peningkatan performa suatu sistem berdasarkan perubahan indikator kinerja, seperti waktu operasi, produktivitas, maupun efisiensi proses [24]. Pada penelitian ini, indikator yang digunakan adalah total waktu intervensi operator selama proses bongkar *caustic soda*. Persentase efisiensi waktu dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$Efisiensi = \frac{T_{sebelum} - T_{sesudah}}{T_{sebelum}} \times 100\% \quad \text{Persamaan 2.12.1}$$

Dengan:

$T_{sebelum}$ = total waktu intervensi operator sebelum implementasi (menit)

$T_{sesudah}$ = total waktu intervensi operator setelah implementasi (menit)

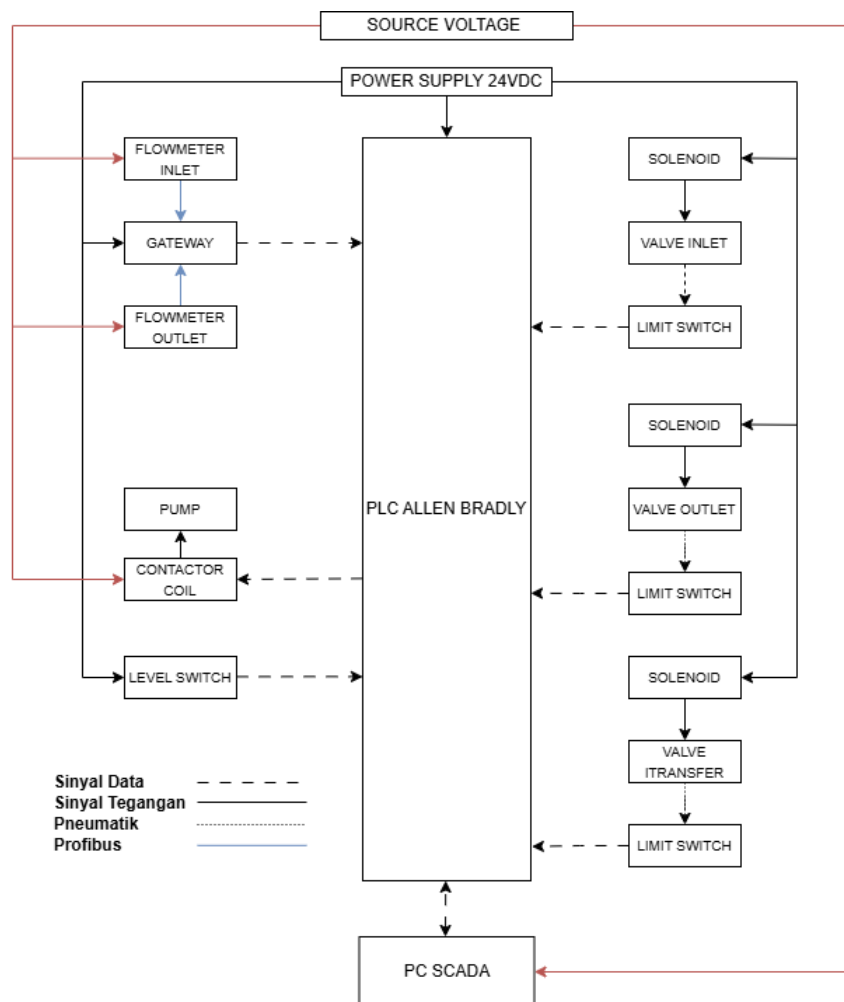
Semakin besar nilai efisiensi yang diperoleh, semakin besar peningkatan efektivitas sistem yang dihasilkan. Pada penelitian ini, nilai $T_{sebelum}$ diperoleh berdasarkan hasil observasi terhadap tahapan proses bongkar secara manual sesuai prosedur operasional di lapangan, sedangkan nilai $T_{sesudah}$ diperoleh dari hasil pengujian sistem otomasi berbasis PLC dan SCADA yang telah menerapkan metode *rule-based interlock*. Dengan demikian, hasil analisis tidak dimaksudkan sebagai pengukuran waktu baku (*standard time*), melainkan sebagai evaluasi terhadap peningkatan efisiensi operasional setelah implementasi sistem otomasi.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Blok Komponen

Diagram blok komponen berfungsi memberikan gambaran umum mengenai hubungan antar komponen utama dalam sistem yang dirancang. **Gambar 3.1** merupakan gambar diagram yang digunakan untuk memvisualisasikan alur kerja sistem.



Gambar 3.1 Diagram Blok Komponen
Berikut penjelasan setiap komponen pada gambar:

3.1.1 OMRON S8VS Power Supply

Berfungsi sebagai sumber catu daya untuk seluruh sistem kontrol, khususnya PLC, sensor, dan perangkat komunikasi. Power supply ini mengubah tegangan AC menjadi DC (umumnya 24 VDC) yang stabil agar peralatan kontrol dapat bekerja dengan aman dan andal.

3.1.2 Allen-Bradley CompactLogix L24ER

PLC ini merupakan pusat pengendali sistem yang menjalankan logika rule-based permissive *interlock*. PLC menerima sinyal dari sensor (level Indicator, limit switch, flowmeter) serta perintah dari SCADA, kemudian memprosesnya untuk menentukan apakah aktuator seperti pompa dan valve dapat dijalankan atau tidak.

3.1.3 Promass E 300 / Flowmeter

Digunakan untuk mengukur laju aliran massa *caustic* soda secara akurat. Data hasil pengukuran dikirim ke PLC dan ditampilkan pada SCADA sebagai parameter monitoring utama selama proses berlangsung.

3.1.4 Ball Valve SS Flange 3 Inch / ACV

Berfungsi sebagai katup on/off untuk mengatur aliran fluida dalam sistem. Valve ini dikendalikan oleh PLC melalui aktuator (electric atau pneumatic) sehingga dapat dibuka atau ditutup secara otomatis tanpa intervensi manual di lapangan.

3.1.5 Limit Switch

Digunakan sebagai sensor posisi pada valve atau peralatan mekanis lainnya. Limit switch memberikan sinyal feedback ke PLC untuk menunjukkan apakah valve dalam kondisi open atau close, yang kemudian digunakan sebagai salah satu syarat dalam logika *interlock*.

3.1.6 Level Indicator

Level Switch berfungsi untuk mengetahui apakah terdapat cairan pada tangki PIT sehingga dapat men-trigger pompa aktif saat proses bongkar berjalan

3.1.7 ENPA-R Gateway

Gateway digunakan sebagai perantara komunikasi antara Coriolis flowmeter dan PLC ketika terdapat perbedaan protokol komunikasi, sehingga data pengukuran seperti flow rate dapat diterima dan diproses oleh PLC

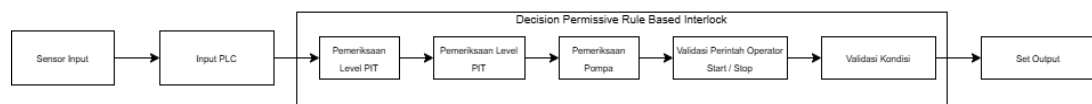
3.1.8 Solenoid valve

Berfungsi sebagai aktuator pneumatik yang mengontrol aliran udara tekan menuju actuator valve. *Solenoid valve* dikendalikan oleh

PLC (digital *output*) dan berperan dalam membuka atau menutup ball valve secara tidak langsung.

3.2 Diagram Blok Sistem Permissive *Interlock*

Diagram blok sistem *permissive interlock* tersebut menggambarkan alur pengolahan sinyal mulai dari *input* hingga menghasilkan keputusan akhir berupa pengaktifan aktuator. Proses diawali dari sensor *input*, yang terdiri dari perangkat lapangan seperti level switch, flowmeter, dan limit switch yang mendeteksi kondisi aktual sistem. Sinyal dari sensor ini kemudian masuk ke tahap *input* PLC, dimana seluruh data dikumpulkan dan diproses sebagai variabel logika. Selanjutnya, PLC melakukan pemeriksaan level PIT, yaitu mengevaluasi apakah kondisi level cairan telah memenuhi syarat operasional, misalnya berada pada kondisi High sebagai indikasi bahwa fluida siap dipompa. Diagram block system *permissive interlock* dapat dilihat pada **Gambar 3.2** berikut



Gambar 3.2 *Permissive Interlock System*

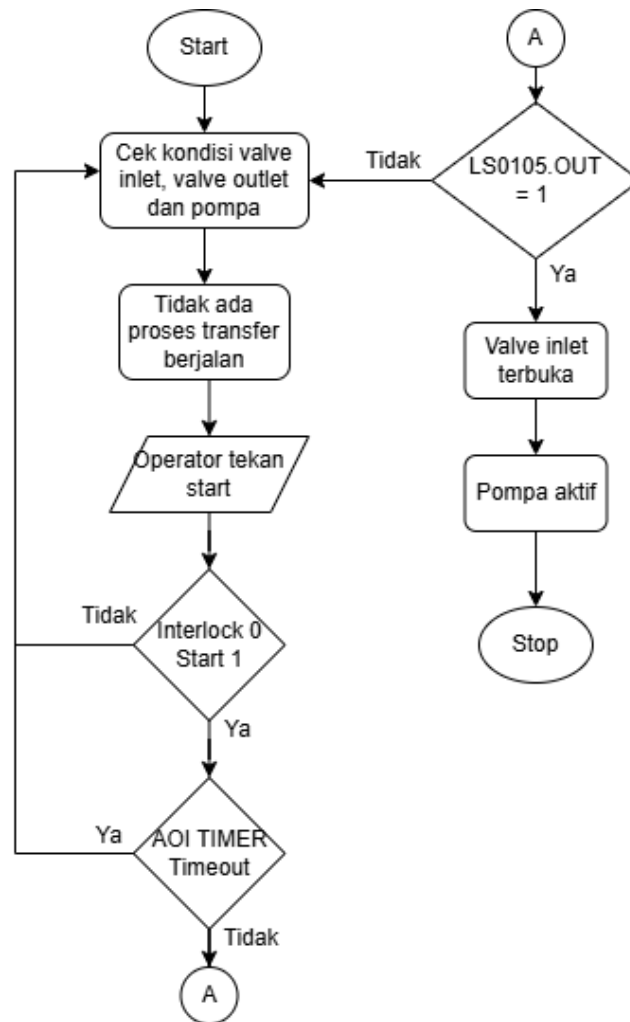
Setelah itu, dilakukan pemeriksaan kondisi pompa, yang memastikan bahwa pompa telah di-enable oleh operator dan berada dalam kondisi siap operasi. Tahapan berikutnya adalah validasi perintah operator (*Start/Stop*) yang berasal dari SCADA/HMI, dimana PLC memverifikasi apakah operator memberikan perintah untuk menjalankan sistem. Seluruh kondisi tersebut kemudian masuk ke tahap validasi kondisi, yaitu inti dari metode *permissive rule-based interlock*, dimana PLC mengecek apakah semua syarat terpenuhi secara bersamaan. Jika salah satu kondisi tidak terpenuhi, maka sistem tidak akan dijalankan sebagai bentuk pengamanan.

Apabila seluruh kondisi telah valid, maka sistem akan melanjutkan ke tahap *set output*, dimana PLC mengirimkan sinyal ke aktuator seperti pompa dan valve untuk menjalankan proses pemindahan fluida. Dengan demikian, diagram blok ini menunjukkan bahwa sistem tidak bekerja secara otomatis penuh, melainkan berbasis izin (*permissive*) yang memastikan setiap proses

hanya dapat berjalan apabila seluruh kondisi aman dan sesuai telah terpenuhi, sehingga meningkatkan keselamatan dan keandalan operasi.

3.3 Flowchart Sistem Bongkar dan Transfer

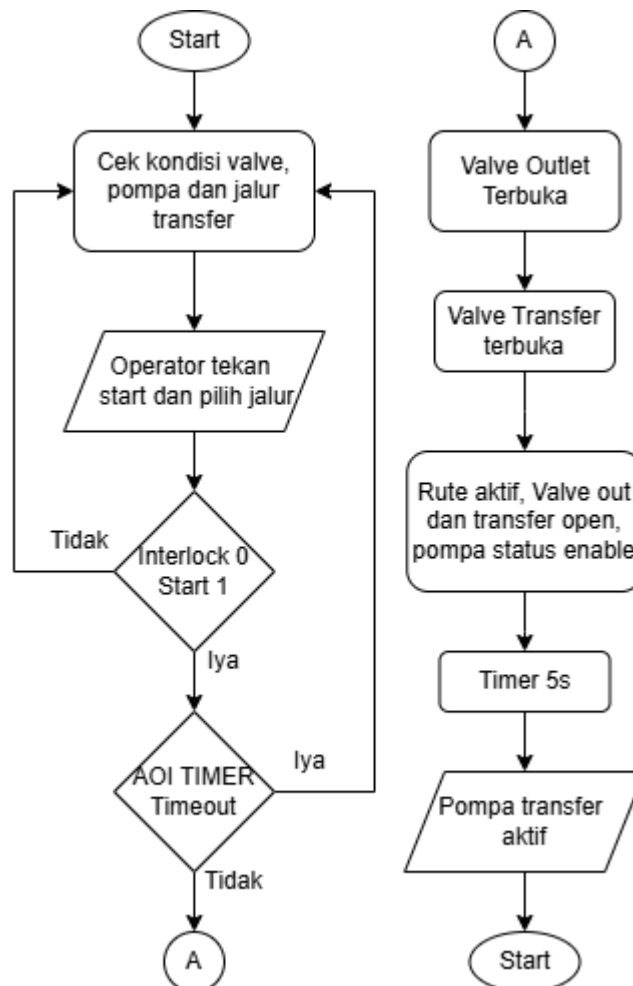
Untuk memberikan gambaran yang lebih sistematis mengenai alur kerja sistem, maka disusun flowchart proses bongkar dan transfer *caustic* soda pada **Gambar 3.3** berdasarkan integrasi antara peralatan lapangan, PLC, serta SCADA. Flowchart ini menggambarkan urutan langkah operasional yang dilakukan oleh sistem, mulai dari kondisi awal, proses pengecekan permissive *interlock*, hingga eksekusi perintah oleh operator. Selain itu, flowchart juga menunjukkan hubungan antara kondisi sensor, validasi logika pada PLC, serta interaksi operator melalui SCADA dalam menjalankan maupun menghentikan proses. Dengan adanya flowchart ini, diharapkan alur kerja sistem dapat dipahami secara lebih jelas dan terstruktur, sehingga memudahkan dalam analisis maupun implementasi logika kontrol yang dirancang.



Gambar 3.3 Flowchart Proses Bongkar

Proses bongkar (unloading) dimulai dari kondisi awal sistem dalam keadaan standby, dimana PLC secara kontinu memantau status level switch (LS) pada PIT. Apabila LS belum mencapai kondisi High, maka sistem tetap berada pada kondisi menunggu tanpa mengulang proses dari awal, melainkan hanya melakukan pengecekan berulang terhadap status level. Ketika level PIT telah mencapai kondisi High, hal ini menandakan bahwa cairan dari tangki truck telah mencukupi untuk dilakukan proses pemompaan ke tangki utama. Selanjutnya, operator melalui SCADA melakukan langkah persiapan dengan mengaktifkan (enable) pompa secara eksplisit. Setelah itu, PLC melakukan evaluasi terhadap seluruh kondisi permissive *interlock*, yaitu memastikan bahwa level PIT dalam kondisi High, pompa telah di-enable, serta valve dalam kondisi siap operasi. Jika seluruh syarat terpenuhi, maka sistem akan menampilkan pop-up konfirmasi pada SCADA yang memberikan pilihan

kepada operator untuk melakukan perintah *Start* atau *Stop*. Proses bongkar baru akan berjalan setelah operator menekan tombol *Start* pada SCADA. Selama proses berlangsung, sistem tetap dipantau hingga kondisi level PIT mencapai Low, yang menandakan bahwa cairan pada PIT telah habis dipompa. Pada kondisi ini, proses dianggap selesai, dan operator dapat menghentikan sistem secara manual melalui SCADA sebagai langkah akhir untuk memastikan seluruh peralatan kembali ke kondisi aman



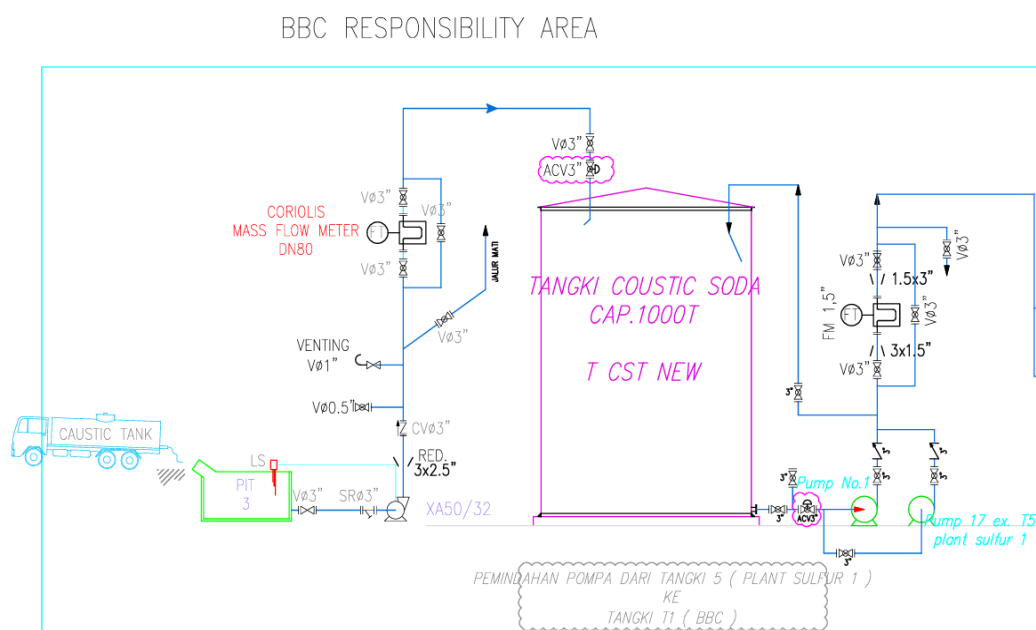
Gambar 3.4 Flowchart Proses Transfer

Sementara itu, pada flowchart **Gambar 3.4** merupakan proses transfer dari tangki *caustic* soda menuju tangki plant diawali dengan pemilihan jalur distribusi oleh operator melalui SCADA, yaitu memilih antara jalur Route 1A atau Route 1B sesuai kebutuhan operasional. Setelah jalur dipilih, sistem akan melakukan pengecekan mutual exclusion, yaitu memastikan bahwa jalur lain tidak sedang digunakan. Jika jalur lain dalam kondisi *running*, maka sistem

akan memblokir proses untuk mencegah konflik aliran. Jika jalur yang dipilih tersedia, operator kemudian mengaktifkan pompa dan valve melalui SCADA sebagai bagian dari syarat *permissive interlock*. PLC akan memvalidasi kondisi tersebut sebelum mengizinkan proses berjalan. Berbeda dengan proses bongkar, pada tahap ini level indicator hanya digunakan sebagai parameter monitoring yang ditampilkan pada SCADA dan tidak digunakan sebagai pemicu otomatis dalam logika *interlock*. Operator secara aktif memantau nilai level tangki tujuan untuk menentukan kapan proses harus dihentikan. Ketika level tangki plant telah mencapai batas yang diinginkan atau mendekati penuh, operator akan melakukan penghentian proses secara manual melalui SCADA. Dengan demikian, proses transfer bersifat semi-otomatis, dimana sistem *interlock* berfungsi sebagai pengaman, sementara keputusan akhir tetap berada pada operator berdasarkan informasi yang ditampilkan secara real-time.

3.4 Gambar Sistem

Bagian ini membahas rancangan gambar P&ID proyek tugas akhir, yang berfungsi menggambarkan susunan komponen alat. Visualisasi gambar dari rancangan tugas akhir ini dapat dilihat pada **Gambar 3.5** berikut:



Gambar 3.5 Gambar P&ID Sistem

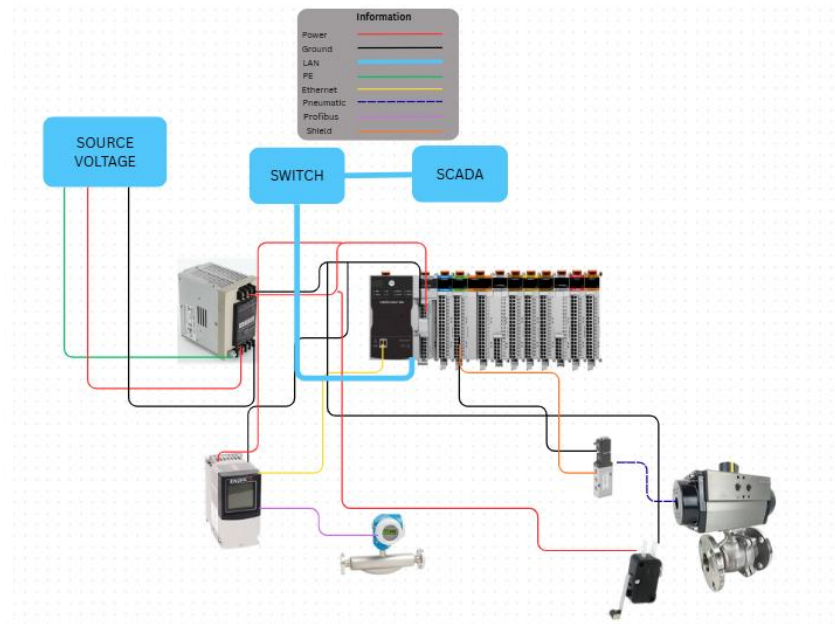
Selama Proses pemindahan *caustic* soda pada sistem ini terdiri dari dua tahapan utama, yaitu proses bongkar dan proses transfer yang seluruhnya

dikendalikan menggunakan metode permissive rule-based *interlock* berbasis PLC dan SCADA. Pada proses bongkar, fluida *caustic* soda dari tangki truck terlebih dahulu dialirkan menuju PIT sebagai penampung sementara. Kondisi level pada PIT dipantau menggunakan level switch yang memberikan sinyal ke PLC sebagai indikator kesiapan sistem. Ketika level telah mencapai kondisi High, sistem dinyatakan siap untuk melanjutkan proses pemompaan menuju tangki penyimpanan. Selanjutnya, operator melalui SCADA melakukan pengaktifan pompa (enable) serta membuka valve pada jalur inlet tangki. PLC kemudian melakukan validasi terhadap seluruh kondisi tersebut, meliputi status level PIT, kondisi valve, serta perintah *start* dari operator. Apabila seluruh syarat terpenuhi, maka PLC akan mengizinkan pompa untuk beroperasi sehingga fluida dapat dipindahkan dari PIT ke tangki *caustic* soda. Selama proses berlangsung, laju aliran dipantau menggunakan Coriolis mass flow meter yang ditampilkan secara real-time pada SCADA sebagai parameter monitoring.

Setelah fluida tersimpan di dalam tangki, proses selanjutnya adalah proses transfer menuju area plant. Pada tahap ini, operator kembali melakukan pengaktifan pompa dan membuka *valve* distribusi melalui SCADA. PLC akan memeriksa kondisi permissive *interlock*, yaitu memastikan bahwa pompa dalam keadaan enable dan jalur valve telah terbuka sebelum sistem dapat dijalankan. Setelah operator memberikan perintah *start*, PLC mengaktifkan pompa untuk mengalirkan *caustic* soda dari tangki menuju titik distribusi yang dituju. Berbeda dengan proses bongkar, pada tahap ini tidak digunakan level switch sebagai *interlock* utama, melainkan operator memanfaatkan data dari level indicator yang ditampilkan pada SCADA untuk memantau kapasitas tangki secara kontinu. Dengan demikian, kedua proses ini menunjukkan bahwa sistem bekerja secara semi-otomatis, dimana PLC berperan sebagai pengaman melalui logika *interlock*, sementara operator tetap memiliki kendali utama dalam menjalankan dan menghentikan proses melalui SCADA

3.5 Desain Rangkaian Elektrikal

Pada desain rangkaian elektrikal **Gambar 3.6** dibawah, membahas mengenai rancangan rangkaian elektrikal dari alat tugas akhir yang dilakukan untuk mengintegrasikan semua komponen yang digunakan.



Gambar 3.6 Desain Rangkaian Elektrikal

Diagram tersebut menggambarkan hubungan terintegrasi antara sumber daya, sistem kontrol, komunikasi, serta perangkat lapangan dalam sistem otomasi pemindahan *caustic* soda. Sistem diawali dari source voltage yang menyuplai daya listrik ke power supply, kemudian didistribusikan menjadi tegangan DC untuk mengoperasikan PLC, sensor, gateway, dan perangkat lainnya. PLC seperti Allen-Bradley CompactLogix L24ER berperan sebagai pusat pengendali yang menerima berbagai *input* dari perangkat lapangan, seperti flowmeter Proline Promass E 300 dan level indicator, baik melalui sinyal langsung maupun melalui ENPA-R Gateway yang berfungsi sebagai perantara komunikasi berbasis Ethernet. PLC juga terhubung dengan sistem SCADA melalui jaringan yang dimediasi oleh switch, sehingga memungkinkan operator melakukan monitoring dan kontrol secara real-time.

Seluruh sinyal *input* yang diterima PLC akan diproses menggunakan logika *interlock*, kemudian menghasilkan *output* berupa sinyal digital yang dikirim ke *solenoid valve*. *Solenoid valve* ini menerima tegangan dari PLC dan berfungsi mengontrol aliran udara tekan menuju actuator pada ball valve.

Dengan adanya tekanan udara tersebut, actuator akan menggerakkan valve untuk membuka atau menutup aliran fluida sesuai perintah sistem. Dengan demikian, diagram ini menunjukkan keterkaitan antara sistem kelistrikan (power dan sinyal), sistem komunikasi (Ethernet/SCADA), serta sistem pneumatik (solenoid dan actuator valve) yang bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan proses kontrol yang aman, efisien, dan terpusat.

3.6 Spesifikasi Validasi Kapasitas Tanki Coustic Soda

Sebagai landasan perancangan logika rule-based *interlock*, dilakukan perhitungan dan validasi kapasitas tangki *caustic* soda berdasarkan spesifikasi fisik tangki yang tersedia. Validasi ini bertujuan untuk memastikan konsistensi antara data teknis tangki dengan parameter proses yang akan digunakan sebagai acuan penetapan setpoint *interlock*, sebagaimana diuraikan dalam model dinamika tangki pada **Persamaan (2.8.1)**. Tangki *caustic* soda yang menjadi objek penelitian ini berbentuk silinder vertikal dengan spesifikasi dimensi pada **Tabel 3.1** berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi Tangki CST

Parameter	Nilai
Tinggi Tanki	15,27
Luas Penampang	47,596
Kapasitas Penuh Nominal	1.092,367 ton
Kapasitas Penuh Operasional	1.050 ton
Densitas <i>Caustic</i>	1.505
Bentuk Tanki	Silinder Vertikal

Validasi kapasitas tangki dilakukan melalui dua pendekatan perhitungan yang saling dikonfirmasi. Pendekatan pertama menggunakan perhitungan volume geometris berdasarkan dimensi fisik tangki pada **Persamaan (2.8.3)**:

$$V = 47.596 \times 15,27$$

$$V = 726,6m^3$$

Pendekatan kedua menggunakan konversi dari kapasitas massa nominal tangki berdasarkan densitas fluida menggunakan **Persamaan (2.8.4)**

$$V = \frac{1.092.367}{1.505} = 725,85 \text{ m}^3$$

Perbandingan kedua hasil perhitungan menunjukkan nilai yang saling mendekati, yaitu berada pada rentang 725,85 m³ hingga 726,6 m³, dengan selisih sebesar 0,966m³ atau sekitar 0,133%. Deviasi yang sangat kecil ini mengkonfirmasi konsistensi antara data dimensi fisik tangki dengan kapasitas massa nominal yang tercantum pada datasheet peralatan, sehingga kedua parameter tersebut dinyatakan valid untuk digunakan sebagai acuan dalam perancangan sistem.

3.7 Penetapan Batas Level Sebagai Syarat *Interlock*

Penetapan batas level pada masing-masing tangki merupakan tahap krusial dalam perancangan sistem rule-based permissive *interlock*, karena nilai-nilai ini secara langsung menentukan kondisi logika yang diverifikasi oleh PLC sebelum mengizinkan atau memblokir perintah operasi dari operator melalui SCADA. Berbeda dengan safety *interlock* konvensional yang secara otomatis men-trigger aktuator, sebagian besar logika pada sistem ini bersifat permissive PLC memverifikasi apakah syarat level telah terpenuhi, lalu mengizinkan atau memblokir perintah *Start* yang diberikan operator. Terdapat satu pengecualian yaitu kondisi LOW pada tangki CST yang bersifat safety *interlock* murni, di mana PLC secara otomatis mematikan pompa tanpa menunggu keputusan operator.

Perhitungan batas level pada subbab ini menggunakan persamaan konversi massa-volume-tinggi yang diturunkan dari model dinamika tangki pada persamaan (2.8.6) di mana m adalah massa cairan (kg), ρ adalah densitas *caustic* soda sebesar 1.505 kg/m³, dan A adalah luas penampang tangki (m²).

3.7.1 Tangki PIT

Tangki PIT berfungsi sebagai penampung sementara *caustic* soda yang dibongkar dari tangki truk sebelum dipindahkan ke tangki penyimpanan utama (CST). Berdasarkan data teknis, tangki PIT memiliki tinggi 4 m dan luas penampang 5 m². Kapasitas maksimal tangki PIT telah diverifikasi 30,1 ton.

Pada sistem ini, tangki PIT dilengkapi dua kondisi Level Switch yaitu HIGH dan LOW.

Kondisi HIGH ditetapkan pada kapasitas penuh tangki PIT yaitu 30,1 ton. Kondisi ini menjadi syarat permissive utama: proses bongkar dari truk ke CST hanya dapat di-*start* oleh operator apabila LS PIT mendeteksi kondisi HIGH, yang berarti PIT telah terisi penuh dan siap untuk dipompa ke CST.

$$Tinggi\ High\ PIT = \frac{Status\ High}{p \cdot A} = \frac{30.100}{1.505 \times 5} = \frac{30.100}{7.525} \approx 4,00m$$

Kondisi LOW ditetapkan sebesar 2% dari kapasitas maksimal PIT sebagai representasi sisa cairan minimum yang selalu tertinggal setelah proses transfer ke CST selesai:

$$Massa\ Low\ PIT = 2\% \times 30.100 = 602kg \approx 0.6ton$$

$$Tinggi\ Low\ PIT = \frac{Massa\ low}{p \cdot A} = \frac{602}{1.505 \times 5} = \frac{602}{7.525} \approx 0,08m$$

Kondisi LOW ini menjadi batas bawah sistem zeroing, di mana sebelum proses bongkar baru dimulai, sistem me-reset referensi pengukuran dari nilai sisa ini. Dalam konteks permissive *interlock*, apabila LS mendeteksi level berada di bawah atau sama dengan kondisi LOW, PLC memblokir perintah *Start* proses bongkar karena PIT dianggap belum siap.

3.7.2 Tangki CST (*Caustic Soda Tank*)

Tangki CST merupakan tangki penyimpanan utama dengan spesifikasi yang telah divalidasi pada 2 **Tabel 3.6.1**. Berbeda dengan tangki PIT yang menggunakan Level Switch diskrit, tangki CST menggunakan Flow Transmitter yang menampilkan nilai tekanan hidrostatik dalam satuan mBAR secara real-time pada display SCADA. Instrumen ini berfungsi murni sebagai referensi monitoring bagi operator dan tidak men-trigger aktuator apapun secara otomatis, kecuali pada kondisi LOW yang bersifat safety *interlock*.

Kondisi *HIGH* CST ditetapkan pada 1.050 ton sebagai kapasitas operasional maksimum. Ketika nilai pada display SCADA mendekati batas ini, operator secara manual menghentikan pompa dan menutup ACV melalui antarmuka SCADA. Tidak ada trigger otomatis pada kondisi ini keputusan sepenuhnya berada di tangan operator berdasarkan pembacaan display.

$$\begin{aligned} \text{Tinggi High CST} &= \frac{\text{Maksimal Operasional}}{p \cdot A} = \frac{1.050.000}{1.505 \times 47,596} \\ &= \frac{1.050.000}{71.631,98} \approx 14,66m \end{aligned}$$

Nilai ini berada 0,61m di bawah tinggi fisik tangki (15,27), yang memberikan toleransi waktu bagi operator untuk menghentikan proses sebelum tangki benar - benar meluap.

Kondisi *LOW* CST ditetapkan pada 20 ton sebagai batas minimum cairan yang harus selalu tersisa di tangki. Kondisi ini bersifat *safety interlock*: ketika level mencapai batas ini, PLC secara otomatis mematikan pompa transfer tanpa menunggu perintah operator. Tujuannya adalah melindungi pompa dari kondisi *dry running* yang dapat merusak seal dan impeller pompa akibat beroperasi tanpa cairan.

$$\begin{aligned} \text{Tinggi Low CST} &= \frac{\text{Status Low}}{p \cdot A} = \frac{20.000}{1.505 \times 47,596} = \frac{20.000}{71.631,98} \\ &\approx 0,28m \end{aligned}$$

Seluruh hasil perhitungan batas level dirangkum pada **Tabel 3.2** berikut sebagai acuan perancangan logika PLC dan penentuan posisi fisik pemasangan instrument.

Tabel 3.2 Hasil Perhitungan

Tangki	Kondisi	Massa (ton)	Tinggi (m)
PIT	HIGH	30,1	4,00
PIT	LOW	0,6	0,08
CST	HIGH	1.050	14.66
CST	LOW	20	0,28

3.8 Alat dan Bahan

Penelitian ini memerlukan berbagai peralatan dan bahan yang mendukung dalam proses dan kelancaran pembuatan alat, baik dalam aspek

komponen elektronika atau mekanik. Alat dan bahan dapat dilihat pada **Tabel 3.3** berikut :

Tabel 3.3 Alat dan Fungsi

Alat dan Bahan	Fungsi
Power Supply OMRON S8VS	Tegangan Sumber
PLC Allen Bradley Compact Logix L24ER	Kontroller Proses
Proline Promas E 300 Coriolis Flowmeter	mengukur laju aliran
Ball Valve SS Flange 3inch	katup on/off aliran fluida
Limit Switch	Sensor untuk tangki PIT
Level Indicator	Perangkat Monitoring
Gateway ENPA-R	protokol komunikasi flowmeter dengan PLC
<i>Solenoid valve</i>	aktuator pneumatik mengontrol aliran udara

3.9 Perancangan Logika Ladder Diagram

Dalam ladder diagram PLC, terdapat dua jenis kontak masukan yang digunakan sebagai representasi kondisi logika. Kontak Normally Open (NO) mengalirkan arus apabila nilai tag bernilai 1 (aktif), sedangkan kontak Normally Closed (NC) mengalirkan arus apabila nilai tag bernilai 0 (tidak aktif).

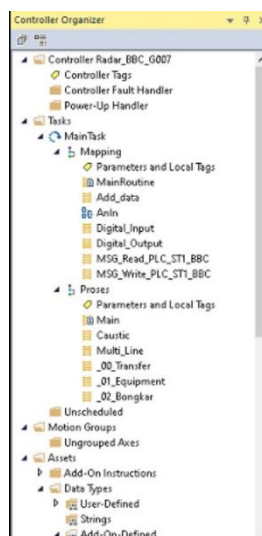
Kondisi online monitoring pada software PLC memvisualisasikan status aliran arus secara real-time melalui indikator warna. Kontak yang berwarna hijau menandakan kondisi tersebut sedang mengalirkan arus, baik pada kontak

NO yang tag-nya bernilai 1 maupun kontak NC yang tag-nya bernilai 0. Sebaliknya, kontak yang tidak berwarna hijau menandakan aliran arus terputus di titik tersebut.

3.9.1 Arsitektur Program PLC

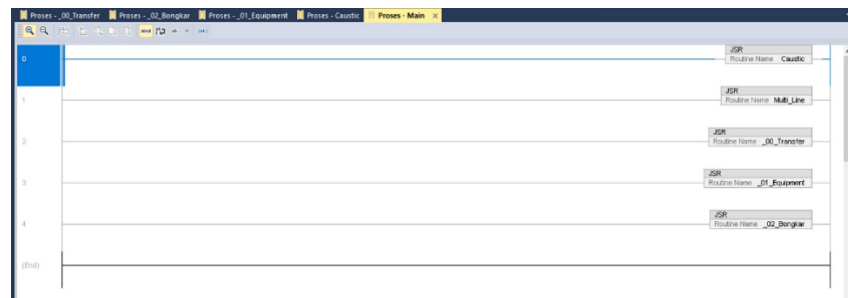
Sistem kontrol dan monitoring tangki *caustic* dirancang menggunakan PLC Allen-Bradley yang diprogram melalui perangkat lunak Studio 5000 Logix Designer. PLC berfungsi sebagai pusat kendali yang mengintegrasikan logika proses, pengendalian peralatan lapangan, perhitungan parameter proses, serta komunikasi data dengan sistem SCADA melalui protokol EtherNet/IP. Seluruh program disusun secara modular menggunakan beberapa routine yang memiliki fungsi spesifik sehingga memudahkan pengembangan, pemeliharaan, dan proses troubleshooting.

Struktur program PLC ditempatkan pada satu *Continuous Task* yang dieksekusi secara berulang selama PLC berada pada mode *RUN*. Di dalam task tersebut terdapat *Main Program* yang berisi beberapa routine utama yang saling terhubung melalui instruksi *Jump to Subroutine* (JSR). Penggunaan struktur modular ini memungkinkan setiap fungsi sistem dipisahkan berdasarkan tugasnya masing-masing sehingga alur program menjadi lebih terorganisir. Pada **Gambar 3.7** disajikan tampilan Controller Tag pada software Studio5000.



Gambar 3.7 Controller Organizer Pada Software Studio5000

Routine utama yang berfungsi sebagai titik awal eksekusi program adalah Proses_Main. Routine ini dieksekusi pada setiap siklus scan PLC dan bertugas memanggil seluruh subroutine yang diperlukan dalam urutan tertentu. Dengan demikian, seluruh logika kontrol, pengendalian peralatan, dan perhitungan monitoring dapat berjalan secara sinkron pada setiap scan PLC. Pada **Gambar 3.8** Merupakan ladder logic dari Main Routine Keseluruhan proses



Gambar 3.8 Proses Main Routine

Subroutine Proses_00_Transfer digunakan untuk mengelola logika proses transfer *caustic* antar tangki. Routine ini berisi logika *interlock*, permissive, serta sequence operasi yang menentukan apakah proses transfer diizinkan untuk dijalankan. *Output* utama dari routine ini berupa status transfer yang selanjutnya digunakan oleh routine pengendalian peralatan. Berikut pada **Tabel 3.4** ditampilkan Tag PLC yang ada pada sub routine Proses_00_Transfer:

Tabel 3.4 Tag I/O Sub Routine Proses_00_Transfer

No	Tag	I/O	Fungsi
1	Route_1A.TransferCmd.0	Input	Command bit transfer jalur 1A
2	KV1_0_Out.Sts_Disabled	Input	Status disabled valve outlet
3	KV1_0_Out.Sts_Err	Input	Status error valve outlet
4	KV1_3_IN.Sts_Disabled	Input	Status disabled valve inlet
5	KV1_3_IN.Sts_Err	Input	Status error valve inlet
6	KV1_3_IN.Sts_Closed	Input	Status posisi valve inlet
7	P0110B_1.Sts_Disabled	Input	Status disabled pompa transfer 1

8	P0110B_1.Sts_Err	<i>Input</i>	Status error pompa transfer 1
9	P0110B_1.Sts_Manual	<i>Input</i>	Status mode manual pompa 1
10	Route_1B.Sts_Transfer_Running	<i>Input</i>	Status proses transfer jalur 1B
11	Route_1B.TransferCmd.0	<i>Input</i>	Command bit transfer jalur 1B
12	Route_1A.Sts_Transfer_Running	<i>Input</i>	Status proses transfer jalur 1A
13	Route_1A.Interlock_Transfer	<i>Output</i>	DINT blocking transfer jalur 1A
14	Route_1B.Interlock_Transfer	<i>Output</i>	DINT blocking transfer jalur 1B

Subroutine Proses_02_Bongkar memiliki fungsi yang serupa dengan Proses_00_Transfer, namun dikhususkan untuk proses bongkar *caustic* dari area penerimaan menuju tangki penyimpanan. Routine ini melakukan verifikasi kondisi keselamatan, status peralatan, serta kondisi proses sebelum memberikan izin operasi kepada peralatan yang terlibat. Pada **Tabel 3.5** disajikan Tag I/O untuk Subroutine Proses_02_Bongkar.

Tabel 3.5 Tag I/O Subroutine Proses_02_Bongkar

No	Tag	I/O	Fungsi
1	KV1_3_IN.Interlock	<i>Input</i>	<i>Output</i> flag <i>interlock</i> dari Vact AOI valve inlet
2	KV1_3_IN.Sts_Err	<i>Input</i>	Status error valve inlet
3	P0109.Sts_Err	<i>Input</i>	Status error pompa bongkar
4	KV1_0_Out.Sts_Err	<i>Input</i>	Status error valve outlet
5	KV1_0_Out.Sts_Disabled	<i>Input</i>	Status disabled valve outlet

6	KV1_3_IN.Sts_Manual	<i>Input</i>	Status mode manual valve inlet
7	LS0105.OUT	<i>Input</i>	<i>Output</i> Level Switch PIT 3
8	Route_1A.Sts_Transfer_Running	<i>Input</i>	Status proses transfer jalur 1
9	Route_1A.TransferCmd.0	<i>Input</i>	Command bit transfer jalur 1
10	Route_1B.Sts_Transfer_Running	<i>Input</i>	Status proses transfer jalur 2
11	Route_1B.TransferCmd.0	<i>Input</i>	Command bit transfer jalur 2
12	T1_3.Interlock_Transfer.0	<i>Output</i>	Bit 0 DINT blocking bongkar
13	T1_3.Interlock_Transfer.1	<i>Output</i>	Bit 1 DINT permissive bongkar

Subroutine Proses_01_Equipment berfungsi sebagai pengendali seluruh peralatan lapangan yang terdapat pada sistem, seperti valve, pompa, dan instrumen pendukung lainnya. Routine ini menerima status operasi dari routine proses, kemudian menerjemahkannya menjadi perintah fisik yang dikirimkan ke peralatan melalui AOI yang telah dirancang. Oleh karena itu, routine ini dapat dianggap sebagai lapisan antarmuka antara logika proses dan perangkat keras lapangan. Pada **Tabel 3.6** ditampilkan *input* dan *output* yang terdapat pada Subroutine Proses_01_Equipment.

Tabel 3.6 Tag I/O Subroutine Proses_01_Equipment

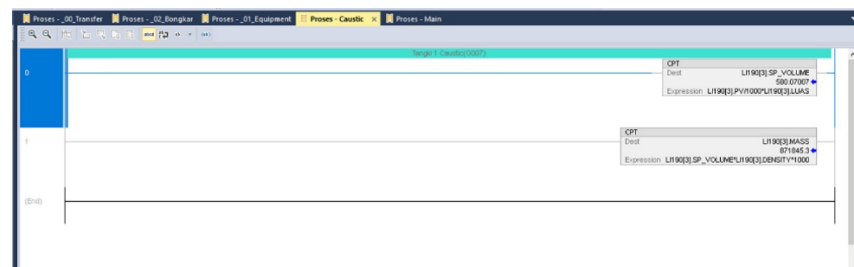
No	Tag	I/O	Fungsi
1	T1_3.Sts_Transfer_Running	<i>Input</i>	Status proses bongkar aktif
2	Route_1A.Sts_Transfer_Running	<i>Input</i>	Status proses transfer 1A aktif
3	Route_1B.Sts_Transfer_Running	<i>Input</i>	Status proses transfer 1B aktif

4	KV1_0_Out.Sts_Opened	<i>Input</i>	Konfirmasi valve outlet terbuka
5	KV1A_0.Sts_Opened	<i>Input</i>	Konfirmasi valve transfer 1A
6	KV1B_0.Sts_Opened	<i>Input</i>	Konfirmasi valve transfer 1B
7	KV1_3_IN.Sts_Opened	<i>Input</i>	Konfirmasi valve inlet terbuka
8	KV1A_0.Sts_Auto	<i>Input</i>	Status mode Auto valve 1A
9	KV1A_0.Sts_Disabled P0110B_1.Sts_Disabled	<i>Input</i>	Status disabled valve/pompa
10	P0110B_1.Sts_Disabled P0110B_2.Sts_Disabled	<i>Input</i>	Status pompa 1 untuk alternating pump
11	P0110B_1.TimerDelayStop	<i>Input</i>	Flag cooldown pompa 1 Trigger Latch Close valve
12	P0110B_1.Cmd_Run	<i>Input</i>	Status perintah <i>run</i> pompa 1
13	Delay_Unlatch_KV1A0[0].DN	<i>Output</i>	Timer 10 detik latch close Setelah DN
14	SP_OpenLine	<i>Output</i>	Setpoint delay <i>start</i> pompa
15	KV1_0_Out.Inp_Intlk	<i>Output</i>	Izin operasi valve outlet
16	KV1_3_IN.Inp_Intlk	<i>Output</i>	Izin operasi valve inlet
17	KV1A_0.Inp_Intlk	<i>Output</i>	Izin operasi valve transfer 1A
18	KV1B_0.Inp_Intlk	<i>Output</i>	Izin operasi valve transfer 1B
19	P0109.Inp_Intlk	<i>Output</i>	Izin operasi pompa bongkar
20	P0110B_1.Inp_Intlk	<i>Output</i>	Izin operasi pompa transfer 1

21	P0110B_2.Inp_Intlk	<i>Output</i>	Izin operasi pompa transfer 2
22	KV1_0_Out.Start_Stop	<i>Output</i>	Perintah buka/tutup valve outlet
23	KV1_3_IN.Start_Stop	<i>Output</i>	Perintah buka/tutup valve inlet
24	KV1A_0.Start_Stop	<i>Output</i>	Perintah buka/tutup valve 1A
25	KV1B_0.Start_Stop	<i>Output</i>	Perintah buka/tutup valve 1B
26	P0109.Cmd_Run	<i>Output</i>	Perintah jalankan pompa bongkar
27	P0109.Cmd_Stop	<i>Output</i>	Perintah hentikan pompa bongkar
28	P0110B_1.Cmd_Run	<i>Output</i>	Perintah jalankan pompa trans 1
29	P0110B_1.Cmd_Stop	<i>Output</i>	Perintah hentikan pompa trans 1
30	P0110B_2.Cmd_Run	<i>Output</i>	Perintah jalankan pompa trans 2
31	P0110B_2.Cmd_Stop	<i>Output</i>	Perintah hentikan pompa trans 2
32	P0110B_1_T_Delay.PRE	<i>Output</i>	Preset timer delay start pompa 1
33	Latch_Close_KV1A0	<i>Output</i>	Flag trigger tutup valve 1A
34	Latch_Close_KV1A0_Cmd	<i>Output</i>	Perintah aktual tutup valve 1A
35	KV1_0_Out.Out_Open	<i>Output</i> Fisik	Perintah aktual tutup valve 1A
36	KV1_3_IN.Out_Open	<i>Output</i> Fisik	24VDC ke solenoid buka KV1_3_IN

37	KV1A_0.Out_Open	Output Fisik	24VDC ke solenoid buka KV1A_0
38	KV1B_0.Out_Open	Output Fisik	24VDC ke solenoid buka KV1B_0
39	P0109.Out_Run	Output Fisik	24VDC ke koil kontaktor P0109
40	P0110B_1.Out_Run	Output Fisik	24VDC ke koil kontaktor P0110B_1
41	P0110B_2.Out_Run	Output Fisik	24VDC ke koil kontaktor P0110B_2

Gambar 3.9 Subroutine *Proses_Caustic* digunakan untuk melakukan perhitungan parameter proses berdasarkan data instrumen yang diterima PLC. Perhitungan yang dilakukan meliputi volume cairan dalam tangki dan massa produk berdasarkan level serta densitas cairan. Hasil perhitungan tersebut digunakan untuk keperluan monitoring dan ditampilkan secara real-time pada sistem SCADA.



Gambar 3.9 Sub Routine *Proses Caustic*

Secara keseluruhan, arsitektur program PLC yang diterapkan menggunakan pendekatan modular dan hierarkis, dimana routine proses bertugas menentukan izin operasi, routine equipment mengendalikan perangkat lapangan, sedangkan routine monitoring melakukan perhitungan dan pembaruan data proses. Struktur ini meningkatkan keterbacaan program, mempermudah proses pengembangan, serta mendukung implementasi konsep Rule-Based *Interlock* yang menjadi dasar pengamanan sistem bongkar dan transfer *caustic* soda.

3.9.2 Perancangan AOI (*Add On Instruction*)

Pada sistem otomasi yang dikembangkan, perancangan logika kontrol tidak hanya menggunakan instruksi dasar (*basic instruction*) pada ladder diagram, tetapi juga memanfaatkan Add-On Instruction (AOI) sebagai komponen utama dalam mengendalikan setiap peralatan proses. AOI merupakan fitur pada Studio 5000 Logix Designer yang memungkinkan sekumpulan logika, parameter, dan fungsi kontrol dikemas menjadi satu blok instruksi yang dapat digunakan kembali (*reusable*) pada beberapa perangkat dengan karakteristik operasi yang sama. Penerapan AOI memberikan keuntungan berupa penyederhanaan struktur program, peningkatan konsistensi logika kontrol, kemudahan pemeliharaan program, serta mempercepat proses pengembangan sistem.

Pada perancangan sistem kontrol tangki *caustic* soda, setiap AOI dirancang untuk merepresentasikan fungsi spesifik dari suatu peralatan maupun proses. AOI menerima sinyal masukan (*input*), memproses logika internal sesuai parameter yang telah ditentukan, kemudian menghasilkan keluaran (*output*) berupa perintah operasi maupun status peralatan yang digunakan oleh routine lainnya. Melalui mekanisme ini, komunikasi antar-routine dan antar-peralatan dapat dilakukan secara terstruktur sehingga proses bongkar dan transfer berlangsung sesuai urutan operasi (*sequence*) serta memenuhi persyaratan *rule-based interlock* yang telah dirancang.

3.9.2.1. AOI LS_TYP

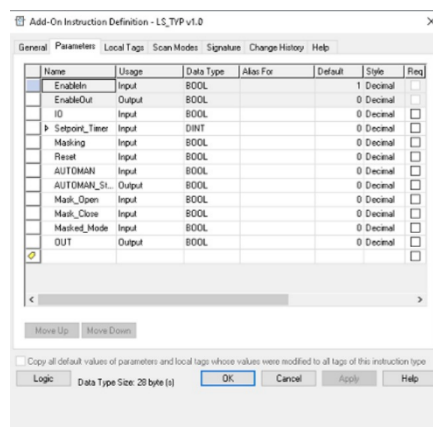
AOI (*Add-On Instruction*) LS_TYP digunakan untuk memproses sinyal level switch dari perangkat lapangan sehingga dapat digunakan secara andal oleh program PLC. AOI ini berfungsi sebagai antarmuka antara sinyal digital dari sensor level dengan logika kontrol yang diterapkan pada sistem. Dengan menggunakan AOI LS_TYP, proses pengolahan sinyal dapat dilakukan secara terstandarisasi dan lebih mudah untuk dipelihara maupun dikembangkan.

Pada sistem kontrol dan monitoring tangki *caustic*, AOI LS_TYP digunakan pada level switch LS0105 yang terpasang pada Pit 3. Sensor ini berfungsi untuk mendeteksi keberadaan cairan pada tangki sumber sebelum pompa transfer diizinkan untuk beroperasi. Sinyal digital dari

level switch terlebih dahulu diproses oleh AOI LS_TYP sebelum digunakan oleh logika *interlock* maupun kontrol peralatan.

AOI LS_TYP memiliki beberapa parameter utama, yaitu *input* sinyal sensor (IO), parameter waktu debounce (Setpoint_Timer), mode operasi otomatis atau manual (AUTOMAN), serta fungsi masking alarm. Parameter debounce digunakan untuk memastikan bahwa perubahan status sensor benar-benar berasal dari kondisi proses dan bukan akibat noise atau gangguan sesaat pada sinyal lapangan. Setelah proses validasi selesai, AOI menghasilkan *output* berupa sinyal status yang telah difilter dan siap digunakan oleh program utama. Pada gambar 3.10 merupakan parameter yang terdapat pada AOI LS_TYP.

Pada implementasinya, *output* dari AOI LS_TYP digunakan sebagai bagian dari safety *interlock* proses bongkar dan sebagai syarat operasi pompa PIT P0109. Pompa hanya dapat dijalankan apabila level switch mendeteksi keberadaan cairan pada Pit 3. Dengan demikian, AOI LS_TYP berperan dalam mencegah kondisi *dry running* yang dapat menyebabkan kerusakan pada pompa serta meningkatkan keandalan sistem kontrol secara keseluruhan. Pada **Gambar 3.10** berikut merupakan *input* dan *output* yang terdapat pada AOI LS_TYP.



Gambar 3.10 AOI Parameter Pada LS

3.9.2.2. AOI VACT_Parameter_Doble

AOI (Add-On Instruction) Vact_Parameter_Doble digunakan untuk mengendalikan valve pneumatik tipe *double acting* yang terdapat pada sistem transfer *caustic* soda. AOI ini dirancang untuk mengintegrasikan

fungsi kontrol buka-tutup valve, pemantauan posisi valve, manajemen mode operasi, serta deteksi gangguan dalam satu blok instruksi yang terstandarisasi. Dengan penggunaan AOI ini, logika pengendalian valve menjadi lebih terstruktur, mudah dipelihara, dan dapat digunakan kembali pada beberapa peralatan yang memiliki karakteristik operasi serupa.

Pada sistem *caustic* soda, AOI Vact_Parameter_Doble digunakan pada empat valve utama, yaitu valve outlet tangki *caustic* (KV1_0), valve inlet tangki *caustic* (KV1_3_IN), valve transfer jalur 1A (KV1A_0), dan valve transfer jalur 1B (KV1B_0). Seluruh valve tersebut memiliki fungsi penting dalam mengatur jalur aliran selama proses bongkar maupun transfer produk.

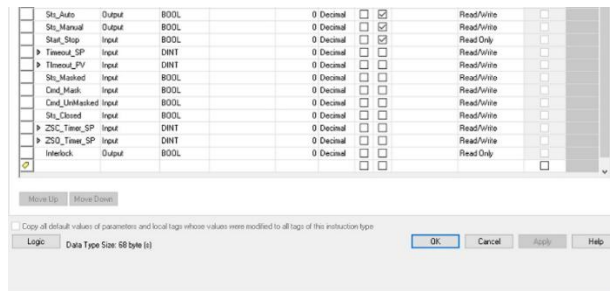
AOI menerima masukan berupa sinyal limit switch posisi terbuka (*Inp_OpenLS*) dan posisi tertutup (*Inp_ClosedLS*) sebagai umpan balik kondisi aktual valve di lapangan. Selain itu, AOI juga menerima sinyal *interlock* (*Inp_Intlk*) yang digunakan sebagai izin operasi sebelum valve dapat digerakkan. Perintah operasi diberikan melalui parameter *Start_Stop*, dimana logika program akan mengirimkan nilai aktif untuk membuka valve dan nilai tidak aktif untuk menutup valve. AOI juga menyediakan fasilitas operasi manual melalui HMI, fungsi penguncian peralatan (*disable*), serta fitur reset apabila terjadi gangguan operasi.

Untuk meningkatkan keandalan sistem, AOI dilengkapi dengan parameter waktu umpan balik (*Cfg_FdbkT*) yang digunakan untuk memantau keberhasilan pergerakan valve. Setelah perintah buka atau tutup diberikan, AOI akan menunggu konfirmasi dari limit switch sesuai posisi yang diperintahkan. Apabila dalam waktu yang telah ditentukan tidak diperoleh konfirmasi posisi, maka AOI akan mengaktifkan status error sebagai indikasi adanya kegagalan operasi valve. Informasi kesalahan ini kemudian digunakan oleh sistem *interlock* untuk mencegah proses bongkar maupun transfer dijalankan pada kondisi yang tidak aman.

Output utama AOI berupa sinyal perintah buka (*Out_Open*) dan tutup (*Out_Close*) yang dikirimkan ke *solenoid valve*. Selain itu, AOI menghasilkan berbagai status operasi seperti kondisi valve terbuka penuh (*Sts_Opened*), sedang membuka (*Sts_Opening*), mode otomatis (*Sts_Auto*), mode manual (*Sts_Manual*), dan status disable (*Sts_Disabled*). Informasi tersebut digunakan oleh logika kontrol pada *rung* lainnya sebagai syarat pelaksanaan urutan operasi peralatan.

Sebagai contoh implementasi pada valve outlet tangki *caustic* (KV1_0), valve hanya dapat dibuka apabila menerima perintah operasi dan seluruh kondisi *interlock* telah terpenuhi. Setelah perintah buka diberikan, AOI mengaktifkan sinyal ke solenoid sehingga aktuator mulai menggerakkan valve menuju posisi terbuka. Ketika limit switch posisi terbuka memberikan konfirmasi, status *Sts_Opened* akan aktif dan digunakan sebagai syarat pembukaan valve transfer berikutnya. Sebaliknya, apabila konfirmasi tidak diterima dalam waktu yang telah ditentukan, AOI akan mengaktifkan status error sehingga proses transfer diblokir oleh sistem *interlock*. Dengan mekanisme tersebut, AOI Vact_Parameter_Doble berperan penting dalam memastikan urutan operasi valve berjalan secara aman dan sesuai dengan rancangan sistem. Berikut pada **Gambar 3.11** adalah tampilan parameter yang digunakan pada AOI Vact Parameter Doble.

Name	Usage	Data Type	Alias For	Default	Style	Pres	Vis	Description	External Access	Constant
EnableIn	Input	BOOL		1	Decimal			Read Only		
EnableOut	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Error	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Int_OpenLS	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Int_InterL	Input	BOOL		0	Decimal			Value Interlock Bit		
Int_OpenLS	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
MCmd_Disable	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
MCmd_Enable	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
OCmd_Close	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
OCmd_Open	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Out_Close	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Out_Open	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_Opening	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_ClosedLS	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_ClosedLS	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_Disabled	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_Err	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_Err_Close	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_Err_Open	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_Opened	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_Opening	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
OCmd_Auto	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_OutInterL	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Out_SelfdckT	Input	DINT		15	Decimal			Read/Write		
Out_FdbkT	Input	DINT		15000	Decimal			Read/Write		
OCmd_Reset	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Cmd_Auto	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Cmd_Man	Input	BOOL		0	Decimal			Read/Write		
Sts_Auto	Output	BOOL		0	Decimal			Read/Write		



Gambar 3.11 AOI Parameter Pada Vact Doble

3.9.2.3. AOI Motor2

AOI (Add-On Instruction) Motor2 digunakan untuk mengendalikan motor dan pompa yang terlibat dalam proses bongkar maupun transfer *caustic* soda. AOI ini dirancang untuk mengintegrasikan fungsi *start* dan *stop* motor, pemantauan status operasi, pengelolaan mode operasi, serta deteksi gangguan peralatan dalam satu blok instruksi yang terstandarisasi. Selain itu, AOI Motor2 juga dilengkapi dengan fitur delay *stop* yang digunakan untuk mengurangi potensi terjadinya water hammer pada sistem perpipaan.

Pada sistem *caustic* soda, AOI Motor2 digunakan pada tiga unit pompa, yaitu pompa PIT P0109 yang berfungsi untuk proses bongkar dari tangki PIT menuju tangki penyimpanan, pompa transfer P0110B_1 untuk jalur transfer 1A, dan pompa transfer P0110B_2 untuk jalur transfer 1B. Dengan penggunaan AOI yang sama pada seluruh pompa, logika pengendalian menjadi lebih konsisten dan mudah dipelihara.

AOI menerima beberapa parameter masukan utama, yaitu sinyal izin operasi (*Inp_Intlk*), perintah menjalankan pompa (*Cmd_Run*), perintah menghentikan pompa (*Cmd_Stop*), dan parameter waktu delay *stop* (*TimDlyStop*). Sinyal *interlock* digunakan sebagai validasi bahwa seluruh kondisi operasi telah terpenuhi sebelum pompa diizinkan untuk beroperasi. Perintah *run* dan *stop* berasal dari logika kontrol pada program PLC, sedangkan parameter delay *stop* digunakan untuk mengatur waktu penghentian pompa secara bertahap sesuai kebutuhan proses.

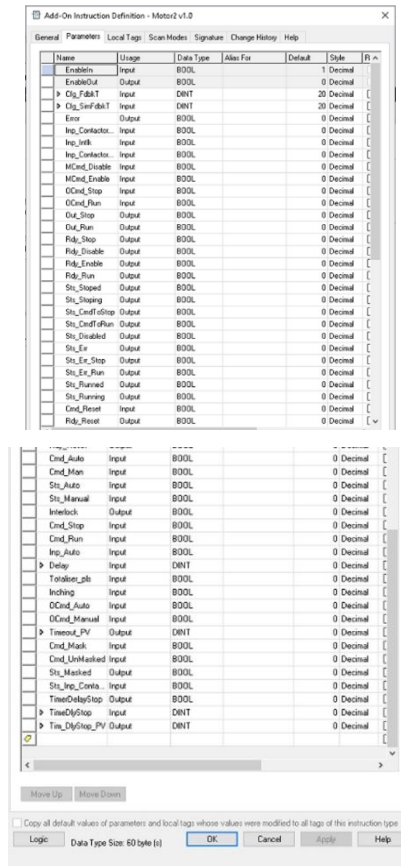
Output utama AOI berupa sinyal menjalankan motor (*Out_Run*) dan sinyal penghentian motor (*Out_Stop*) yang dikirimkan ke kontaktor atau

sistem penggerak motor. Selain itu, AOI menghasilkan berbagai status operasi seperti kondisi pompa sedang beroperasi (*Sts_Runned*), kondisi pompa berhenti normal (*Sts_Stoped*), serta status *TimerDelayStop* yang menunjukkan bahwa proses penghentian pompa masih berlangsung. Informasi status tersebut digunakan oleh logika kontrol lain sebagai bagian dari sequence operasi dan *interlock* sistem.

Untuk meningkatkan keandalan operasi, AOI Motor2 juga dilengkapi dengan fungsi deteksi gangguan yang terdiri dari status error umum (*Error*), status kesalahan operasi (*Sts_Err*), kesalahan saat proses *start* (*Sts_Err_Run*), dan kesalahan saat proses *stop* (*Sts_Err_Stop*). Apabila terdeteksi kondisi abnormal selama operasi, informasi gangguan akan diteruskan ke sistem *interlock* sehingga proses bongkar maupun transfer dapat dihentikan secara aman.

Sebagai contoh implementasi pada pompa transfer P0110B_1, pompa hanya dapat dijalankan apabila seluruh kondisi *interlock* telah terpenuhi dan perintah *run* diberikan oleh program PLC. Setelah menerima perintah tersebut, AOI akan mengaktifkan sinyal keluaran menuju kontaktor motor sehingga pompa mulai beroperasi. Pada saat proses transfer dihentikan, AOI tidak langsung mematikan pompa, tetapi terlebih dahulu mengaktifkan fungsi *delay stop*. Selama periode ini, status *TimerDelayStop* akan aktif dan digunakan oleh logika kontrol untuk mengatur urutan penutupan valve. Setelah waktu delay selesai, pompa dihentikan secara normal dan sistem melanjutkan tahapan penghentian proses sesuai sequence yang telah dirancang.

Penerapan AOI Motor2 pada sistem *caustic* soda memberikan beberapa keuntungan, antara lain menjaga konsistensi pengendalian pompa, mempermudah implementasi *interlock*, meningkatkan keamanan operasi, serta mengurangi risiko gangguan hidraulik akibat penghentian aliran secara mendadak. Dengan demikian, AOI ini menjadi salah satu komponen utama dalam implementasi sistem Rule-Based *Interlock* pada proses bongkar dan transfer *caustic* soda. Pada **Gambar 3.12** ditampilkan *input output* AOI Motor2.



Gambar 3.12 AOI Parameter Pada Motor

3.9.2.4. AOI TransferTank

AOI (Add-On Instruction) TransferTank merupakan instruksi utama yang digunakan untuk mengendalikan logika proses bongkar dan transfer pada sistem *caustic* soda. AOI ini berfungsi sebagai penghubung antara logika *interlock*, perintah operator, dan pengendalian peralatan di lapangan. Dengan menggunakan AOI TransferTank, proses bongkar maupun transfer dapat dijalankan secara terstruktur berdasarkan kondisi keselamatan dan persyaratan operasi yang telah ditentukan.

Pada sistem yang dirancang, AOI TransferTank digunakan pada empat proses utama, yaitu proses bongkar *caustic* (T1_3), transfer jalur 1A (Route_1A), transfer jalur 1B (Route_1B), dan transfer menuju tangki TYP (Route_1C). Setiap instance AOI memiliki fungsi yang sama, yaitu memvalidasi kondisi *interlock* dan menentukan status aktif atau tidaknya suatu proses transfer.

AOI TransferTank menerima dua parameter *interlock* utama, yaitu *Interlock_Transfer.0* dan *Interlock_Transfer.1*. Parameter *Interlock_Transfer.0* digunakan sebagai *safety interlock* yang berisi kondisi-kondisi pengaman terkait status peralatan, seperti valve, pompa, level cairan, dan kondisi fault lainnya. Apabila salah satu kondisi pengaman tidak terpenuhi, maka parameter ini akan aktif sebagai sinyal blocking sehingga proses tidak dapat dijalankan. Sementara itu, *Interlock_Transfer.1* digunakan sebagai *process interlock* yang berfungsi memverifikasi bahwa kondisi proses mengizinkan transfer untuk dilakukan, misalnya tidak terdapat jalur transfer lain yang sedang aktif atau kondisi operasi lain yang dapat menimbulkan konflik proses.

Output utama dari AOI TransferTank adalah tag *Sts_Transfer_Running* yang menunjukkan status proses transfer atau bongkar sedang berlangsung. Tag ini berfungsi sebagai referensi utama bagi subroutine *_01_Equipment* untuk menentukan peralatan mana yang harus dioperasikan selama proses berlangsung. Dengan demikian, AOI TransferTank tidak secara langsung mengendalikan valve maupun pompa, tetapi berperan sebagai pengendali logika proses yang memberikan izin operasi kepada peralatan terkait.

Pada proses bongkar *caustic* menggunakan instance T1_3, AOI TransferTank menerima informasi dari *safety interlock* dan *process interlock* yang dibangun pada subroutine *_02_Bongkar*. Ketika tidak terdapat kondisi blocking, kondisi proses dinyatakan aman, dan operator memberikan perintah *start* melalui SCADA, AOI akan mengaktifkan status *Sts_Transfer_Running*. Status ini kemudian dibaca oleh subroutine *_01_Equipment* untuk membuka valve inlet KV1_3_IN dan menjalankan pompa PIT P0109 sesuai urutan operasi yang telah dirancang.

Prinsip kerja yang sama diterapkan pada proses transfer Route_1A, Route_1B, dan Route_1C. Setelah seluruh kondisi *interlock* terpenuhi dan proses diizinkan untuk berjalan, AOI TransferTank akan

mengaktifkan status transfer sehingga subroutine equipment dapat menjalankan sequence operasi yang diperlukan. Sebagai contoh pada Route_1A, status transfer yang aktif akan digunakan untuk membuka valve outlet utama KV1_0, membuka valve transfer KV1A_0, dan menjalankan pompa transfer P0110B_1. Dengan mekanisme ini, AOI TransferTank berfungsi sebagai pusat koordinasi yang memastikan seluruh tahapan proses berjalan sesuai urutan dan hanya dapat dieksekusi ketika kondisi operasi dinyatakan aman.

Penerapan AOI TransferTank memberikan keuntungan berupa standarisasi logika proses, kemudahan pengembangan program, serta peningkatan keandalan sistem *interlock*. Selain itu, penggunaan AOI ini memungkinkan implementasi konsep *Rule-Based Interlock* secara konsisten pada seluruh proses bongkar dan transfer yang terdapat pada sistem *caustic* soda. **Gambar 3.13** menampilkan *input output* AOI TransferTank.

Name	Usage	Data Type	Alias For	Default	Style	Req	Vis	Description	External Access	Cor
EnableIn	Input	BOOL		1	Decimal			Enable Input - Sys...	Read Only	
EnableOut	Output	BOOL		0	Decimal			Enable Output - S...	Read Only	
Start_Transfer	Input	BOOL		0	Decimal				Read/Write	
Stop_Transfer	Input	BOOL		0	Decimal				Read/Write	
Interlock_Trans	Input	DINT		0	Decimal				Read/Write	
Alarm_Transfer	Input	DINT		0	Decimal				Read/Write	
Cmd_Enabled	Input	BOOL		0	Decimal				Read/Write	
Cmd_Disabled	Input	BOOL		0	Decimal				Read/Write	
Str_Transfer	Output	BOOL		0	Decimal				Read Only	
TransferCmd	Input	DINT		0	Decimal				Read/Write	
TransferSta	Input	DINT		0	Decimal				Read/Write	
Str_Disabled	Output	BOOL		0	Decimal				Read Only	
Interlock	Output	BOOL		0	Decimal				Read Only	

Gambar 3.13 AOI Parameter Untuk Transfer Tank

3.9.3 Perancangan *Rule Base Interlock*

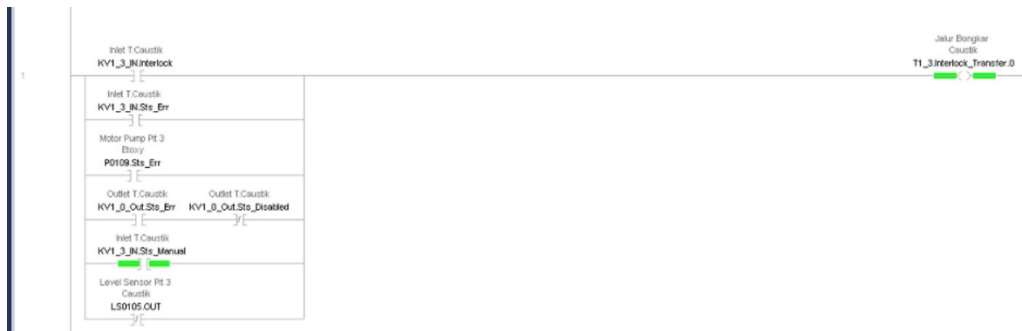
Metode *Rule-Based Interlock* diterapkan untuk memastikan bahwa seluruh proses bongkar dan transfer *caustic* soda hanya dapat dijalankan ketika kondisi operasi memenuhi persyaratan keselamatan dan keandalan yang telah ditentukan. Pada sistem yang dirancang, setiap aturan (rule) direalisasikan menggunakan kombinasi logika kontak NO/NC pada ladder diagram, parameter *interlock* pada AOI, serta pertukaran status antar subroutine PLC. Dengan pendekatan ini, PLC dapat melakukan validasi

kondisi peralatan dan proses secara otomatis sebelum memberikan izin operasi. Berikut **Tabel 3.7** adalah tabel untuk aturan atau rule yang dibuat:

Tabel 3.7 Implementasi Rule Based Interlock

Rule	Tujuan	Implementasi
1	Proteksi equipment fault	<i>Interlock</i> valve dan pompa
2	Mencegah dry <i>running</i>	Level switch LS0105
3	Mencegah bongkar saat transfer aktif	Process <i>interlock</i>
4	Mutual exclusion Route 1A & 1B	Cross <i>interlock</i>
5	Sequence pembukaan valve	Feedback Sts_Opened
6	Anti water hammer saat <i>start</i>	Timer delay 5 s
7	Anti water hammer saat <i>stop</i>	Delay <i>stop</i> + delayed valve close

Aturan pertama menyatakan bahwa proses tidak boleh dijalankan apabila terdapat peralatan yang mengalami gangguan atau berada pada kondisi yang tidak diizinkan untuk beroperasi. PLC melakukan pemantauan terhadap status valve inlet KV1_3_IN, valve outlet KV1_0, pompa PIT P0109, serta pompa transfer P0110B_1. Apabila salah satu peralatan berada pada status error atau fault, maka tag *interlock* akan aktif dan proses diblokir secara otomatis. Tujuan dari aturan ini adalah mencegah pengoperasian sistem pada kondisi yang berpotensi menimbulkan kerusakan peralatan maupun gangguan proses. **Gambar 3.14** merupakan implementasi dari rule pertama.



Gambar 3.14 Routine Bongkar Untuk *Interlock* Rule 1

Aturan kedua menyatakan bahwa pompa PIT hanya dapat beroperasi apabila terdapat cairan pada tangki sumber. Validasi dilakukan menggunakan sinyal level switch LS0105 yang diproses melalui AOI level switch. Ketika level cairan berada di atas batas minimum, PLC memberikan izin operasi kepada pompa melalui parameter *interlock*. Sebaliknya, apabila tangki dalam kondisi kosong, izin operasi pompa dicabut sehingga pompa tidak dapat dijalankan meskipun terdapat perintah *run*. Aturan ini diterapkan untuk mencegah terjadinya *dry running* yang dapat menyebabkan kerusakan pada pompa. **Gambar 3.15** merupakan implementasi dari rule kedua



Gambar 3.15 Routine Equipment *Rung* 0 dan 8 Untuk *Interlock* Rule 2

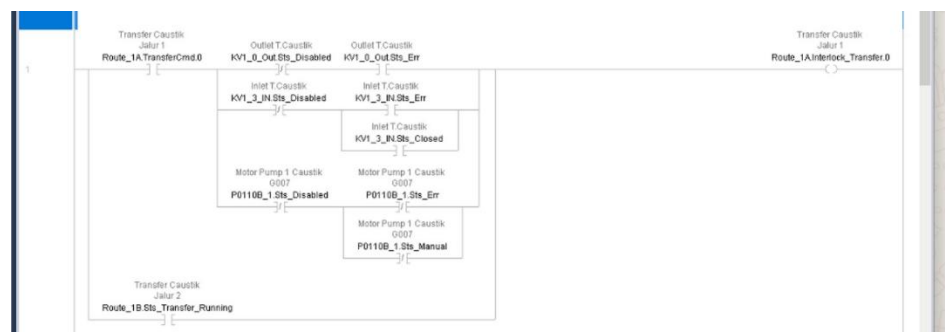
Aturan ketiga digunakan untuk mencegah proses bongkar dijalankan saat terdapat proses transfer yang masih aktif pada tangki yang sama. PLC melakukan pemeriksaan terhadap status transfer pada Route 1A dan Route 1B. Apabila salah satu jalur sedang beroperasi atau masih memiliki perintah transfer aktif, maka proses bongkar tidak diizinkan untuk dimulai. Dengan demikian, konflik operasi yang dapat mengganggu kestabilan proses dapat dihindari. Pada **Gambar 3.16** merupakan implementasi dari rule ketiga



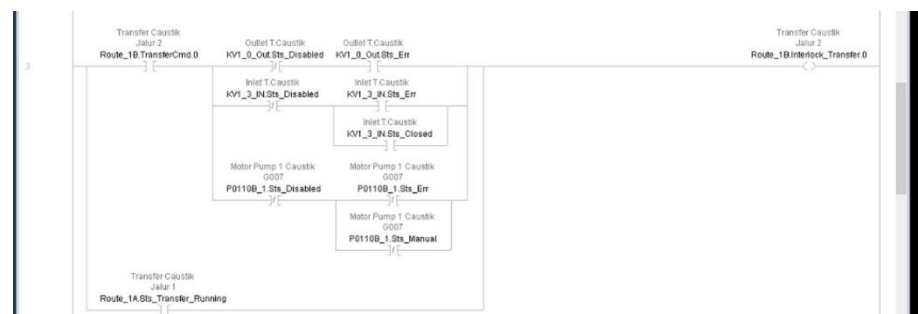
Gambar 3.16 Routine Bongkar *Rung 2* Untuk Rule *Interlock 3*

Aturan keempat menerapkan konsep mutual exclusion pada jalur transfer Route 1A dan Route 1B. Kedua jalur menggunakan sumber daya yang sama berupa tangki dan pompa transfer sehingga tidak diperbolehkan beroperasi secara bersamaan. Ketika salah satu jalur transfer aktif, PLC akan mengaktifkan *interlock* pada jalur lainnya sehingga perintah transfer kedua tidak dapat dijalankan sampai jalur pertama selesai beroperasi. Mekanisme ini memastikan penggunaan peralatan dilakukan secara aman dan terkoordinasi.

Gambar 3.17 dan 3.18 merupakan implementasi dari rule keempat



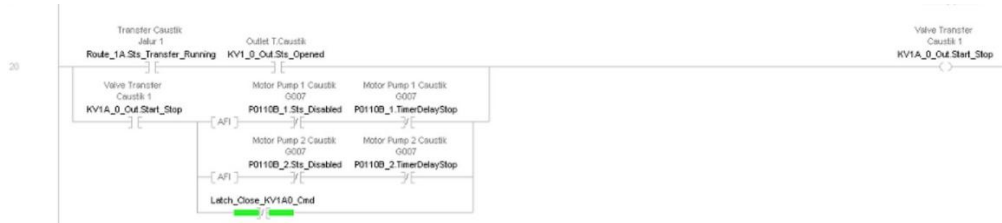
Gambar 3.17 Routine Transfer *Rung 1* Untuk Rule *Interlock 4*



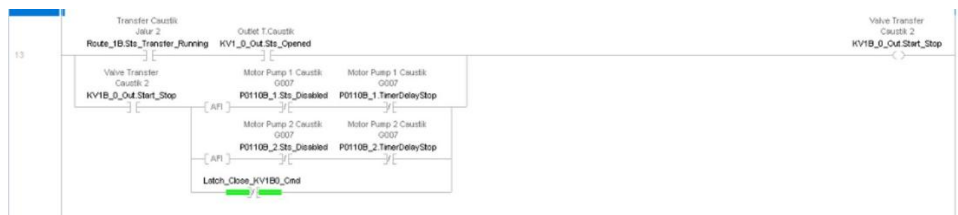
Gambar 3.18 Routine Transfer *Rung 3* Untuk Rule *Interlock 4*

Aturan kelima mengatur urutan pembukaan valve pada proses transfer. Valve transfer hanya diperbolehkan membuka setelah valve outlet utama KV1_0 berada pada kondisi terbuka penuh. PLC memverifikasi status

feedback valve utama sebelum memberikan perintah buka kepada valve transfer. Dengan penerapan aturan ini, aliran fluida dapat berjalan melalui jalur yang telah tersedia sehingga risiko tekanan berlebih akibat jalur tertutup dapat diminimalkan. Pada **Gambar 3.19 dan 3.20** merupakan implementasi dari rule kelima

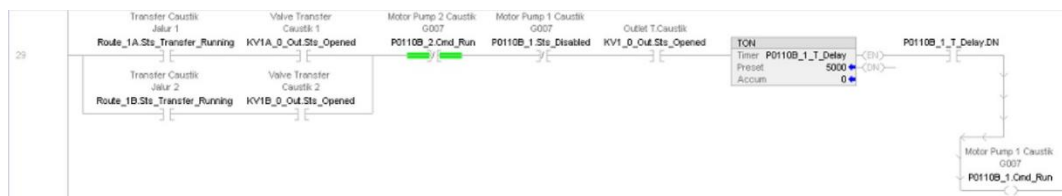


Gambar 3.19 Routine Equipment *Rung 20* Untuk Rule *Interlock 5*



Gambar 3.20 Routine Equipment *Rung 13* Untuk Rule *Interlock 5*

Aturan keenam menyatakan bahwa pompa transfer hanya dapat dijalankan setelah seluruh valve yang terlibat dalam jalur transfer berada pada kondisi terbuka penuh. Selain itu, diterapkan delay *start* selama 5 detik setelah seluruh valve terbuka. Delay ini bertujuan untuk memberikan waktu stabilisasi aliran dan mengurangi potensi terjadinya water hammer pada sistem perpipaan. Setelah timer selesai, PLC mengaktifkan perintah *run* pompa dan proses transfer dimulai. Pada **Gambar 3.21** merupakan implementasi dari rule keenam.



Gambar 3.21 Routine Equipment *Rung 29* Untuk Rule *Interlock 6*

Aturan ketujuh mengatur proses penghentian transfer. Ketika proses transfer dihentikan, pompa tidak langsung dimatikan secara mendadak melainkan melalui mekanisme delay *stop* yang dikendalikan oleh AOI motor.

Setelah pompa berhenti sepenuhnya, PLC menunggu beberapa detik sebelum mengirimkan perintah penutupan valve transfer. Urutan ini dirancang untuk memberikan waktu bagi aliran fluida di dalam pipa untuk mereda sehingga risiko water hammer dapat dikurangi. Setelah seluruh timer selesai, sistem kembali ke kondisi standby dan siap menjalankan siklus operasi berikutnya. Pada **Gambar 3.22** merupakan implementasi dari rule ketujuh.

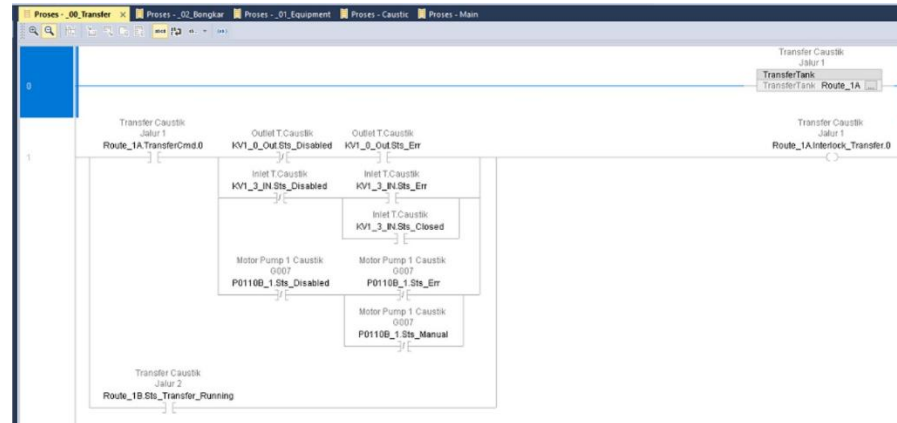


Gambar 3.22 Routine Equipment Rung 14 – 16 Untuk Rule *Interlock 7*

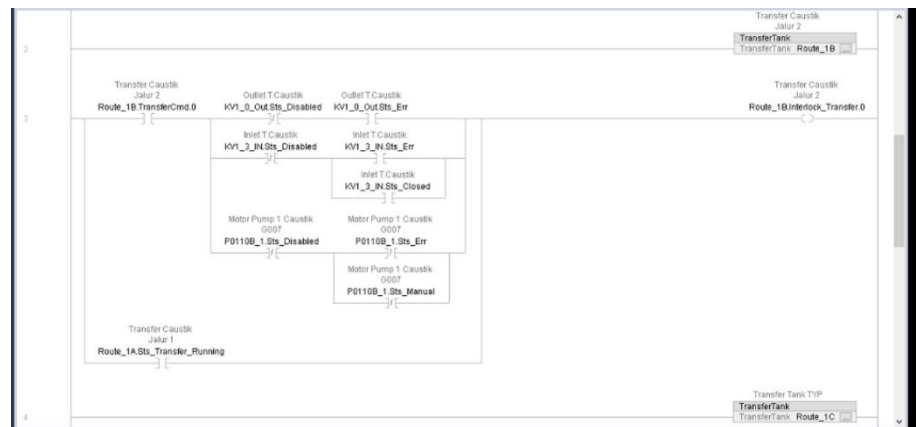
3.9.4 Perancangan Sistem Bongkar

Pada PROSES_02_BONGKAR, Rung 0 **Gambar 3.25** merupakan pemanggilan instance TransferTank AOI T1_3 yang berfungsi sebagai *gate logic* untuk mengendalikan proses bongkar dan menghasilkan status T1_3.Sts_Transfer_Running. Selanjutnya, pada Rung 1 **Gambar 3.23**, dilakukan pemeriksaan kondisi *safety blocking* melalui beberapa kondisi, yaitu status *interlock*, *error* pada valve dan pompa, kondisi *disabled*, mode manual, serta status level switch LS0105. Apabila tidak terdapat kondisi abnormal, seluruh kontak *normally open* (NO) tidak aktif sehingga $T1_3.Interlock_Transfer.0 = 0$ dan proses tidak mengalami *blocking*. Sebaliknya, apabila salah satu kondisi tidak aman terpenuhi, seperti $KV1_3.IN.Sts_Err = 1$, maka jalur menjadi aktif dan $T1_3.Interlock_Transfer.0 = 1$ sehingga proses bongkar diblokir. Pada Rung 2 **Gambar 3.24**, dilakukan pemeriksaan terhadap kemungkinan konflik dengan proses transfer Route 1A dan Route 1B menggunakan kontak *normally closed* (NC) yang disusun seri. Ketika tidak terdapat proses transfer yang sedang berjalan maupun perintah transfer aktif, seluruh kontak NC tetap terhubung sehingga $T1_3.Interlock_Transfer.1 = 1$ sebagai *permissive*.

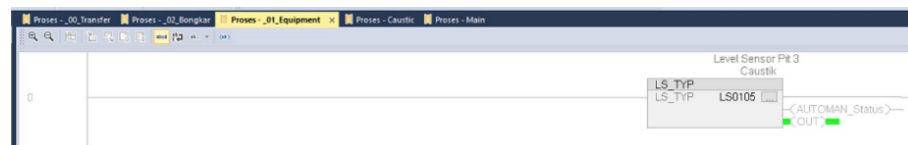
Namun, apabila salah satu Route 1A atau Route 1B sedang melakukan transfer, kontak NC akan terbuka sehingga *permissive* menjadi 0 dan proses bongkar diblokir untuk mencegah dua proses berjalan secara bersamaan.



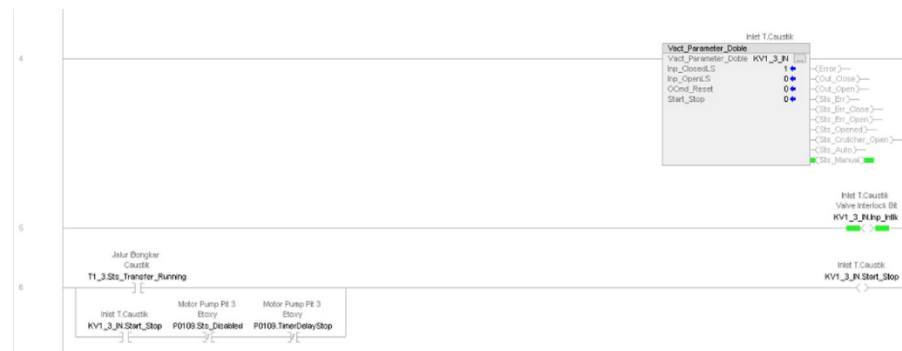
Gambar 3.23 Routine Bongkar Rung 0 dan 1



Gambar 3.24 Routine Bongkar Rung 2



Gambar 3.25 Routine Equipment Rung 0



Gambar 3.26 Routine Equipment *Rung 4 – 6*

Pada PROSES_01_EQUIPMENT, Rung 5 **Gambar 3.26** memberikan izin operasi dasar kepada valve inlet KV1_3_IN dengan menetapkan Inp_Intlk = 1 secara *unconditional*. Selanjutnya, Rung 6 memberikan perintah membuka valve ketika T1_3.Sts_Transfer_Running = 1, sehingga KV1_3_IN.Start_Stop = 1 diteruskan ke Vact AOI. Jika valve berada pada mode otomatis dan tidak terdapat *interlock*, maka Sts_CmdToOpen = 1 dan Out_Open = 1 sehingga solenoid valve terenergize dan valve mulai membuka. Setelah valve mencapai posisi terbuka penuh, *limit switch* memberikan feedback melalui Inp_OpenLS = 1, sehingga Sts_Opened = 1 sebagai konfirmasi bahwa valve telah terbuka



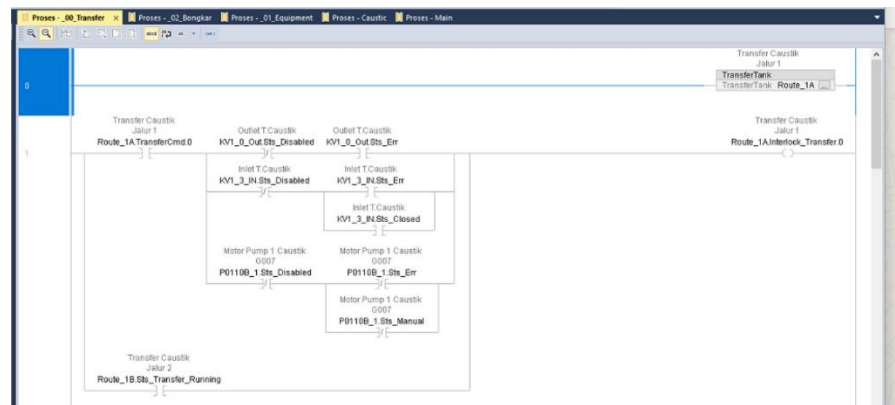
Gambar 3.27 Routine Equipment *Rung 7 – 10*

Pada Rung 8 **Gambar 3.27**, PLC memberikan izin operasi kepada pompa P0109 berdasarkan LS0105.OUT = 1, yang menunjukkan kondisi level cairan

memenuhi syarat sehingga pompa dapat beroperasi dan terlindung dari kondisi *dry running*. Rung 9 mengatur perintah penghentian pompa berdasarkan T1_3.Sts_Transfer_Running; ketika proses bongkar aktif, Cmd_Stop = 0, sedangkan ketika proses berhenti, Cmd_Stop = 1. Kemudian pada Rung 10, perintah Cmd_Run = 1 hanya diberikan apabila T1_3.Sts_Transfer_Running = 1 dan KV1_3_IN.Sts_Opened = 1, sehingga pompa baru dapat berjalan setelah valve inlet dipastikan terbuka penuh. Kondisi ini diteruskan ke Motor2 AOI dan apabila mode otomatis serta *interlock* terpenuhi, Out_Run = 1 sehingga kontaktor aktif dan pompa P0109 berjalan. Persyaratan valve harus terbuka terlebih dahulu bertujuan mencegah *dead-head pumping*, yaitu kondisi pompa bekerja ketika jalur aliran masih tertutup.

3.9.5 Perancangan Proses Transfer

Pada PROSES_00_TRANSFER **Gambar 3.28**, proses diawali ketika operator menekan START TRANSFER pada SCADA sehingga Start_Transfer = 1 dan *TransferTank AOI* pada Route_1A menjadi aktif. Selanjutnya, pada Rung 1 dilakukan pemeriksaan kondisi *safety blocking* untuk memastikan Route_1A dapat dijalankan. Kondisi yang diperiksa meliputi status perintah transfer, kondisi *disabled* dan *error* pada valve serta pompa, status KV1_3_IN.Sts_Closed untuk memastikan valve inlet dalam keadaan tertutup, serta kondisi pompa pada mode manual. Selain itu, diperiksa pula status Route_1B.Sts_Transfer_Running sebagai mekanisme *mutual exclusion* agar Route_1A tidak dapat berjalan ketika Route_1B sedang melakukan transfer. Apabila seluruh kondisi berada dalam keadaan aman, Route_1A.Interlock_Transfer = 0 sehingga proses transfer Route_1A diperbolehkan. Sebaliknya, apabila salah satu kondisi *blocking* terpenuhi, misalnya Route_1B sedang aktif, maka Route_1A.Interlock_Transfer menjadi aktif dan proses Route_1A diblokir.



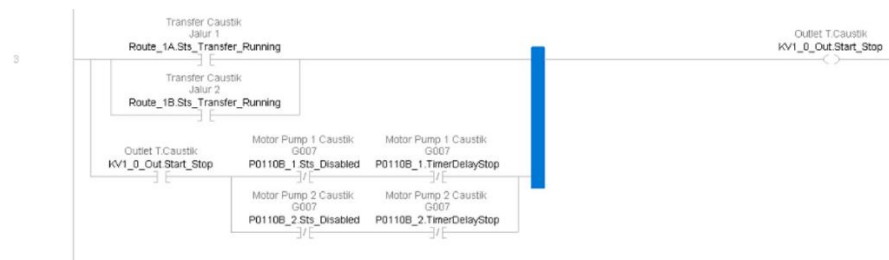
Gambar 3.28 Routine Proses Transfer Route 1A

Pada PROSES_01_EQUIPMENT Rung 2 **Gambar 3.29**, dilakukan pemeriksaan kondisi seluruh peralatan *downstream* sebelum valve outlet KV1_0_Out diberikan izin operasi. Kondisi yang diperiksa meliputi status *Auto* dan *Disabled* pada valve transfer KV1A_0 dan KV1B_0, serta pompa transfer P0110B_1 dan P0110B_2. Karena seluruh kondisi disusun secara seri (AND), semua peralatan harus berada pada mode Auto dan tidak dalam kondisi Disabled agar KV1_0_Out.Inp_Intlk = 1. Jika salah satu peralatan tidak berada pada kondisi yang dipersyaratkan, izin interlock menjadi tidak aktif sehingga valve outlet diblokir dan proses transfer tidak dapat dimulai.

Pada Rung 3 **Gambar 3.30**, perintah pembukaan valve outlet KV1_0_Out diberikan apabila salah satu rute transfer, yaitu Route_1A atau Route_1B, berada dalam kondisi *Transfer Running*. Kondisi tersebut disusun secara paralel (OR), sehingga salah satu rute yang aktif sudah cukup untuk memberikan perintah Start_Stop = 1. Perintah tersebut diteruskan ke Vact AOI dan menghasilkan Out_Open = 1 sehingga KV1_0 mulai membuka secara fisik. Setelah valve mencapai posisi terbuka penuh, *limit switch* memberikan feedback melalui Inp_OpenLS = 1 dan menghasilkan KV1_0.Sts_Opened = 1. Status *Opened* ini kemudian menjadi salah satu syarat bahwa valve transfer berikutnya dapat diperintahkan untuk membuka.

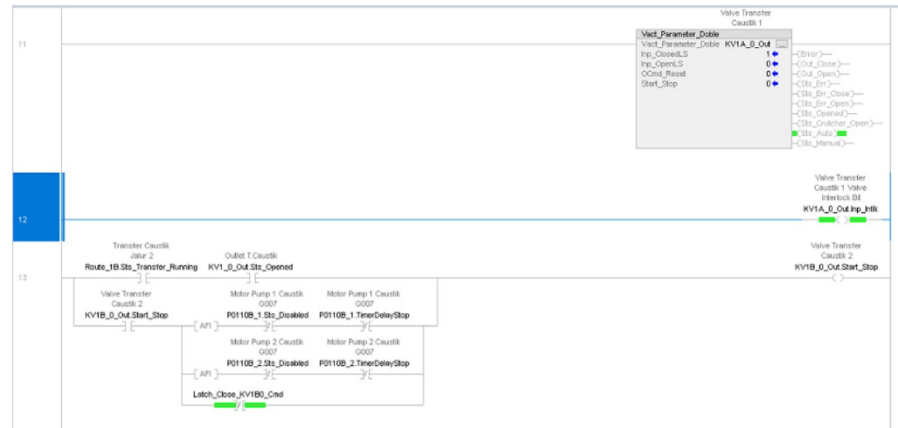


Gambar 3.29 Routine Equipment *Rung* 1 dan 2



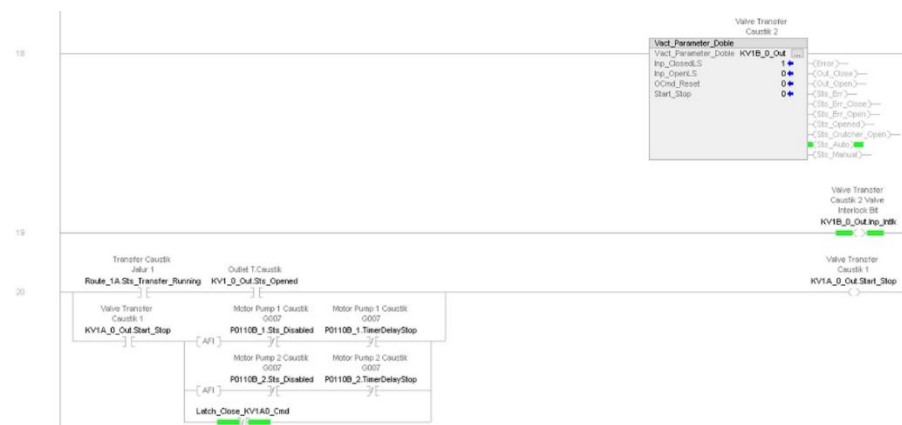
Gambar 3.30 Routine Equipment *Rung* 3

Pada Rung 13 **Gambar 3.31**, perintah pembukaan valve transfer KV1B_0 bekerja dengan prinsip yang sama seperti Rung 20 **Gambar 3.32** pada Route_1A, tetapi diterapkan pada Route_1B. Valve KV1B_0 hanya diperintahkan membuka apabila Route_1B.Sts_Transfer_Running = 1 dan KV1_0_Out.Sts_Opened = 1, serta tidak terdapat perintah *Latch Close* dan pompa P0110B_1 tidak dalam kondisi *Disabled*. Setelah seluruh kondisi terpenuhi, KV1B_0.Start_Stop = 1 diteruskan ke Vact AOI sehingga valve KV1B_0 membuka secara fisik. Ketika posisi valve telah terbuka penuh, *limit switch* memberikan feedback sehingga KV1B_0.Sts_Opened = 1, yang menjadi konfirmasi bahwa valve transfer Route_1B telah berada pada posisi terbuka dan siap untuk tahapan proses berikutnya.



Gambar 3.31 Routine Equipment *Rung* 11 – 13

Pada Rung 20 **Gambar 3.32**, perintah pembukaan valve transfer KV1A_0 hanya diberikan apabila seluruh kondisi yang dipersyaratkan terpenuhi, yaitu $\text{Route_1A.Sts_Transfer_Running} = 1$, $\text{KV1_0_Out.Sts_Opened} = 1$, tidak terdapat perintah *Latch Close*, serta pompa P0110B_1 dan P0110B_2 tidak dalam kondisi *Disabled*. Setelah kondisi tersebut terpenuhi, $\text{KV1A_0.Start_Stop} = 1$ diteruskan ke Vact AOI sehingga $\text{Out_Open} = 1$ dan valve KV1A_0 mulai membuka. Ketika valve telah mencapai posisi terbuka penuh, *limit switch* memberikan feedback $\text{Inp_OpenLS} = 1$ sehingga $\text{KV1A_0.Sts_Opened} = 1$. Status ini kemudian menjadi salah satu *permissive* untuk tahapan berikutnya, yaitu pengoperasian pompa setelah *delay* yang telah ditentukan. Urutan ini diterapkan untuk memastikan valve outlet utama KV1_0 terbuka terlebih dahulu sebelum valve transfer, sehingga jalur aliran telah tersedia dan risiko tekanan balik pada sistem dapat diminimalkan.



Gambar 3.32 Routine Equipment *Rung* 18 dan 20



Gambar 3.33 Routine Equipment *Rung 21 – 24*

Pada Rung 26 **Gambar 3.34**, dilakukan pengaturan *preset timer* untuk *delay start* pompa transfer menggunakan instruksi CPT, yaitu $P0110B_1_T_Delay.PRE = SP_OpenLine \times 1000$, sehingga nilai *setpoint* $SP_OpenLine$ dari SCADA dikonversi dari satuan detik menjadi milidetik dan digunakan sebagai waktu tunggu sebelum pompa dijalankan; misalnya apabila $SP_OpenLine = 5$, maka *preset timer* menjadi 5000 ms atau 5 detik. Selanjutnya, pada Rung 28 diatur perintah penghentian pompa transfer P0110B_1 berdasarkan status $Route_1A.Sts_Transfer_Running$ dan $Route_1B.Sts_Transfer_Running$ yang menggunakan kontak NC secara paralel. Ketika salah satu route aktif, kontak NC pada route tersebut terbuka sehingga $Cmd_Stop = 0$ dan tidak terdapat perintah penghentian sehingga pompa tetap dapat beroperasi. Sebaliknya, ketika seluruh route berhenti atau bernilai 0, seluruh kontak NC kembali terhubung sehingga $Cmd_Stop = 1$, perintah tersebut diteruskan ke Motor2 AOI, kemudian $Out_Run = 0$ dan pompa P0110B_1 berhenti.



Gambar 3.34 Routine Equipment *Rung 25 – 28*

Pada Rung 29 **Gambar 3.35**, perintah *run* pompa transfer P0110B_1 hanya diberikan setelah seluruh kondisi operasi terpenuhi.

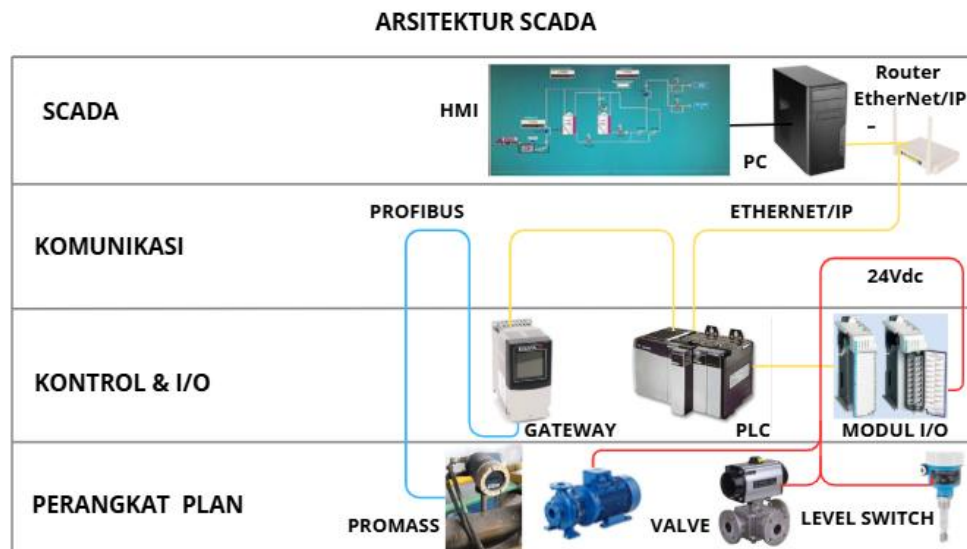
Route_1A.Sts_Transfer_Running harus aktif, KV1A_0.Sts_Opened dan KV1_0_Out.Sts_Opened harus menunjukkan bahwa valve transfer dan valve outlet telah terbuka penuh, sedangkan P0110B_2.Cmd_Run harus dalam kondisi tidak aktif dan P0110B_1.Sts_Disabled tidak aktif. Setelah seluruh kondisi tersebut terpenuhi, TON P0110B_1_T_Delay mulai menghitung sesuai nilai *preset* dari $SP_OpenLine \times 1000$. Setelah waktu *delay* selesai dan $Timer.DN = 1$, PLC memberikan $P0110B_1.Cmd_Run = 1$ yang diteruskan ke Motor2 AOI sehingga $Out_Run = 1$, kontaktor aktif, dan pompa P0110B_1 mulai beroperasi. Dengan demikian, Rung 29 memastikan pompa tidak langsung menyala ketika perintah transfer diberikan, tetapi baru berjalan setelah urutan valve terpenuhi dan *delay* yang telah ditentukan selesai.



Gambar 3.35 Routine Equipment *Rung 29 – 31*

3.10 Arsitektur Komunikasi Sistem

Sistem kontrol dan monitoring tangki *caustic* soda pada penelitian ini terdiri atas beberapa perangkat yang saling terhubung melalui jalur komunikasi industri untuk mendukung proses monitoring dan pengendalian secara terintegrasi. Jalur komunikasi yang digunakan meliputi komunikasi EtherNet/IP sebagai jaringan utama antara PLC, SCADA, dan *linking device*, serta PROFIBUS PA sebagai media komunikasi antara instrumen lapangan (*field device*) dengan *linking device*. Arsitektur komunikasi tersebut memungkinkan seluruh data proses, seperti level tangki, laju aliran, totalizer, serta status aktuator, dapat dipertukarkan secara real-time sehingga mendukung implementasi logika *rule-based interlock* pada PLC. Secara umum, arsitektur komunikasi sistem dapat digambarkan seperti pada **Gambar 3.36**



Gambar 3.36 Arsitektur SCADA

Pada sistem ini, komunikasi EtherNet/IP digunakan sebagai jaringan utama (*industrial Ethernet*) yang menghubungkan PLC CompactLogix dengan komputer SCADA serta *linking device* 1788-EN2PAR. Melalui jaringan ini, PLC mengirimkan data status aktuator, parameter proses, dan alarm kepada SCADA untuk ditampilkan pada antarmuka operator. Sebaliknya, perintah operasi seperti *START*, *STOP*, maupun pemilihan proses bongkar dan transfer dikirimkan dari SCADA menuju PLC melalui jaringan EtherNet/IP.

Sementara itu, instrumen PROMASS dan PROMAG tidak berkomunikasi langsung dengan PLC, melainkan menggunakan protokol PROFIBUS PA. Pada jaringan ini, kedua flowmeter berfungsi sebagai slave device, sedangkan 1788-EN2PAR berperan sebagai PROFIBUS Master sekaligus *protocol gateway*. Gateway secara periodik melakukan proses polling terhadap setiap flowmeter untuk memperoleh data proses berupa nilai flowrate, totalizer, density, serta informasi diagnostik perangkat.

Data yang diterima dari jaringan PROFIBUS PA selanjutnya dipetakan (*mapping*) oleh 1788-EN2PAR ke dalam format Assembly Data EtherNet/IP tanpa mengubah nilai hasil pengukuran. Dengan demikian, proses yang dilakukan gateway bukan menghitung ulang nilai pengukuran, melainkan mengubah format komunikasi sehingga data dapat dipahami oleh PLC CompactLogix. Selanjutnya PLC menyimpan data tersebut ke dalam tag

internal yang digunakan pada program Ladder Diagram, Add-On Instruction (AOI), serta ditampilkan pada sistem SCADA.

Untuk aktuator lapangan seperti Automatic Control Valve dan Motor Pump, komunikasi dilakukan melalui Digital *Input* (DI) dan Digital *Output* (DO) PLC menggunakan tegangan kontrol 24 VDC. PLC mengirimkan sinyal keluaran menuju coil *solenoid valve* dan coil kontaktor motor sebagai perintah aktuasi, sedangkan sinyal umpan balik (*feedback*) berasal dari Limit Switch, Level Switch, maupun kontak bantu kontaktor yang dihubungkan ke terminal Digital *Input* PLC. Informasi tersebut digunakan sebagai kondisi logika pada implementasi rule-based *interlock*, sehingga PLC dapat memverifikasi bahwa setiap aktuator telah mencapai kondisi yang diharapkan sebelum melanjutkan urutan operasi berikutnya.

Dengan kombinasi komunikasi EtherNet/IP, PROFIBUS PA, serta sinyal Digital I/O, sistem mampu membentuk arsitektur kontrol yang terintegrasi antara perangkat lapangan, PLC, dan SCADA. Arsitektur ini memungkinkan pertukaran data secara real-time, mendukung implementasi logika *rule-based interlock*, serta meningkatkan keandalan proses monitoring dan pengendalian pada sistem tangki *caustic soda*.

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

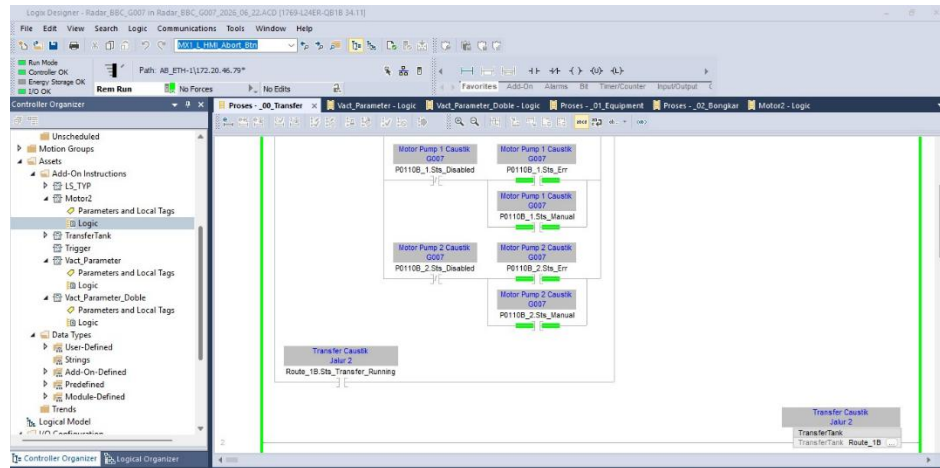
4.1 Pengujian Komponen Individual

Pengujian komponen individual dilakukan untuk memastikan bahwa setiap perangkat utama pada sistem kontrol dan monitoring tangki *caustic* dapat bekerja sesuai dengan fungsi dan spesifikasi yang dirancang. Tahap pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kinerja masing-masing komponen sebelum seluruh sistem diintegrasikan menjadi satu kesatuan sistem otomasi berbasis PLC dan SCADA. Selain itu, pengujian individual juga dilakukan untuk mengidentifikasi kemungkinan kesalahan pada wiring, komunikasi data, maupun respon aktuator yang dapat mempengaruhi keandalan sistem saat proses operasi berlangsung.

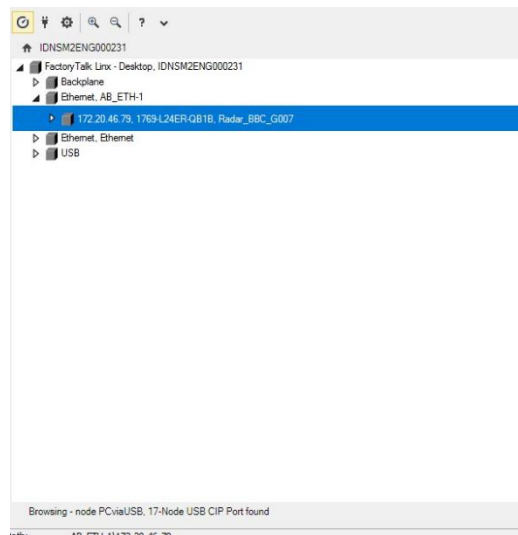
Pada penelitian ini, pengujian komponen dilakukan terhadap PLC sebagai pusat pengendali sistem, flowmeter dan gateway sebagai perangkat akuisisi serta komunikasi data proses, serta *solenoid valve* dan *automatic control valve* (ACV) sebagai aktuator pengendali aliran fluida. Setiap pengujian dilakukan dengan metode observasi langsung terhadap respon perangkat, pembacaan data pada PLC dan SCADA, serta validasi kesesuaian antara *input*, proses logika, dan *output* yang dihasilkan. Hasil pengujian ini menjadi dasar untuk memastikan bahwa seluruh komponen telah bekerja dengan baik sehingga sistem *permissive interlock* dapat diimplementasikan secara aman dan andal.

4.1.1 Pengujian PLC

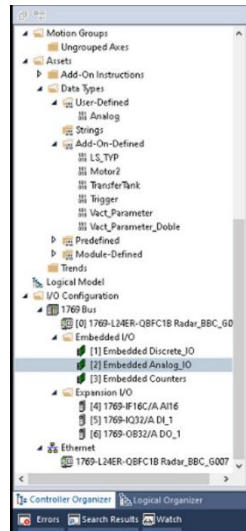
Pengujian PLC dilakukan untuk memastikan bahwa PLC Allen-Bradley CompactLogix L24ER dapat bekerja dengan baik sebagai pusat pengendali sistem. Pengujian meliputi pemeriksaan status komunikasi PLC pada **Gambar 4.2**, deteksi modul *input/output*, kemampuan eksekusi program pada **Gambar 4.3**, serta proses upload dan download program melalui software Studio 5000 pada **Gambar 4.1**. Selain itu, dilakukan juga pengecekan terhadap kondisi *scan time* PLC untuk memastikan proses eksekusi logika berjalan stabil dan sesuai dengan kebutuhan sistem kontrol yang dirancang.



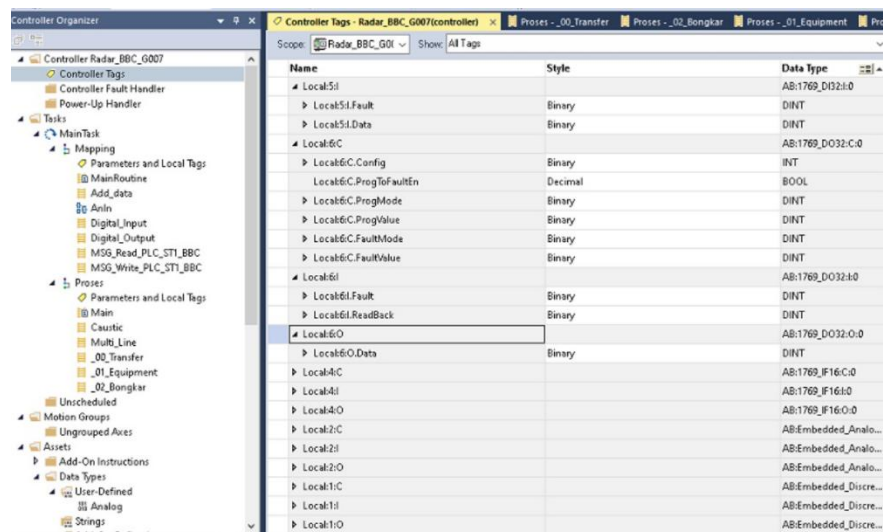
Gambar 4.1 Ladder *Runningg* (Online)



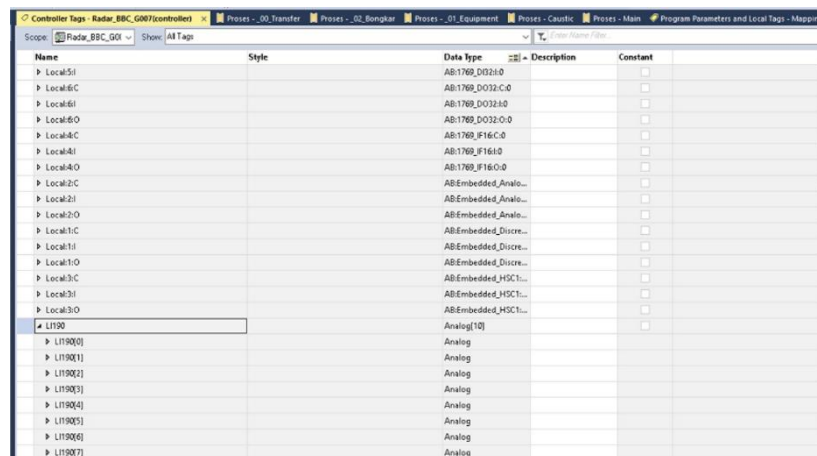
Gambar 4.2 Software Terhubung Dengan PLC



Gambar 4.3 Controller Tree pada PLC



Gambar 4.4 Tag Yang Digunakan Pada Program



Gambar 4.5 Tag Yang Digunakan Pada Program

Name	Style	Data Type	Description
MSG_Write		MESSAGE	
MSG_Write_PLC_TermST1		MESSAGE	
P_4000		Motor2	Motor Pump Etoxy G...
P0109		Motor2	Motor Pump Pit 3 Eto...
P0110B_1		Motor2	Motor Pump 1 Causti...
P0110B_2		Motor2	Motor Pump 2 Causti...
Delay_Unlatch_KV1A0		TIMER[3]	
Delay_Unlatch_KV1B0		TIMER[3]	
P_4000_T_Delay		TIMER	
P0110B_1_T_Delay		TIMER	
P0110B_2_T_Delay		TIMER	
TIMER_OFF		TIMER[8]	
Route_1A		TransferTank	Transfer Caustik Jalur 1
Route_1B		TransferTank	Transfer Caustik Jalur 2
Route_1C		TransferTank	Transfer Tank TYP
Route2_G007		TransferTank	Transfer Etoxy Jalur T...
T1_3		TransferTank	Jalur Bongkar Caustik
KV1A_0		Vact_Parameter	
KV1B_0		Vact_Parameter	
KV1_0_Out		Vact_Parameter_Doble	Outlet T.Caustik
KV1_3_IN		Vact_Parameter_Doble	Inlet T.Caustik
KV1A_0_Out		Vact_Parameter_Doble	Valve Transfer Caustik 1
KV1B_0_Out		Vact_Parameter_Doble	Valve Transfer Caustik 2
KV3M_7_IN		Vact_Parameter_Doble	Inlet T.Multi 3
KV4A_0_Out		Vact_Parameter_Doble	Outlet Etoxy Before P...

Gambar 4.6 Tag Yang Digunakan Pada Program

Name	Style	Data Type	Description	Constant
L1500[9]		Analog		
Delay_Close_KV1A_0	Decimal	BOOL		
Latch_Close_KV1A0	Decimal	BOOL		
Latch_Close_KV1A0_Cmd	Decimal	BOOL		
Latch_Close_KV1B0	Decimal	BOOL		
Latch_Close_KV1B0_Cmd	Decimal	BOOL		
Level_Pkt_Full	Decimal	BOOL		
P0109_Fsk_Run	Decimal	BOOL		
Test	Decimal	BOOL[12]		
Test_DI	Decimal	BOOL[12]		
Test_DO	Decimal	BOOL[12]		
Data_Read_PLC_ST1_BBC	Decimal	DINT		
Data_TO_PLC_ST1	Decimal	DINT		
Data_TO_PLC_Term_ST1	Decimal	DINT		
DINT_FORM_PLC_Term_ST1	Decimal	DINT		
DINT_TO_PLC_Term_ST1	Decimal	DINT		
P0110B_1_SP_OpenLine	Decimal	DINT		
P0110B_2_SP_OpenLine	Decimal	DINT		
Raw_Data	Decimal	DINT[64]		
Close_Oms_KV1A0	Decimal	INT		
Close_Oms_KV1B0	Decimal	INT		
LS0105		LS_TYP	Level Sensor Pit 3 Ca...	
MSG_Read		MESSAGE		
MSG_Write		MESSAGE		

Gambar 4.7 Tag Yang Digunakan Pada Program

Adapun parameter pengujian PLC yang dilakukan ditunjukkan pada **Tabel 4.1** berikut.

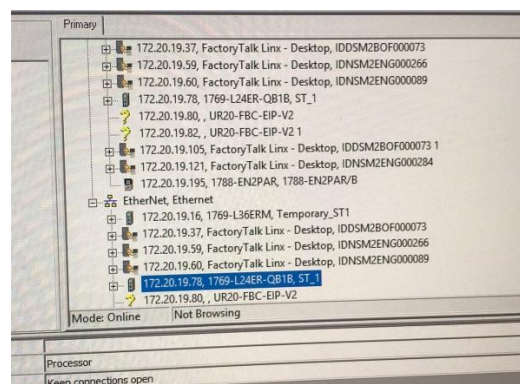
Tabel 4.1 Hasil pengujian PLC

Parameter Uji	Cara Pengujian	Yang Diharapkan	Hasil
Status PLC Online	Studio 5000 (Controller Properties)	Status PLC <i>Running</i> dan tidak major fault	Berhasil

Modul terdeteksi	DI	Studio (I/O Configuration)	5000	Semua modul <i>input</i> terdeteksi normal tanpa fault	Berhasil
Modul terdeteksi	DO	Studio (I/O Configuration)	5000	Semua modul <i>output</i> terdeteksi normal tanpa fault	Berhasil
Modul terdeteksi	AI	Studio (I/O Configuration)	5000	Semua modul analog terdeteksi normal tanpa fault	Berhasil
Upload/Download program		Studio	5000	Program dapat di-upload dan di-download tanpa error	Berhasil

4.1.2 Pengujian Konektivitas Sistem

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.2** perangkat PLC Control Room dengan IP 172.20.19.78 L24ER berhasil terdeteksi oleh sistem komunikasi dan berada pada kondisi online pada **Gambar 4.8**. Hasil ini menunjukkan bahwa PLC utama yang digunakan sebagai pusat pengendalian proses dapat diakses oleh perangkat lunak SCADA melalui RSLinx. Dengan koneksi yang berhasil, seluruh data proses dan status peralatan yang berada pada PLC dapat ditransmisikan ke sistem monitoring secara *real-time*.



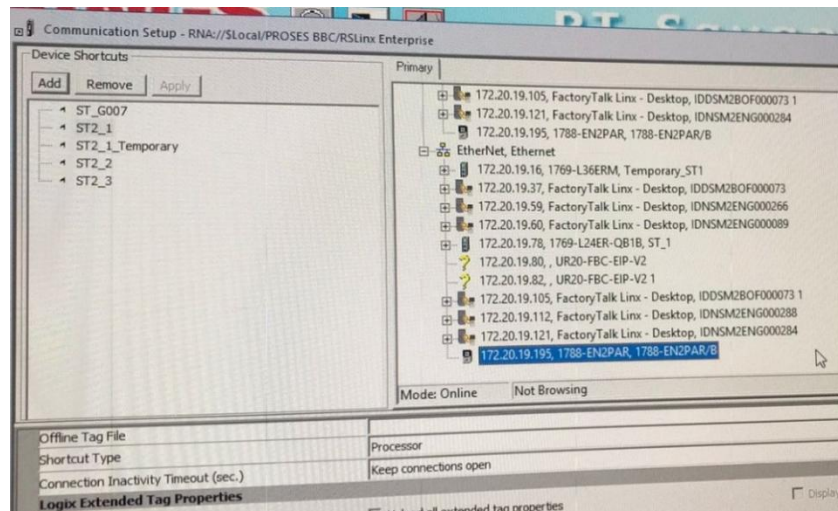
Gambar 4.8 IP PLC Terdeteksi Oleh RS Linx Enterprise

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Konektivitas

Parameter Uji	Cara Pengujian		Hasil
SCADA terhubung ke PLC	Verify Connection		Berhasil
Tag terbaca di SCADA	PLC	Buka display SCADA dan cek nilai tag	Berhasil
Perintah SCADA diterima PLC	Klik tombol pada SCADA dan monitor tag di Studio 5000		Berhasil

Keberhasilan koneksi menunjukkan bahwa pertukaran data antar PLC maupun antara PLC dan SCADA dapat berlangsung dengan baik sehingga mendukung koordinasi operasi sistem *caustic*.

Pengujian pada perangkat EN2PAR PROFIBUS Bridge dengan alamat IP 172.20.19.195 pada **Gambar 4.9** menunjukkan status terdeteksi dan online. Perangkat ini berfungsi sebagai gateway komunikasi yang menghubungkan jaringan EtherNet/IP dengan perangkat yang menggunakan protokol PROFIBUS. Hasil pengujian menunjukkan bahwa gateway dapat beroperasi dengan baik sehingga data dari perangkat PROFIBUS dapat diteruskan ke sistem kontrol tanpa kendala komunikasi.



Gambar 4.9 IP Gateway Profibus Terdeteksi

Selain pengujian perangkat keras, verifikasi pada aplikasi RSLinx menunjukkan bahwa seluruh perangkat berada dalam kondisi online dan dapat diakses oleh sistem SCADA. Hasil ini menandakan bahwa konfigurasi driver komunikasi, shortcut, dan jalur komunikasi telah berjalan dengan baik. Dengan demikian, proses pembacaan data, pengiriman perintah, dan pertukaran informasi antar perangkat dapat dilakukan secara normal.

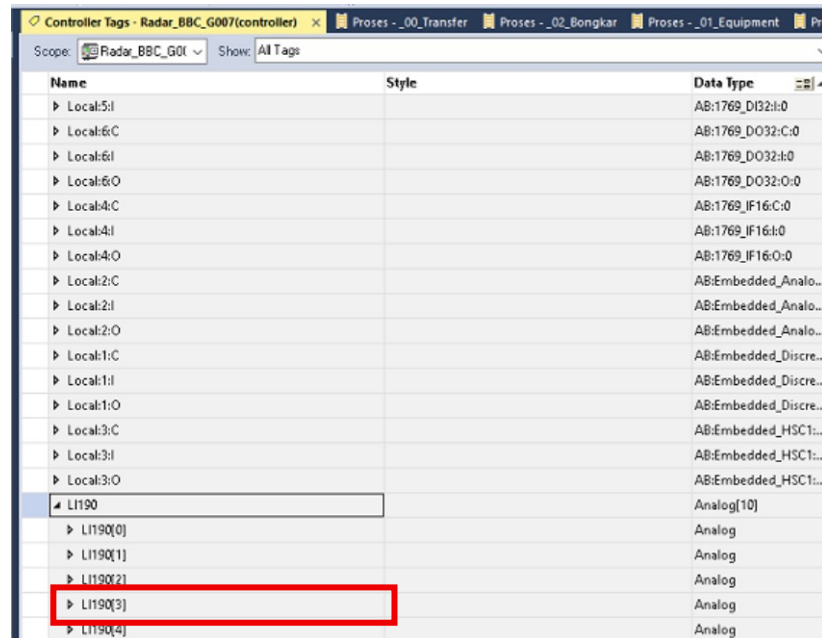
Secara keseluruhan, hasil pengujian konektivitas menunjukkan bahwa seluruh perangkat yang terlibat dalam sistem kontrol dan monitoring *caustic* telah berhasil terhubung sesuai dengan konfigurasi yang dirancang. Tidak ditemukan gangguan komunikasi maupun perangkat yang berstatus fault selama pengujian dilakukan, sehingga sistem dinyatakan siap untuk melaksanakan pengujian fungsi dan pengujian proses pada tahap berikutnya.

4.1.3 Pengujian Pembacaan dan Flowmeter dan Level Indikator SCADA

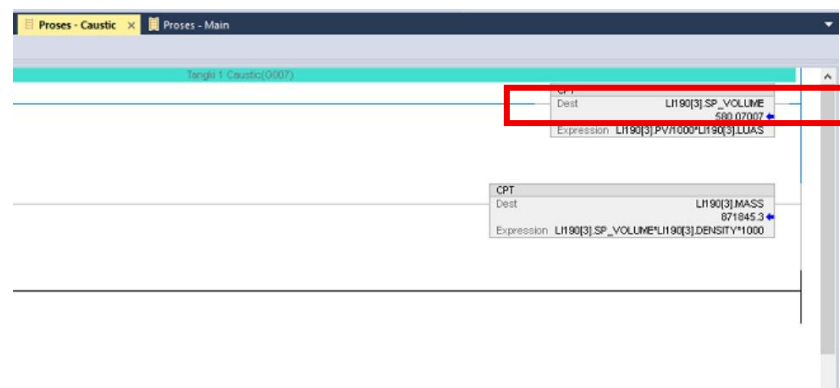
Pengujian flowmeter dan gateway dilakukan untuk memastikan bahwa data laju aliran yang diukur oleh flowmeter dapat dikirimkan dan diterima dengan baik oleh PLC melalui sistem komunikasi yang digunakan. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi keakuratan pembacaan data, kondisi saat tidak terdapat aliran, serta kecepatan pembaruan data yang ditampilkan pada PLC. Hasil pengujian flowmeter dan gateway ditunjukkan pada **Tabel 4.3**

Berdasarkan hasil pengujian di **Gambar 4.10**, parameter data mass flow terbaca menunjukkan hasil yang sesuai dengan perancangan sistem. Saat terdapat aliran fluida pada jalur proses, nilai tag LI190 = Analog[10] yang

dipantau melalui Studio 5000 berubah secara dinamis mengikuti kondisi aliran actual dan di konversi menggunakan function block seperti gambar 4.11. Hal ini menunjukkan bahwa flowmeter mampu mengukur laju aliran dan mengirimkan data ke PLC dengan baik melalui gateway komunikasi yang digunakan.



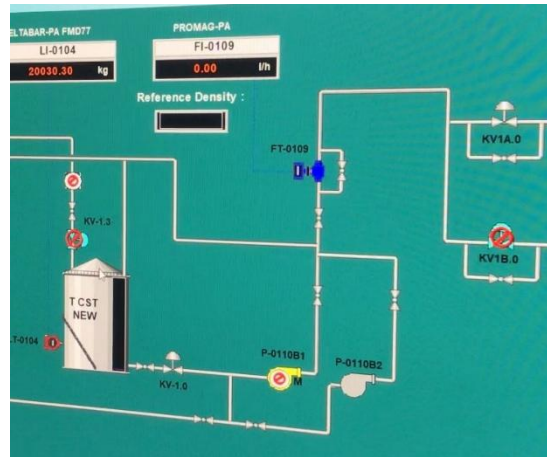
Gambar 4.10 Tag Untuk Menghitung Mass Cairan *Caustic*



Gambar 4.11 Function Block Routine *Caustic* Untuk Menghitung Volume dan Mass *Caustic*

Pengujian kondisi zero flow dilakukan dengan menghentikan aliran fluida dan mengamati nilai yang ditampilkan pada SCADA. Hasil pengujian pada **Gambar 4.12** menunjukkan bahwa nilai pembacaan mendekati nol ketika tidak terdapat aliran. Kondisi ini menandakan bahwa flowmeter dapat

membedakan keadaan aliran dan tidak terdapat aliran secara akurat, sehingga data yang diterima PLC sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.



Gambar 4.12 Nilai Flowrate 0 setelah sistem dihentikan

Selain itu, dilakukan pengujian terhadap update rate data untuk mengetahui kecepatan pembaruan informasi yang diterima PLC. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa nilai pada tag flowmeter diperbarui dengan interval kurang dari satu detik yang dapat di lihat pada gambar 4.13 dan 4.14. Kecepatan pembaruan data tersebut sudah memenuhi kebutuhan sistem monitoring karena memungkinkan operator memperoleh informasi kondisi proses secara real-time melalui SCADA.



Gambar 4.13 Update Pembacaan data Flowrate Kurang dari 1 Detik



Gambar 4.14 Update Pembacaan data Flowrate Kurang dari 1 Detik

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa flowmeter dan gateway komunikasi telah berfungsi dengan baik dan dapat dilihat pada **Tabel 4.3** Data laju aliran dapat dibaca oleh PLC, kondisi tanpa aliran dapat terdeteksi dengan benar, dan proses pertukaran data berlangsung secara cepat. Dengan demikian, flowmeter dan gateway dinyatakan siap digunakan sebagai sumber data utama untuk monitoring dan perhitungan proses pada sistem kontrol tangki *caustic*.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian

parameter	Cara Pengujian	Yang Diharapkan	Hasil
Data mass flow terbaca	Pantau tag melalui SCADA	Nilai berubah sesuai aliran aktual	Berhasil
Level Indicator Terbaca	Tag LI Terdapat pada Studio5000	Nilai LI terdapat di tampilan SCADA	Berhasil
Kondisi zero flow	Hentikan aliran, pantau tag	Nilai mendekati 0	Berhasil
Update rate data	Pantau frekuensi perubahan nilai tag	Update setiap < 1 detik	Berhasil

4.1.4 Pengujian *Solenoid valve* dan ACV

Pengujian *solenoid valve* dan Actuated Control Valve (ACV) dilakukan untuk memastikan bahwa perintah buka dan tutup yang diberikan melalui sistem SCADA dapat dieksekusi dengan baik oleh aktuator di lapangan. Selain itu, pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kesesuaian antara status valve yang ditampilkan pada SCADA dengan kondisi aktual valve yang diamati secara langsung di lapangan.

Pengujian dilakukan dengan memberikan perintah Open dan Close melalui antarmuka SCADA, kemudian mengamati respon valve secara fisik serta status feedback yang diterima PLC.

Berdasarkan hasil pengujian pada **Table 4.4**, perintah pembukaan valve yang diberikan melalui SCADA berhasil dieksekusi oleh aktuator sehingga valve bergerak menuju posisi terbuka. Kondisi tersebut dapat diamati secara langsung di lapangan dan dikonfirmasi oleh perubahan status valve pada tampilan SCADA. Selain itu, sinyal feedback dari limit switch posisi terbuka berhasil diterima PLC dan ditampilkan pada sistem monitoring.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian

Pengujian	Kondisi yang Diharapkan	Hasil
Perintah Open dari SCADA	Valve membuka dan status SCADA menunjukkan Open	Berhasil
Perintah Close dari SCADA	Valve menutup dan status SCADA menunjukkan Close	Berhasil
Feedback Limit Switch	Status Open terbaca PLC dan SCADA	Berhasil
Feedback Limit Switch	Status Close terbaca PLC dan SCADA	Berhasil

Pengujian penutupan valve juga menunjukkan hasil yang sesuai dengan perancangan sistem. Setelah perintah close diberikan melalui SCADA, valve bergerak menuju posisi tertutup dan status pada tampilan SCADA

berubah sesuai kondisi aktual di lapangan. Sinyal feedback dari limit switch posisi tertutup berhasil diterima PLC sehingga status valve dapat dimonitor secara real-time.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa komunikasi antara SCADA, PLC, dan aktuator valve berjalan dengan baik. Kesesuaian antara kondisi aktual valve dan status yang ditampilkan pada SCADA membuktikan bahwa sistem kontrol dan monitoring valve telah berfungsi sesuai dengan rancangan yang dibuat.



Gambar 4.15 Pemasangan *Solenoid valve* dan ACV



Gambar 4.16 Valve Close



Gambar 4.17 Valve Open

4.2 Pengujian Akurasi Flowmeter PROMASS -PA

Pengambilan data dilakukan pada saat proses transfer *caustic* berlangsung untuk memperoleh nilai flowrate yang ditampilkan pada SCADA serta nilai totalizer yang direkam oleh flowmeter PROMASS. Sebelum proses dimulai, nilai totalizer awal yang terbaca pada flowmeter adalah 7.017.336 kg dengan densitas fluida sebesar 1,504 g/cm³. Selanjutnya, selama proses transfer berlangsung dilakukan pencatatan nilai totalizer dan nilai flowrate pada beberapa interval waktu pengamatan. Data hasil pengamatan tersebut digunakan sebagai dasar untuk menghitung nilai *flowrate* berdasarkan perubahan totalizer terhadap selang waktu pengukuran, kemudian dibandingkan dengan nilai *flowrate* yang ditampilkan pada SCADA. Hasil pencatatan data selama pengujian disajikan pada **Tabel 4.5**

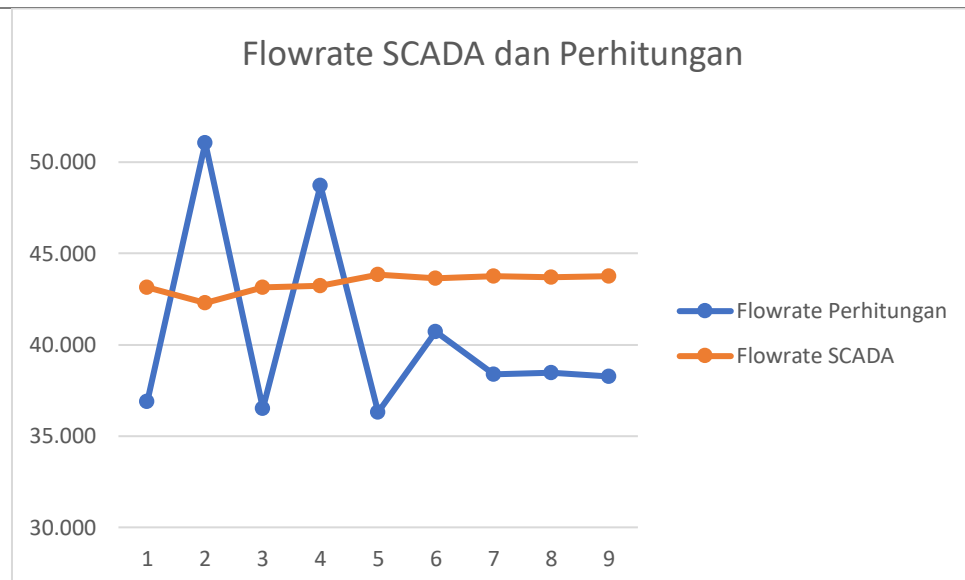
Tabel 4.5 Data Hasil Pengamatan

Waktu pengambilan	Totalizer plant (kg)	Flowrate Scada (kg/h)
09.07	7.017.632	43135,20
09.08	7.018.247	42289,00
09.09	7.019.098	43129,10
09.12	7.020.924	43227,00
09.15	7.023.360	43839,40
09.15	7.023.763	43630,80

Hasil perhitungan selanjutnya dibandingkan dengan nilai flowrate yang ditampilkan pada sistem SCADA untuk mengetahui tingkat kesesuaian pembacaan kedua data tersebut.

Tabel 4.6 Data Perbandingan Hasil Perhitungan

Flowrate Scada (kg/h)	Totalizer Keluaran (kg)	Flowrate Perhitungan (kg/h)	Selisih
43.135,20	615	36.894	6.241
42.289,00	851	51.053	-8.764
43.129,10	1.826	36.520	6.609
43.227,00	2.436	48.720	-5.439
43.839,40	403	36.306	7.533
43.630,80	294	40.720	2.909
43.762,60	373	38.374	5.387
43.707,10	342	38.470	5.237
43.743,00	319	38.272	5.471



Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Antara SCADA dan Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil perhitungan pada **Tabel 4.6** diperoleh nilai rata-rata *flowrate* sebesar 40.592 kg/h, sedangkan nilai rata-rata *flowrate* yang ditampilkan pada sistem SCADA sebesar 43.384,80 kg/h. Perbandingan kedua nilai tersebut menghasilkan selisih rata-rata sebesar 2.792,80 kg/h atau sekitar 6,88%.

Perlu dipahami bahwa nilai *flowrate* yang ditampilkan pada SCADA bukan merupakan hasil perhitungan oleh PLC maupun SCADA, melainkan berasal langsung dari keluaran flowmeter PROMASS yang melakukan pengukuran massa fluida menggunakan prinsip Coriolis. Nilai tersebut dikirimkan secara digital melalui jaringan PROFIBUS PA, diteruskan ke PLC melalui 1788-EN2PAR, kemudian ditampilkan kembali pada antarmuka SCADA. Oleh karena itu, nilai *flowrate* pada SCADA merupakan representasi langsung dari hasil pengukuran instrumen dengan akurasi sesuai spesifikasi flowmeter.

Sementara itu, nilai *flowrate* sebesar 40.592 kg/h merupakan hasil estimasi yang diperoleh dari perubahan nilai totalizer terhadap selang waktu pengamatan. Walaupun data totalizer berasal dari flowmeter yang sama, proses konversi menjadi nilai *flowrate* sangat bergantung pada ketelitian penentuan interval waktu pengukuran. Pada penelitian ini, pencatatan waktu dilakukan secara manual berdasarkan tampilan jam pada SCADA yang memiliki resolusi satuan menit. Akibatnya, nilai Δ Waktu yang digunakan dalam perhitungan merupakan nilai pendekatan dan tidak dapat merepresentasikan waktu aktual secara presisi.

Keterbatasan resolusi waktu tersebut menyebabkan hasil perhitungan *flowrate* memiliki ketidakpastian yang lebih besar dibandingkan nilai *flowrate* yang diperoleh secara langsung dari sensor. Sebagai contoh, interval yang tercatat sebagai satu menit dapat memiliki durasi aktual yang sedikit lebih pendek atau lebih panjang bergantung pada waktu pencatatan dilakukan. Kondisi tersebut memberikan pengaruh langsung terhadap hasil perhitungan karena nilai *flowrate* diperoleh dari pembagian perubahan massa terhadap selang waktu pengukuran.

Selain itu, selama pengujian tidak tersedia fasilitas *data logging* yang merekam nilai *flowrate* beserta timestamp secara otomatis dengan resolusi detik atau milidetik. Oleh sebab itu, proses sinkronisasi antara perubahan nilai totalizer dan nilai *flowrate* yang ditampilkan pada SCADA tidak dapat dilakukan secara presisi. Keterbatasan metode verifikasi ini menjadi

penyebab utama munculnya selisih sebesar 6,88% antara hasil perhitungan dan nilai yang ditampilkan oleh SCADA.

Berdasarkan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa selisih sebesar 6,88% tidak menunjukkan adanya kesalahan pengukuran pada flowmeter maupun kesalahan pembacaan pada sistem SCADA. Selisih tersebut merupakan konsekuensi dari metode verifikasi yang menggunakan perubahan nilai totalizer dengan pencatatan waktu secara manual dalam resolusi menit. Dengan demikian, nilai *flowrate* yang ditampilkan pada SCADA dapat dinyatakan konsisten dengan data totalizer flowmeter, sedangkan perbedaan yang diperoleh berasal dari keterbatasan metode verifikasi yang digunakan selama penelitian.

4.3 Pengujian Respon Sistem

4.3.1 Respon Sistem *Start* Proses Bongkar

Pengujian respon sistem bongkar dilakukan untuk mengetahui waktu respon sistem sejak operator memberikan perintah *START* melalui SCADA hingga proses bongkar berlangsung secara normal. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kesesuaian urutan operasi yang telah dirancang pada program PLC, meliputi perubahan status logika, pembukaan valve inlet, pengoperasian pompa, serta terbentuknya aliran fluida yang stabil. Waktu respon aktual setiap tahapan diamati melalui tampilan SCADA dan dibandingkan dengan urutan logika serta delay yang diterapkan pada ladder diagram. Hasil pengujian respon sistem bongkar ditunjukkan pada **Tabel 4.7** berikut:

Tabel 4.7 Hasil Respon Sistem Start Bongkar

No	Event	Delay pada Ladder	Waktu Aktual (s)	Waktu Kumulatif (s)
1	Operator tekan <i>START</i> di SCADA	-	0	0
2	T1_3.Sts_Transfer_Running = 1	1 scan cycle	0.03	0.03
3	KV1_3_IN <i>Start_Stop</i> = 1	1 scan cycle	0.03	0.06

4	KV1_3_IN Out_Open = 1	1 scan cycle	0.03	0.09
5	Valve KV1_3_IN	-	2	2.09
6	P0109 Cmd_Run = 1	1 scan cycle	0.03	2.12
7	FI-0108 menampilkan aliran dalam kondisi stabil	-	4	6.12

Berdasarkan hasil pengujian, perubahan status logika PLC berlangsung sangat cepat, yaitu sekitar 0,03 detik atau setara satu siklus scan PLC. Setelah operator menekan tombol *START*, valve inlet KV1_3_IN memerlukan waktu sekitar 2 detik hingga terbuka penuh. Selanjutnya pompa mulai mengalirkan cairan menuju tangki penyimpanan, sehingga laju aliran yang terbaca pada flowmeter FI-0108 meningkat secara bertahap. Hasil pengamatan melalui SCADA menunjukkan bahwa aliran mencapai kondisi stabil sekitar 6 detik setelah perintah *START* diberikan, yang berarti diperlukan waktu sekitar 4 detik sejak valve terbuka hingga aliran mencapai keadaan tunak (*steady state*). Hal ini menunjukkan bahwa respon sistem tidak hanya dipengaruhi oleh logika PLC, tetapi juga oleh waktu mekanis aktuator valve dan karakteristik aliran fluida di dalam perpipaan.

4.3.2 Respon Sistem *Start* Proses Transfer

Pengujian respon sistem transfer dilakukan untuk mengevaluasi waktu respon sistem sejak operator memberikan perintah *START* melalui SCADA hingga proses transfer berlangsung secara normal. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa urutan operasi yang dirancang pada program PLC telah berjalan sesuai dengan sequence yang ditentukan, yaitu pembukaan valve outlet, pembukaan valve transfer, pemberian delay sebelum pompa dijalankan, serta terbentuknya aliran fluida yang stabil. Waktu respon aktual diamati melalui tampilan SCADA dan dibandingkan dengan logika serta delay yang diterapkan pada ladder diagram. Hasil pengujian respon sistem transfer ditunjukkan pada **Tabel 4.8**

Tabel 4.8 Hasil Respon Sistem *Start Transfer*

No	Event	Delay pada Ladder	Waktu Aktual (s)	Waktu Kumulatif (s)
1	Operator tekan <i>START</i> di SCADA	-	0	0
2	Route_1A.Sts_Transfer_	1 scan cycle	0.03	0.03
3	KV1_0 <i>Start_Stop</i> = 1	1 scan cycle	0.03	0.06
4	Valve KV1_0 dan KV1A_0 membuka	Waktu Mekanis	2	2.06
5	KV1A_0 <i>Start_Stop</i> = 1	1 scan cycle	0.03	2.09
6	TON P0110B_1_T_Delay Mulai Countdown	5.000ms delay ladder	5	7.09
7	P0110B_1 Cmd_Run = 1	1 scan cycle	0.03	7.12
8	Laju aliran pada flowmeter mencapai kondisi stabil	Respon hidrolik sistem dan pembaruan SCADA	5	12.12

Berdasarkan hasil pengujian, perubahan status logika PLC berlangsung sangat cepat, yaitu sekitar 0,03 detik atau setara dengan satu siklus scan PLC. Setelah operator memberikan perintah *START*, valve outlet KV1_0 menerima perintah buka terlebih dahulu, kemudian diikuti oleh valve transfer KV1A_0 yang memerlukan waktu sekitar 2 detik hingga terbuka penuh. Urutan tersebut menunjukkan bahwa sistem menerapkan sequence pembukaan valve secara bertahap sehingga jalur perpipaan telah siap sebelum pompa dijalankan.

Setelah valve transfer terbuka, program PLC menjalankan TON P0110B_1_T_Delay selama 5 detik sebelum memberikan perintah *Cmd_Run* kepada pompa transfer. Delay ini merupakan bagian dari logika pengendalian yang dirancang untuk memberikan waktu pengisian jalur perpipaan sebelum

pompa beroperasi sehingga risiko terjadinya *water hammer* dan beban kejut pada pompa dapat diminimalkan. Setelah pompa mulai beroperasi, aliran fluida tidak langsung stabil, tetapi masih memerlukan waktu sekitar 5 detik hingga debit yang terbaca pada flowmeter mencapai kondisi tunak.

Secara keseluruhan, waktu yang dibutuhkan sejak operator menekan tombol *START* hingga aliran fluida mencapai kondisi stabil adalah sekitar 10 detik. Waktu tersebut merupakan akumulasi dari waktu pembukaan valve transfer, delay TON selama 5 detik, serta waktu yang dibutuhkan fluida untuk membangun tekanan dan debit di dalam sistem perpipaan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa respon sistem telah sesuai dengan urutan operasi yang dirancang pada ladder diagram, sehingga proses transfer dapat berlangsung secara aman dan terkendali.

4.3.3 Respon Sistem *Stop* Proses Transfer

Pengujian respon penghentian (*stop sequence*) sistem transfer dilakukan untuk mengevaluasi urutan kerja perangkat setelah operator memberikan perintah *STOP* melalui antarmuka SCADA. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa logika penghentian yang dirancang pada program PLC telah berjalan sesuai dengan sequence yang ditetapkan, mulai dari penghentian pompa, penurunan laju aliran fluida, hingga penutupan valve transfer. Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui waktu respon aktual setiap tahapan proses sehingga dapat dibandingkan dengan logika delay yang diterapkan pada ladder diagram. Hasil pengujian respon penghentian sistem transfer ditunjukkan pada **Tabel 4.9**

Tabel 4.9 Hasil Respon Sistem *Stop Transfer*

No	Event	Delay pada Ladder	Waktu Aktual (s)	Waktu Kumulatif (s)
1	Operator tekan <i>Stop</i> di SCADA	-	0	0
2	Route_1A.Sts_Transfer_Running = 0	1 scan cycle	0.03	0.03
3	P0110B_1 Cmd_Stop = 1	1 scan cycle	0.03	0.06

4	TimerDelayStop = 1 (pompa masih jalan)	Delay stop AOI Motor2	4	4.06
5	Laju aliran mulai menurun hingga mencapai 0, Valve Outlet Mati	Respon proses aktual di pipa	8	12.06
6	Latch_Close trigger (TimerDelayStop aktif)	ONS 1 scan	0.03	12.09
7	Timer Unlatch[0] mulai countdown	10,000ms delay ladder	10	22.09
8	KV1A_0 Start_Stop = 0 (valve transfer mulai tutup)	1 scan cycle	0.03	22.13
9	Valve KV1A_0 menutup	Waktu mekanis	4	26.13

Berdasarkan hasil pengujian respon *stop* sistem transfer, setelah operator menekan tombol *STOP* pada SCADA, status Route_1A.Sts_Transfer_Running berubah menjadi 0 dan pompa menerima perintah Cmd_Stop dalam satu scan cycle PLC. Meskipun demikian, hasil pengamatan menunjukkan bahwa aliran fluida belum langsung berhenti, melainkan masih relatif stabil selama sekitar 4 detik. Hal ini menunjukkan bahwa pompa belum langsung kehilangan efek pemompaan secara proses dan masih terdapat inersia aliran di dalam pipa. Setelah fase tersebut, laju aliran mulai menurun dan membutuhkan sekitar 8 detik hingga mencapai 0, sehingga total waktu dari perintah *stop* hingga aliran berhenti adalah sekitar 12 detik.

Setelah aliran berhenti, sistem menjalankan logika penundaan penutupan valve transfer melalui Timer Unlatch[0] selama 10 detik. Delay ini tidak berfungsi untuk menghentikan pompa, melainkan untuk menahan valve transfer tetap terbuka sesaat setelah aliran berhenti agar sisa cairan di dalam pipa mereda dan risiko water hammer dapat dikurangi. Setelah timer selesai, perintah KV1A_0.Start_Stop = 0 diberikan dan valve transfer mulai menutup. Berdasarkan hasil pengamatan, valve transfer memerlukan waktu mekanis sekitar 4 detik hingga tertutup penuh. Dengan demikian, total waktu respon

stop sistem transfer dari tombol *STOP* ditekan hingga valve transfer tertutup penuh adalah sekitar 26 detik.

4.3.4 Respon Sistem *Stop* Proses Bongkar

Pengujian respon sistem pada proses *stop* bongkar dilakukan untuk mengetahui waktu yang dibutuhkan sistem sejak operator memberikan perintah *STOP* melalui SCADA hingga seluruh peralatan kembali ke kondisi aman. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi kesesuaian urutan penghentian proses dengan logika ladder yang telah dirancang, yaitu pompa dihentikan terlebih dahulu melalui mekanisme *Timer Delay Stop* pada AOI Motor2, kemudian diikuti dengan penutupan valve inlet sebagai jalur masuk cairan ke tangki. Waktu respon setiap tahapan diamati melalui tampilan SCADA dan dibandingkan dengan urutan logika pada program PLC. Hasil respon sistem *stop* bongkar dapat dilihat pada **Table 4.10**

Tabel 4.10 Hasil Respon Sistem *Stop Bongkar*

No	Event	Delay pada Ladder	Waktu Aktual (s)
1	Operator tekan <i>STOP</i> di SCADA	-	0
2	T1_3.Sts_Transfer_Running = 0	1 scan cycle	0.03
3	P0109 Cmd_Stop = 1 (perintah <i>stop</i> pompa)	1 scan cycle	0.03
4	Motor2 AOI timer <i>stop</i> mulai	5,000ms delay ladder	5
5	P0109 Out_Run = 0 (pompa benar-benar <i>stop</i>)	Setelah 5 detik	0
6	KV1_3_IN Start_Stop = 0 (valve inlet tutup)	1 scan cycle	0.03
7	Valve KV1_3_IN menutup	Waktu Mekanis	4

Berdasarkan hasil pengujian, urutan penghentian proses bongkar telah sesuai dengan logika yang diterapkan pada program PLC. Setelah operator

menekan tombol *STOP*, status T1_3.Sts_Transfer_Running berubah menjadi 0, sehingga AOI Motor2 memberikan perintah *Cmd_Stop* kepada pompa P0109. Meskipun perintah *stop* telah diberikan, pompa tidak langsung berhenti, melainkan masih beroperasi selama sekitar 4 detik akibat mekanisme Timer Delay *Stop* yang diterapkan di dalam AOI Motor2. Mekanisme ini memungkinkan aliran fluida menurun secara bertahap sehingga mengurangi perubahan tekanan yang terjadi secara tiba-tiba pada sistem perpipaan.

Setelah pompa berhenti, PLC memberikan perintah penutupan pada valve inlet KV1_3_IN. Berdasarkan hasil pengamatan, valve membutuhkan waktu sekitar 5 detik hingga mencapai posisi tertutup penuh. Waktu tersebut merupakan waktu mekanis aktuator valve untuk berpindah dari kondisi terbuka ke kondisi tertutup. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses penghentian bongkar berlangsung secara berurutan, yaitu pompa dihentikan terlebih dahulu kemudian valve ditutup, sehingga jalur aliran ditutup setelah laju aliran menurun. Urutan ini telah sesuai dengan konsep pengendalian yang dirancang untuk menjaga keamanan operasi dan meminimalkan gangguan hidrolik pada sistem.

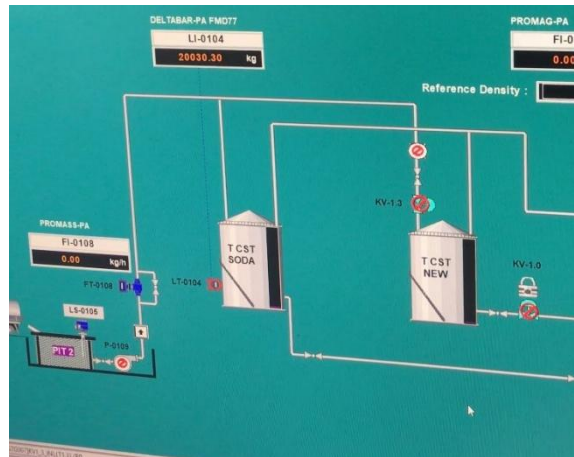
4.4 Pengujian Sistem Terintegrasi

Pengujian sistem terintegrasi dilakukan untuk memverifikasi bahwa seluruh komponen sistem kontrol dan monitoring yang telah dirancang dapat bekerja secara terpadu sesuai dengan urutan operasi yang diharapkan. Pengujian ini mencakup integrasi antara PLC, SCADA, instrumen lapangan, valve, pompa, serta logika *interlock* yang mengatur proses bongkar dan transfer *caustic* soda. Berbeda dengan pengujian komponen individual yang hanya memeriksa fungsi masing-masing perangkat secara terpisah, pengujian sistem terintegrasi bertujuan memastikan bahwa seluruh perangkat dapat berinteraksi dan menjalankan sequence operasi secara otomatis sesuai dengan logika yang telah diprogram.

4.4.1 Pengujian Proses Bongkar

Pada pengujian proses bongkar, dilakukan simulasi dan pengamatan terhadap urutan operasi mulai dari pemberian perintah *start* melalui SCADA,

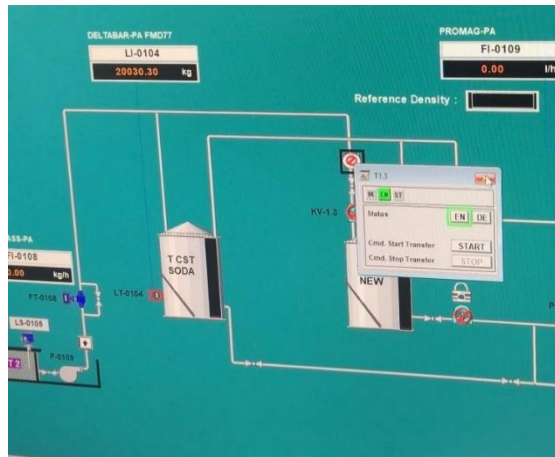
validasi kondisi *interlock*, pembukaan valve inlet, pengoperasian pompa PIT, hingga proses pengisian tangki *caustic*. Selain itu, diamati pula perubahan nilai level, volume, massa, dan laju aliran yang ditampilkan pada sistem monitoring untuk memastikan bahwa data proses diperbarui secara *real-time* selama proses berlangsung. Hasil pengujian sistem terintegrasi proses bongkar dapat dilihat pada **Tabel 4.11**



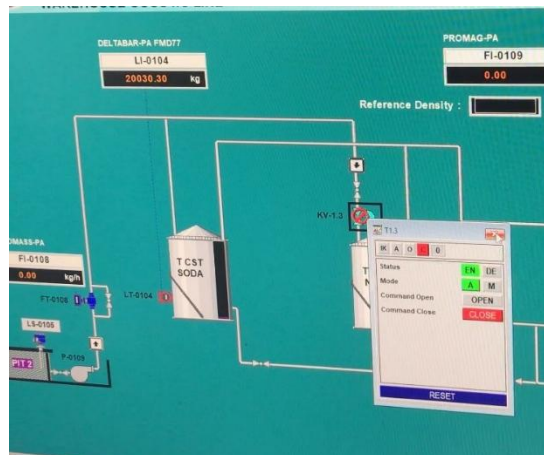
Gambar 4.21 Pompa Bongkar Disable



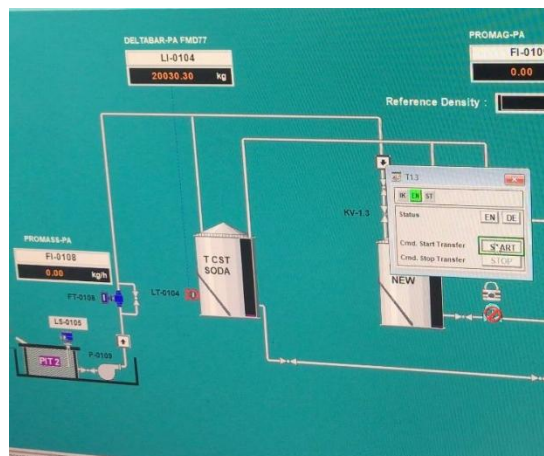
Gambar 4.22 Pompa Enable



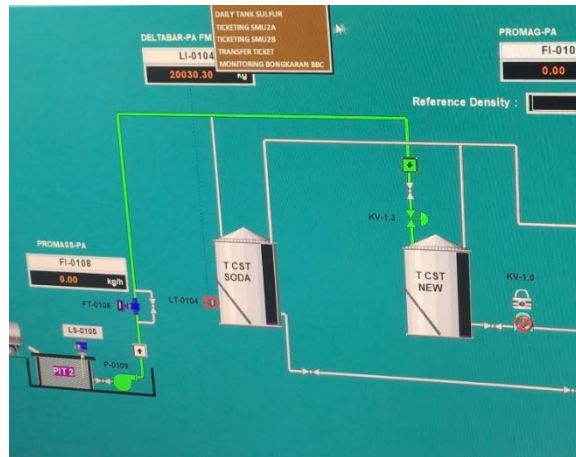
Gambar 4.23 Enable Cmd Start



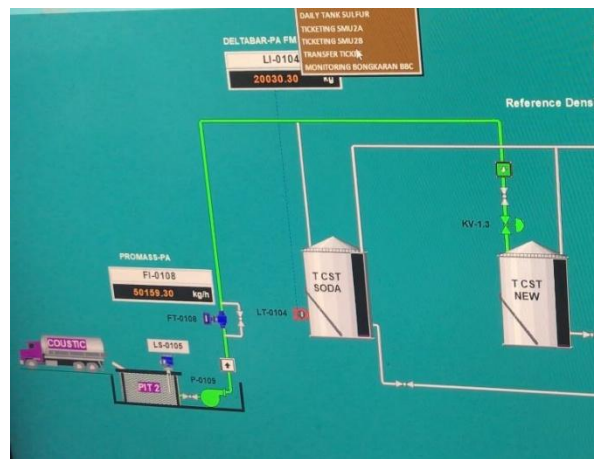
Gambar 4.24 Valve Outlet Disable



Gambar 4.25 Valve Enable



Gambar 4.26 Start Proses Bongkar



Gambar 4.27 Proses Bongkar Berjalan

Tabel 4.11 Hasil Pengujian Proses Bongkar

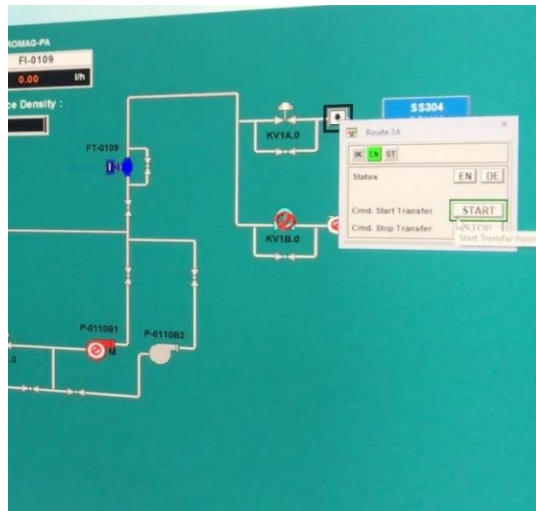
Aksi	Yang Diamati	Yang Diharapkan	Hasil
Cairan masuk ke PIT dari truk	Nilai flowmeter di SCADA	LS PIT berubah dari Low ke High	Berhasil
Operator buka valve inlet via SCADA	Posisi valve di SCADA	Indikator valve berubah ke Open	Berhasil
Operator enable pompa via SCADA	Status pompa di SCADA	Indikator pompa berubah ke Enable	Berhasil

Operator klik <i>Start</i>	Status proses di SCADA	Indikator <i>Running</i> aktif, pompa berputar	Berhasil
Proses berjalan	Nilai flowmeter di SCADA	Nilai mass flow menunjukkan aliran aktif	Berhasil
Operator klik <i>Stop</i>	Status proses di SCADA	Proses berhenti, pompa mati, valve tutup	Berhasil

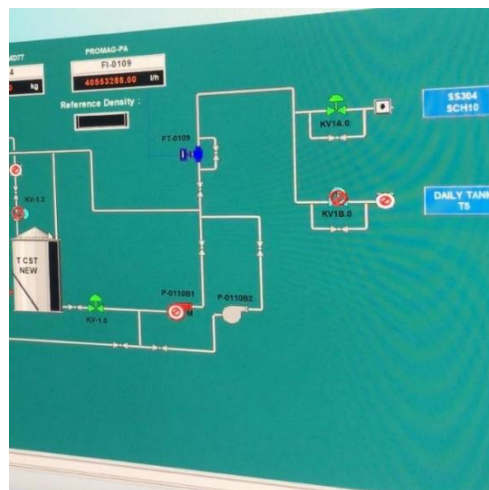
4.4.2 Pengujian Proses Transfer

proses transfer dilakukan pengamatan terhadap sequence operasi mulai dari aktivasi jalur transfer, pembukaan valve outlet dan valve transfer, pengoperasian pompa transfer, hingga proses penghentian sistem secara bertahap. Pengujian juga difokuskan pada implementasi rule-based *interlock* yang dirancang untuk mencegah konflik operasi antar jalur transfer, mencegah pengoperasian pompa tanpa kondisi yang memenuhi syarat, serta mengurangi risiko water hammer melalui penerapan delay pada proses *start* dan *stop* peralatan.

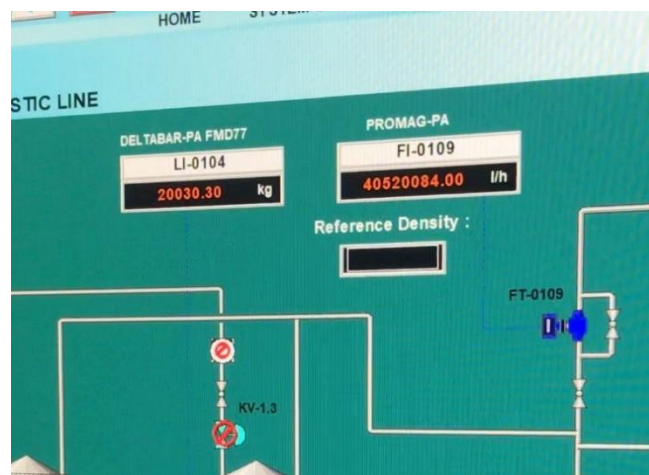
Hasil pengujian sistem terintegrasi disajikan dalam bentuk tangkapan layar (screenshot) dari tampilan SCADA dan kondisi aktual peralatan di lapangan. Dokumentasi tersebut digunakan untuk menunjukkan kesesuaian antara status yang ditampilkan pada sistem monitoring dengan kondisi operasi yang terjadi pada proses bongkar dan transfer *caustic* soda. Hasil pengujian sistem terintegrasi proses bongkar dapat dilihat pada **Tabel 4.12**



Gambar 4. 28 Operator Mulai *Start* Transfer



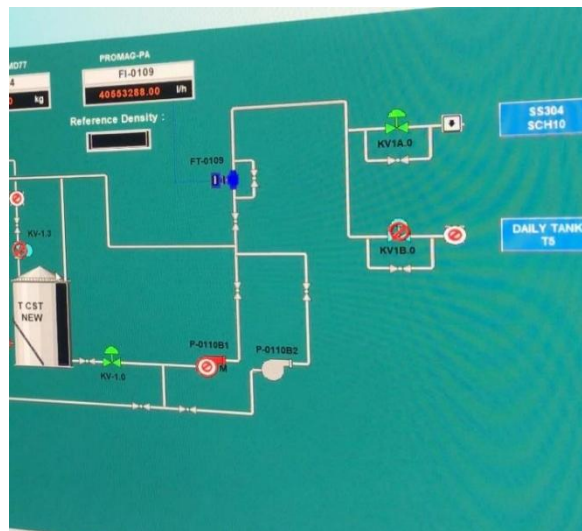
Gambar 4. 29 Valve Outlet Tangki dan Valve Transfer Enable dan Terbuka



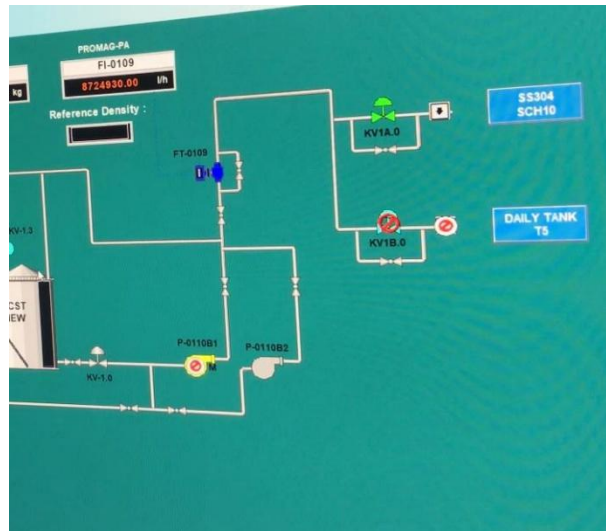
Gambar 4.30 Flowmeter Counting Material Yang Keluar



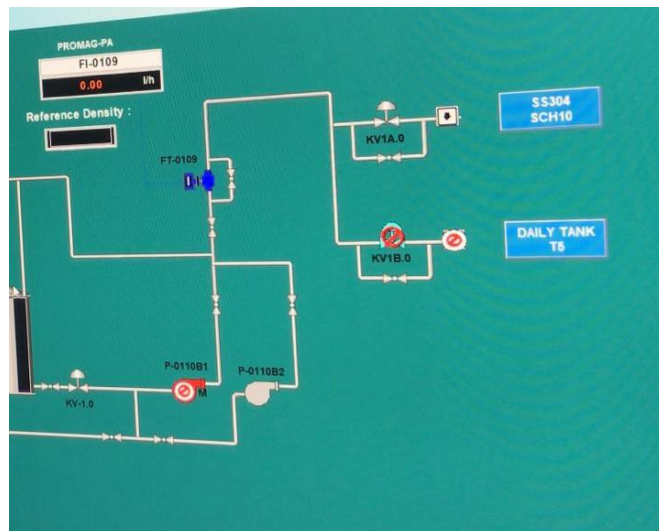
Gambar 4.31 Operator Klik *Stop* Via SCADA



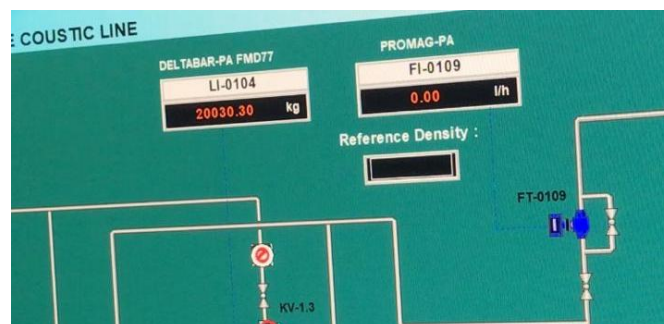
Gambar 4.32 Motor Pump Mati Terlebih Dahulu



Gambar 4.33 Valve Outlet dan Pump Mati



Gambar 4.34 Seluruh Aktuator Non-aktif



Gambar 4. 35 Flowmeter Berhenti Counting

Tabel 4.12 Hasil Pengujian Proses Transfer

Aksi	Yang Diamati	Yang Diharapkan	Hasil
Cairan masuk ke PIT dari truk	Nilai flowmeter di SCADA	LS PIT berubah dari Low ke High	Berhasil
Operator buka valve inlet via SCADA	Posisi valve di SCADA	Indikator valve berubah ke Open	Berhasil
Operator enable pompa via SCADA	Status pompa di SCADA	Indikator pompa berubah ke Enable	Behasil
Operator klik <i>Start</i>	Status proses di SCADA	Indikator <i>Running</i> aktif, pompa berputar	Berhasil
Proses berjalan	Nilai flowmeter di SCADA	Nilai mass flow menunjukkan aliran aktif	Berhasil
Operator klik <i>Stop</i>	Status proses di SCADA	Proses berhenti, pompa mati, valve tutup	Berhasil

4.5 Hasil Analisis Resiko Keselamatan Kerja

Sebelum sistem otomasi diterapkan, proses bongkar dan transfer larutan *caustic* di area tangki masih melibatkan beberapa aktivitas manual yang dilakukan secara langsung oleh operator di lapangan. Aktivitas tersebut berpotensi menimbulkan berbagai risiko keselamatan kerja akibat karakteristik larutan *caustic* yang bersifat korosif serta kondisi lingkungan kerja di sekitar tangki penyimpanan. Selain risiko terhadap keselamatan personel, proses manual juga berpotensi menyebabkan kesalahan operasional yang dapat memengaruhi keandalan sistem, seperti ketidaksesuaian pencatatan stok maupun kesalahan pengoperasian peralatan. Oleh karena itu, dilakukan identifikasi terhadap aktivitas-aktivitas manual yang memiliki tingkat risiko tinggi sebagai dasar dalam mengevaluasi manfaat penerapan sistem otomasi berbasis PLC dan SCADA. Hasil identifikasi aktivitas manual beserta potensi bahaya dan konsekuensinya disajikan pada **Tabel 4.13**

Tabel 4.13 Indentifikasi Potensi Bahaya

No	Aktifitas Manual	Bahaya	Konsekuensi
1	Membuka/menutup valve secara manual di area tangki	Paparan <i>caustic</i> soda jika terjadi kebocoran atau percikan	Luka bakar kimia pada kulit dan mata
2	Naik ke platform tangki untuk operasi valve inlet	Jatuh dari ketinggian	Cedera serius hingga kematian
3	Pencatatan stok manual	Human error dalam pencatatan	Kesalahan operasional, overfill
4	Operasi saat kondisi cuaca buruk (hujan)	Licin di platform tangki + paparan <i>caustic</i>	Jatuh + luka bakar kimia bersamaan

Setelah seluruh aktivitas berisiko teridentifikasi, dilakukan penilaian risiko terhadap masing-masing aktivitas pada kondisi sistem manual sebelum implementasi. Penetapan nilai Likelihood didasarkan pada frekuensi aktivitas fisik operator yang terjadi selama operasional, sedangkan penetapan nilai Severity didasarkan pada tingkat keparahan konsekuensi yang dapat ditimbulkan berdasarkan sifat bahaya *caustic* soda yang telah didokumentasikan oleh CCOHS [3]. Berikut adalah hasil penilaian risiko pada kondisi sebelum implementasi menggunakan **Persamaan (2.11.1)**

Tabel 4.14 Hasil Penilaian Resiko Sebelum Implementasi

	Aktifitas Manual	Nilai dan Justifikasi L	Nilai dan Justifikasi S	Risk Score	Level
1	Membuka/menutup valve secara manual di area tangki	[3] Dilakukan saat bongkar dan transfer	[4] <i>Caustic</i> pH 14 menyebabkan luka bakar kimia serius	12	High
2	Naik ke platform tangki untuk operasi valve inlet	[3] Dilakukan saat proses bongkar	[4] Jatuh dari ketinggian lebih dari 10 meter	12	High

			berpotensi menyebabkan cacat permanen		
3	Pencatatan stok manual	[4] Dilakukan tanpa verifikasi otomatis, sangat bergantung pada ketelitian operator	[3] Human error menyebabkan overfill yang berpotensi tumpahan <i>caustic</i> dalam volume besar	12	High
4	Operasi saat kondisi cuaca buruk (hujan)	[2]Tergantung kondisi cuaca, tidak terjadi setiap hari	[5] Kombinasi jatuh dari ketinggian dan paparan <i>caustic</i> soda berpotensi mengakibatkan kematian	12	High

Setelah sistem rule-based permissive *interlock* berbasis PLC dan SCADA diimplementasikan, seluruh aktivitas fisik operator di area tangki dieliminasi atau diminimalkan karena pengendalian dilakukan sepenuhnya dari ruang kontrol melalui antarmuka SCADA. Pada kondisi ini, nilai Severity tidak berubah karena sifat bahaya *caustic* soda tetap sama, namun nilai Likelihood mengalami penurunan signifikan karena frekuensi paparan fisik operator berkurang drastis. Berikut adalah hasil penilaian risiko pada kondisi setelah implementasi:

Tabel 4.15 Hasil Penilaian Risiko Setelah Implementasi

No	Aktivitas	L	S	Justifikasi	Risk Score	Level
----	-----------	---	---	-------------	------------	-------

1	Operasi valve	1	4	ACV dikendalikan via SCADA dari ruang kontrol	4	Low
2	Naik platform tangki	1	4	Seluruh kontrol dilakukan dari ruang SCADA	4	Low
3	Pencatatan stok	1	3	Data logging otomatis oleh SCADA menggantikan pencatatan manual	3	Low
4	Pencatatan stok	1	5	Operator tidak perlu ke lapangan dalam kondisi cuaca apapun kecuali untuk maintenance	5	Low

Berdasarkan hasil penilaian risiko pada kondisi sebelum dan sesudah implementasi, dapat dihitung nilai reduksi risiko untuk masing-masing aktivitas menggunakan **Persamaan (2.10.2)**

Tabel 4.16 Nilai Reduksi Risiko

No	Aktivitas	RS Sebelum	RS Setelah	Reduksi
1	Operasi valve	12	4	66,7%
2	Naik platform tangki	12	4	66,7%
3	Pencatatan stok	12	3	75,0%
4	Pencatatan stok	10	5	58,3%
Total		46	16	
Avg		11,5	4	66,7%

Reduksi risiko rata-rata sebesar 66,7% menunjukkan bahwa implementasi sistem rule-based permissive *interlock* memberikan kontribusi yang signifikan dalam menurunkan tingkat risiko keselamatan kerja operator.

Penurunan ini terutama didorong oleh eliminasi kebutuhan intervensi fisik operator di area tangki *caustic soda*, yang sebelumnya menjadi sumber utama paparan terhadap bahan kimia berbahaya.

Satu-satunya aktivitas yang masih berada pada level Medium setelah implementasi adalah operasi saat kondisi cuaca buruk. Hal ini disebabkan meskipun operator tidak lagi perlu ke lapangan untuk operasi rutin, namun kemungkinan kebutuhan inspeksi atau intervensi darurat pada kondisi tertentu tidak dapat sepenuhnya dieliminasi. Kondisi ini dapat dimitigasi lebih lanjut melalui penetapan prosedur operasi standar yang melarang akses ke area tangki saat cuaca buruk kecuali dalam kondisi darurat dengan penggunaan APD lengkap.

4.6 Analisis Reduksi Waktu Berdasarkan Observasi Proses Bongkar

Berdasarkan **Tabel 4.17**, implementasi sistem otomasi berbasis PLC dan SCADA memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pengurangan waktu intervensi operator selama proses bongkar *caustic soda*. Perlu diketahui bahwa waktu sebelum implementasi merupakan estimasi yang disusun berdasarkan analisis aktivitas kerja, observasi kondisi lapangan, serta prosedur operasi manual, sedangkan waktu setelah implementasi diperoleh dari hasil pengujian sistem dan pengamatan langsung terhadap waktu respons sistem.

Tabel 4.17 Hasil Reduksi Waktu Proses Bongkar

No	Aktivitas	Sebelum	Sesudah	Keterangan
1	Persiapan dan verifikasi kondisi awal	± 5 menit	± 1 menit	Operator cukup melakukan verifikasi kondisi melalui tampilan SCADA sehingga waktu persiapan berkurang.
2	Membuka valve inlet KV1_3_IN	± 5 menit	$\pm 0,1$ menit	Valve dibuka secara otomatis melalui aktuatur setelah operator memberikan perintah dari SCADA.

3	Verifikasi valve terbuka	± 2 menit	0 menit	Posisi valve diverifikasi secara otomatis menggunakan feedback limit switch
4	Menjalankan pompa P0109	± 3 menit	$\pm 0,1$ menit	PLC menjalankan pompa secara otomatis setelah kondisi interlock terpenuhi
5	Menghentikan pompa	± 3 menit	± 1 menit	Pompa dihentikan melalui SCADA tanpa operator mendatangi panel pompa.
6	Menutup valve inlet KV1_3_IN	± 5 menit	$\pm 0,1$ menit	Penutupan valve dilakukan otomatis setelah pompa berhenti sesuai logika <i>rule-based interlock</i> .
Total	Waktu Intervensi Operator	± 23 menit	$\pm 2,3$ menit	Terjadi pengurangan aktivitas manual secara signifikan setelah implementasi PLC dan SCADA.

Pada kondisi manual, operator harus melakukan berbagai aktivitas secara langsung di lapangan, seperti berjalan menuju area tangki untuk melakukan pemeriksaan awal, membuka valve inlet KV1_3_IN menggunakan *hand wheel*, memverifikasi posisi valve secara visual, mengoperasikan pompa dari panel lokal, serta melakukan pemantauan proses secara berkala hingga proses bongkar selesai. Selain itu, operator juga harus kembali menuju area valve untuk melakukan penutupan valve dan melakukan pencatatan hasil operasi secara manual. Rangkaian aktivitas tersebut menyebabkan total waktu intervensi operator diperkirakan mencapai 23 menit.

Setelah sistem otomasi diterapkan, sebagian besar aktivitas manual tersebut digantikan oleh fungsi PLC dan SCADA. Operator hanya melakukan verifikasi awal melalui tampilan SCADA, memberikan perintah *Start*, serta melakukan verifikasi akhir setelah proses selesai. Pembukaan valve, verifikasi

posisi valve melalui *limit switch*, pengoperasian pompa, serta penutupan valve dilakukan secara otomatis oleh PLC berdasarkan logika *rule-based interlock*. Akibatnya, total waktu intervensi operator berkurang menjadi sekitar 2,3 menit.

Persentase efisiensi waktu dihitung menggunakan **Persamaan 2.12.1** sebagai berikut.

$$\text{Reduksi} = \frac{23 - 2,3}{23} = 90\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa implementasi sistem otomasi mampu mengurangi waktu intervensi operator sebesar 90%. Pengurangan tersebut tidak menunjukkan bahwa proses perpindahan fluida menjadi lebih cepat, melainkan menunjukkan bahwa sebagian besar aktivitas fisik operator telah dieliminasi melalui otomasi. Dengan demikian, operator tidak lagi harus berada di area proses selama operasi berlangsung sehingga efisiensi kerja meningkat sekaligus mengurangi potensi paparan terhadap bahan kimia *caustic soda*.

4.7 Analisis Reduksi Waktu Berdasarkan Observasi Proses Transfer

Berdasarkan **Tabel 4.18**, implementasi sistem otomasi juga memberikan peningkatan efisiensi pada proses transfer *caustic soda*. Sama seperti proses bongkar, waktu sebelum implementasi diperoleh melalui estimasi berdasarkan analisis aktivitas kerja, observasi lapangan, dan prosedur operasi manual, sedangkan waktu setelah implementasi diperoleh dari hasil pengujian sistem.

Tabel 4.18 Hasil Reduksi Waktu Proses Transfer

No	Aktivitas	Sebelum	Sesudah	Keterangan
1	Persiapan dan verifikasi awal kondisi	±5 menit	±1 menit	Verifikasi awal dilakukan melalui SCADA
2	Membuka valve outlet KV1_0	±5 menit	±0,1 menit	Valve dikendalikan secara otomatis menggunakan aktuator
3	Verifikasi valve terbuka	±2 menit	0 menit	Status valve diperoleh dari feedback limit switch

4	Membuka valve transfer KV1A_0/KV1B_0	± 5 menit	$\pm 0,1$ menit	Pembukaan valve transfer dilakukan otomatis
5	Menjalankan pompa transfer	± 2 menit	$\pm 0,1$ menit	PLC menjalankan pompa secara otomatis
6	Menghentikan pompa	± 2 menit	± 1 menit	Penghentian pompa dilakukan dari SCADA
7	Menutup valve transfer dan outlet	± 5 menit	$\pm 0,1$ menit	Penutupan valve dilakukan otomatis mengikuti urutan interlock
Total	Waktu Intervensi Operator	± 26 menit	$\pm 2,4$	Aktivitas manual pada proses transfer hampir seluruhnya digantikan oleh otomasi berbasis PLC dan SCADA

Pada proses manual, operator harus membuka valve outlet KV1_0 secara manual, membuka valve transfer KV1A_0 atau KV1B_0, melakukan verifikasi urutan pembukaan valve, mengoperasikan pompa transfer dari panel lokal, melakukan pemantauan proses secara berkala di lapangan, kemudian menghentikan pompa dan menutup seluruh valve sesuai prosedur operasi. Seluruh aktivitas tersebut menyebabkan total waktu intervensi operator diperkirakan mencapai ± 26 menit.

Setelah sistem otomasi diterapkan, operator hanya melakukan verifikasi awal melalui SCADA dan memberikan perintah operasi dari ruang kontrol. Selanjutnya PLC menjalankan urutan operasi secara otomatis menggunakan metode *rule-based interlock*, mulai dari pembukaan valve, verifikasi posisi valve melalui *limit switch*, pemberian *delay* antar aktuator, pengoperasian pompa, hingga proses penutupan valve secara berurutan setelah transfer selesai. Seluruh kondisi operasi dapat dipantau secara *real-time* melalui SCADA sehingga operator tidak lagi melakukan inspeksi visual secara berulang di area proses.

Persentase efisiensi waktu dihitung menggunakan **Persamaan 2.12.1** sebagai berikut.

$$Reduksi = \frac{26 - 2,4}{26} = 90,76\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa waktu intervensi operator berhasil dikurangi sebesar 90,67%. Nilai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan proses bongkar diperoleh karena pada proses transfer terdapat lebih banyak tahapan operasi yang sebelumnya dilakukan secara manual, seperti pembukaan beberapa valve, verifikasi urutan operasi, serta pemantauan proses secara langsung. Setelah seluruh tahapan tersebut diotomatisasi menggunakan PLC dan SCADA, operator hanya berperan sebagai *supervisor* yang melakukan pengawasan terhadap kondisi sistem melalui antarmuka SCADA.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem kontrol dan monitoring tangki caustic soda berbasis PLC dan SCADA dengan metode *rule-based interlock*, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem kontrol dan monitoring tangki caustic soda berhasil dirancang menggunakan PLC Allen-Bradley CompactLogix 1769-L24ER-QBFC1B yang terintegrasi dengan FactoryTalk View SE, Automatic Control Valve, Motor Pump, Level Switch, dan Flowmeter. Komunikasi antarperangkat menggunakan jaringan EtherNet/IP sebagai media komunikasi utama antara PLC, SCADA, dan *linking device*, sedangkan komunikasi antara flowmeter dan PLC dilakukan melalui PROFIBUS PA menggunakan 1788-EN2PAR sebagai *protocol gateway*. Implementasi Add-On Instruction (AOI) pada PLC menghasilkan program yang modular, mudah digunakan kembali (*reusable*), dan mampu mengendalikan seluruh peralatan proses secara terintegrasi.
2. Metode *rule-based interlock* berhasil diimplementasikan pada logika PLC menggunakan AOI Vact_Parameter_Doble, Motor2, TransferTank, dan LS_TYP. Implementasi tersebut menghasilkan tujuh aturan interlock utama. Seluruh aturan berhasil diverifikasi selama pengujian sehingga mampu mencegah konflik antarjalur transfer, aktivasi pompa sebelum valve terbuka, serta aktivasi bersamaan antara Route_1A dan Route_1B.
3. Pengujian respon sistem menunjukkan bahwa seluruh proses berjalan sesuai urutan operasi yang dirancang pada logika *rule-based interlock*. Waktu respon sistem pada proses start bongkar diperoleh sebesar 6,12 detik, yang terdiri atas waktu pembukaan valve dan proses stabilisasi aliran. Pada proses start transfer, sistem memerlukan waktu 10,12 detik, dipengaruhi oleh urutan pembukaan valve outlet, valve transfer, serta *Timer On Delay* selama 5 detik sebelum pompa diizinkan beroperasi. Proses stop bongkar memerlukan waktu 9,12 detik, sedangkan stop transfer memerlukan waktu 26,13 detik akibat implementasi mekanisme *TimerDelayStop* dan *Timer Unlatch* selama 10 detik yang dirancang untuk memberikan waktu

penurunan tekanan fluida sebelum valve ditutup. Hasil tersebut menunjukkan bahwa waktu respon sistem merupakan konsekuensi dari implementasi logika keselamatan proses (*process interlock*) yang bertujuan meminimalkan potensi water hammer serta menjaga urutan operasi aktuator secara aman.

4. Hasil pengujian komunikasi menunjukkan bahwa seluruh perangkat mampu bertukar data secara real-time. Data flowrate, totalizer, dan density dari flowmeter berhasil dikirim melalui jaringan PROFIBUS PA, dikonversi oleh 1788-EN2PAR menjadi EtherNet/IP, kemudian diproses oleh PLC dan ditampilkan pada SCADA dengan update rate sekitar ± 500 ms. Analisis terhadap data flowmeter menunjukkan rata-rata nilai flowrate SCADA sebesar 43.384,80 kg/jam, sedangkan hasil estimasi manual berdasarkan perubahan totalizer sebesar 40.592 kg/jam, dengan selisih 6,88%. Perbedaan tersebut disebabkan oleh keterbatasan metode verifikasi manual yang menggunakan resolusi waktu dalam satuan menit, bukan oleh ketidakakuratan sensor maupun sistem SCADA.
5. Implementasi sistem otomasi berbasis *rule-based interlock* berhasil meningkatkan aspek keselamatan kerja pada proses bongkar dan transfer caustic soda. Berdasarkan hasil Risk Assessment Matrix, nilai risiko pada kondisi operasional manual berada pada kategori *High Risk* dengan *Risk Score* sebesar 12 untuk setiap aktivitas utama. Setelah implementasi sistem, nilai risiko berhasil diturunkan melalui pengurangan intervensi langsung operator pada area tangki, otomatisasi pengoperasian *valve* dan pompa, serta penerapan logika interlock untuk mencegah kesalahan operasional. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan reduksi risiko keselamatan kerja sebesar 62,5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa penerapan metode *rule-based interlock* efektif dalam meningkatkan keselamatan, keandalan, dan kontinuitas operasi pada sistem kontrol dan monitoring tangki *caustic* soda.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian yang dilakukan, terdapat beberapa hal yang dapat menjadi bahan pertimbangan untuk pengembangan dan penyempurnaan sistem pada penelitian atau implementasi selanjutnya, yaitu:

1. Disarankan untuk melakukan pengujian dengan metode pengukuran waktu yang lebih presisi, seperti menggunakan timestamp logging pada SCADA atau PLC trend, dibandingkan dengan observasi visual manual, untuk mendapatkan data waktu respon sistem yang lebih akurat.
2. Perlu dilakukan pengujian jangka panjang (long-term testing) untuk memvalidasi konsistensi performa rule-based *interlock* dalam berbagai skenario operasional, termasuk kondisi abnormal seperti kegagalan sensor atau aktuator
3. Pengujian flowmeter sebaiknya dilengkapi dengan pengukuran pembanding menggunakan metode alternatif (seperti pengukuran volume manual atau load cell pada tangki) untuk memvalidasi akurasi pembacaan sensor secara independen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ami Petro Industrial Group, "The Use of *Caustic* Soda (Sodium Hydroxide) in the Soap and Detergent Industry," amipetro.com, Feb. 2025. [Online]. Available: <https://www.amipetro.com/post/the-use-of-caustic-soda-sodium-hydroxide-in-the-soap-and-detergent-industryintroduction>
- [2] Elchemy, "*Caustic* Soda for Soap Making: Essential Guide to Quality and Application," elchemy.com, Dec. 2025. [Online]. Available: <https://elchemy.com/blogs/personal-care/caustic-soda-for-soap-making-essential-guide-to-quality-and-application>
- [3] Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS), "Sodium Hydroxide," OSH Answers Fact Sheets. [Online]. Available: https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/sodium_hydroxide.html
- [4] Tennessee Department of Health, "Sodium Hydroxide (NaOH)," Environmental Health Topics. [Online]. Available: <https://www.tn.gov/health/cedep/environmental/environmental-health-topics/eh/sodium-hydroxide.html>
- [5] Instrumentation Tools, "PLC Programming using Level Switches," instrumentationtools.com, Mar. 2021. [Online]. Available: <https://instrumentationtools.com/plc-programming-using-level-switches/>
- [6] RealPars, "What Is a Control Valve? Types, Functions, and Applications Explained," realpars.com. [Online]. Available: <https://www.realpars.com/blog/control-valve>
- [7] Emerson, "Coriolis Flow Meters — Technology Overview," emerson.com. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/en-us/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/coriolis-flow-meters>
- [8] R. Das, S. Dutta, A. Sarkar, and K. Samanta, "Automation of Tank Level Using PLC and Establishment of HMI by SCADA," IOSR J. Electr. Electron. Eng. (IOSR-JEEE), vol. 7, no. 2, pp. 61–67, 2013. [Online]. Available: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jeeec/Papers/Vol7-issue2/J0726167.pdf>

- [9] T. T. Min, S. K. T. Moe, and H. T. Mon, "Automation of Series Tank Level Control Using PLC and HMI," *Int. J. Adv. Res. Ideas Innov. Technol. (IJARIIE)*, vol. 5, no. 4, pp. 1531–1536, 2019. [Online]. Available: http://ijariie.com/AdminUploadPdf/AUTOMATION_OF_SERIES_TANK_LEVEL_CONTROL_USING_PLC_AND_HMI_ijariie10774.pdf
- [10] Instrumentation Tools, "Basics of Trips, *Interlocks*, Permissives and Sequences," *instrumentationtools.com*, Sep. 2020. [Online]. Available: <https://instrumentationtools.com/basics-of-trips-interlocks-permissives/>
- [11] "Liquid Level Monitoring and Flow Based Liquid Distribution System Using PLC and SCADA," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 8, no. 12, Dec. 2019. [Online]. Available: <https://www.ijert.org/liquid-level-monitoring-and-flow-based-liquid-distribution-system-using-plc-and-scada>
- [12] A. Mansouri, M. Feham, and B. Boucheham, "PLC-SCADA Automation of Inlet Wastewater Treatment Processes: Design, Implementation, and Evaluation," *Journal of Electrical Systems and Architecture (JESA)*, vol. 57, no. 3, 2024. doi: 10.18280/jesa.570317. [Online]. Available: <https://iijeta.org/journals/jesa/paper/10.18280/jesa.570317>
- [13] Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS), "Sodium Hydroxide," *OSH Answers Fact Sheets*. [Online]. Available: https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/sodium_hydroxide.html
- [14] Tennessee Department of Health, "Sodium Hydroxide (NaOH)," *Environmental Health Topics*. [Online]. Available: <https://www.tn.gov/health/cedep/environmental/environmental-health-topics/eh/sodium-hydroxide.html>
- [15] Giraldo et al., "Sphere Tank Safety *Interlock* Using PLC," *Academia.edu*, 2013. [Online]. Available: https://www.academia.edu/6840692/Sphere_Tank_Safety_Interlock_Using_PLC

- [16] Industrial Monitor Direct, "Design Patterns for Process vs. Safety *Interlocks* in PLC Systems," industrialmonitordirect.com, Feb. 2026. [Online]. Available: <https://industrialmonitordirect.com/blogs/knowledgebase/design-patterns-for-process-vs-safety-interlocks-in-plc-systems>
- [17] IndMall Automation, "What Is *Interlocking* in PLC?," indmallautomation.com, 2025. [Online]. Available: <https://www.indmallautomation.com/faq/what-is-interlocking-in-plc/>
- [18] A. E. Summers, "Safety Controls, Alarms, and *Interlocks* as Independent Protection Layers," SIS-Tech Solutions, 2013. [Online]. Available: <https://sis-tech.com/wp-content/uploads/2013/09/PSP-published-SCAI.pdf>
- [19] International Electrotechnical Commission, Functional Safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector, IEC 61511, Geneva, Switzerland: IEC, 2016.
- [20] S. D. Eidhin et al., "Implementation of PLC-Based *Interlocking* System," Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci. (IRJMETS), vol. 7, no. 4, Apr. 2025. [Online].
- [21] R. Das, S. Dutta, A. Sarkar, and K. Samanta, "Automation of Tank Level Using PLC and Establishment of HMI by SCADA," IOSR J. Electr. Electron. Eng. (IOSR-JEEE), vol. 7, no. 2, pp. 61–67, 2013. [Online]. Available: <https://www.iosrjournals.org/iosr-jeee/Papers/Vol7-issue2/J0726167.pdf>
- [22] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, and F. J. Doyle, Process Dynamics and Control, 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [23] B. W. Niebel and A. Freivalds, Methods, Standards, and Work Design, 12th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2009.
- [24] J. P. Womack and D. T. Jones, Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation, Revised ed. New York, NY, USA: Free Press, 2003.
- [25] Y. A. Çengel and J. M. Cimbala, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2018.
- [26] Promass 83 PROFIBUS PA Operating Instructions, Endress+Hauser, Operating Instructions, 2013.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Sheet Flowmeter

https://portal.endress.com/wa001/dla/5001053/2889/000/00/BA01511DEN_0116.pdf

Product description

Proline Promass P 300 PROFIBUS PA

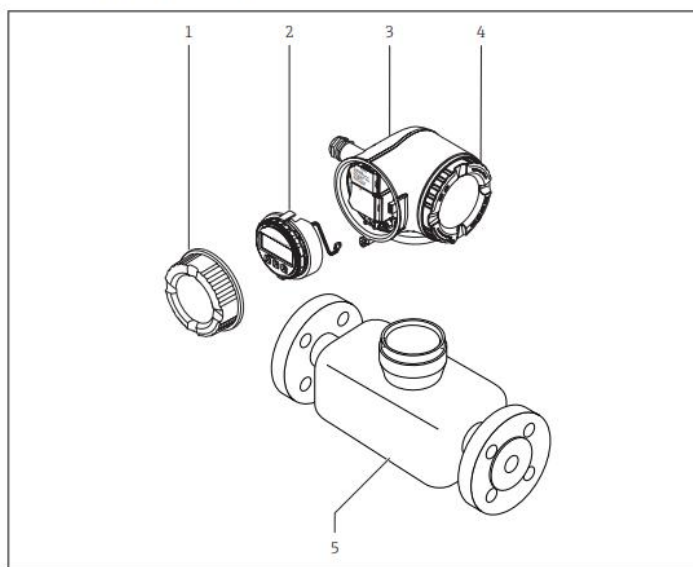
3 Product description

The device consists of a transmitter and a sensor.

The device is available as a compact version:

The transmitter and sensor form a mechanical unit.

3.1 Product design



1 Important components of a measuring device

- 1 Connection compartment cover
- 2 Display module
- 3 Transmitter housing
- 4 Electronics compartment cover
- 5 Sensor

Lampiran 2 . Data Sheet PLC Allen Bradley L24ER

7/5/26, 6:02 PM

1769-L24ER-QB1B | Allen-Bradley | US

View all
CompactLogix
I/O
Modules

Print Share QR code



1769-L24ER-QB1B CompactLogix 750KB DI/O Controller

Lifecycle status: Active Mature

Product at a glance

Repairable/Replaceable Product Registration

Description

CompactLogix 5370 L2 Controller, 2 EtherNet/IP ports with Device Level Ring Capability, 750KB Memory, 16 DC Inputs, 16 DC Outputs, Up To 4 1769 I/O Expansion Modules, 8 EtherNet/IP and 120 TCP Connections, 24V DC Input Embedded Power Supply, With 1GB SD Card, Can Support Up To 2GB SD Card, 1 USB Port.

Add to BOM Register your product Repair services Get support

Find your nearest
distributor
[Change location](#)

[Find a partner](#)

Overview

Unique Product Identifier

1769-L24ER-QB1B

Lampiran 3. Data Sheet Power Supply

<https://docs.rs-online.com/fe74/0900766b8037d092.pdf>

OMRON

Switch Mode Power Supply **S8VS** (60/90/120/180/240/480-W Models)

60/90/120/180/240/480-W Models Models with Indication Monitor and Simple Functions for Easy System Commissioning

- 60-W and 90-W models with indication monitor that conform to UL Class 2 Output standards.
- Models with screwless terminal blocks
- Status displayed on 3-digit, 7-segment display.
- Safety standards:
UL 508/60950-1,
CSA C22.2 No. 107.1/60950-1
EN 50178 (= VDE 0160)
EN 60950-1 (= VDE 0805 Teil 1)
- Input conditions: DC input is also possible from 80 to 370 VDC (Not compliant with EC Directives and other safety standards.)
- Mount to DIN Rail.
- Complies with SEMI F47-0706 (200-VAC input).
- RoHS-compliant.

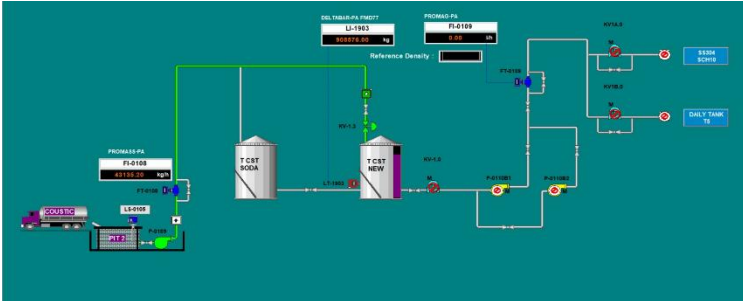
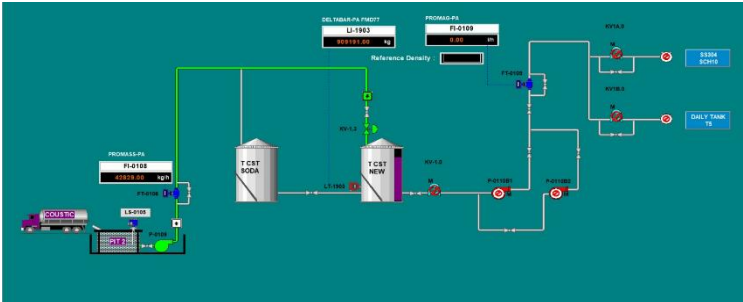
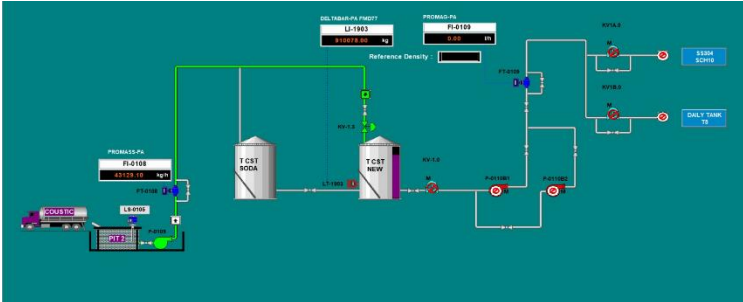


Lampiran 4. Data Sheet Actuator Control Valve

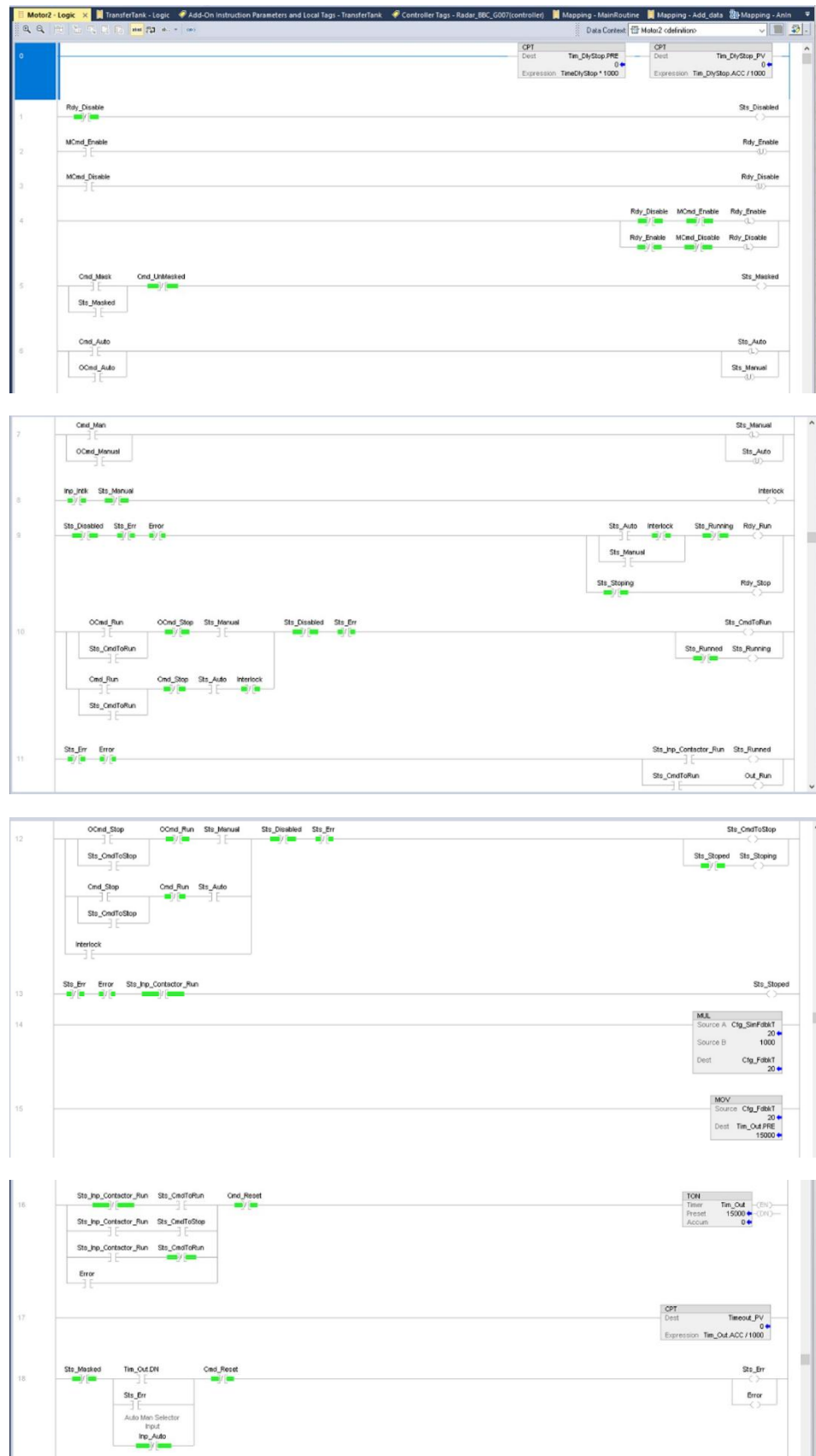
<https://www.dycom.co.id/product/Pneumatic%20Actuators.pdf>

PNEUMATIC ACTUATOR / FEATURES		TORK®	
General Features • High performance • High cycle life (1.000.000 operation) • High torque value • Standard position indicator • For quarter turn valve automation (9Nm - 2900Nm) • One compact design for double and single acting models • Dual piston rack and pinion • According to international standards (NAMUR, ISO5211) • Body: Extruded aluminium • Piston & Caps: Die cast aluminium • 90° turn, two external travel stop adjustment $\pm 5\%$ • 100% adjustable travel stop (on request) • Pressure : Double acting 2.5 bar 8 bar Single acting 3.5 bar 8 bar • Temperature : Standard -20°C 80°C On request -20°C 150°C, -30°C 80°C • TORK Pneumatic actuators have been manufactured since 1986 • Lubrication : All moving parts are factory lubricated		Protection levels for TORK actuator 	
Design Features of TORK RA Serie Actuators			
1) Actuator Body Aluminium extruded and honed surface body. Internal and external parts corrosion protected	2) Indicator It is standard on all actuators, it shows visual position of valve	3) Caps Provide max. resistance against corrosive elements, same cap design for double and single types actuators	
4) Travel Adjustment Permits adjustment of $\pm 5\%$ in both directions			
5) Springs Springs provide high performance in safe emergency shutdown operation, Cartridge design & corrosion resistant			
6) Bearing & Piston guides High cycle life, wide operation temperature range, lubricating provide high performance			
7) Nuts & Bolts Stainless steel body. Provide long term corrosion resistance.			
8) Piston rack and pinion Provides wear resistance and protect against corrosion. Die cast pistons anodized aluminium fitted with high quality seals and guides.		9) Connections • Solenoid valves, switch box, positioners : Namur VDI/VDE 3845 • Bottom valve connection: ISO5211, DIN3337 standard	
Made in Europe		02	
Sole Exclusive Distributor: PT. DYCOM ENGINEERING Tel. +62-21-8607889 Fax. +62-21-8672037 / 56977118 E-mail: sales@dycom.co.id Website: www.dycom.co.id			

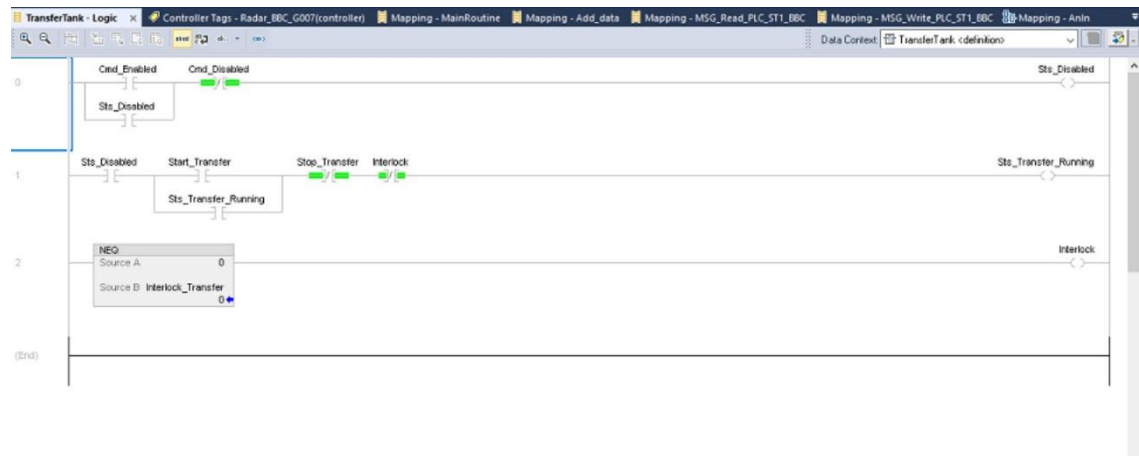
Lampiran 5. Proses Pengambilan Data Flowmeter

Flowmeter Lapangan	Tampilan SCADA
	
	
	

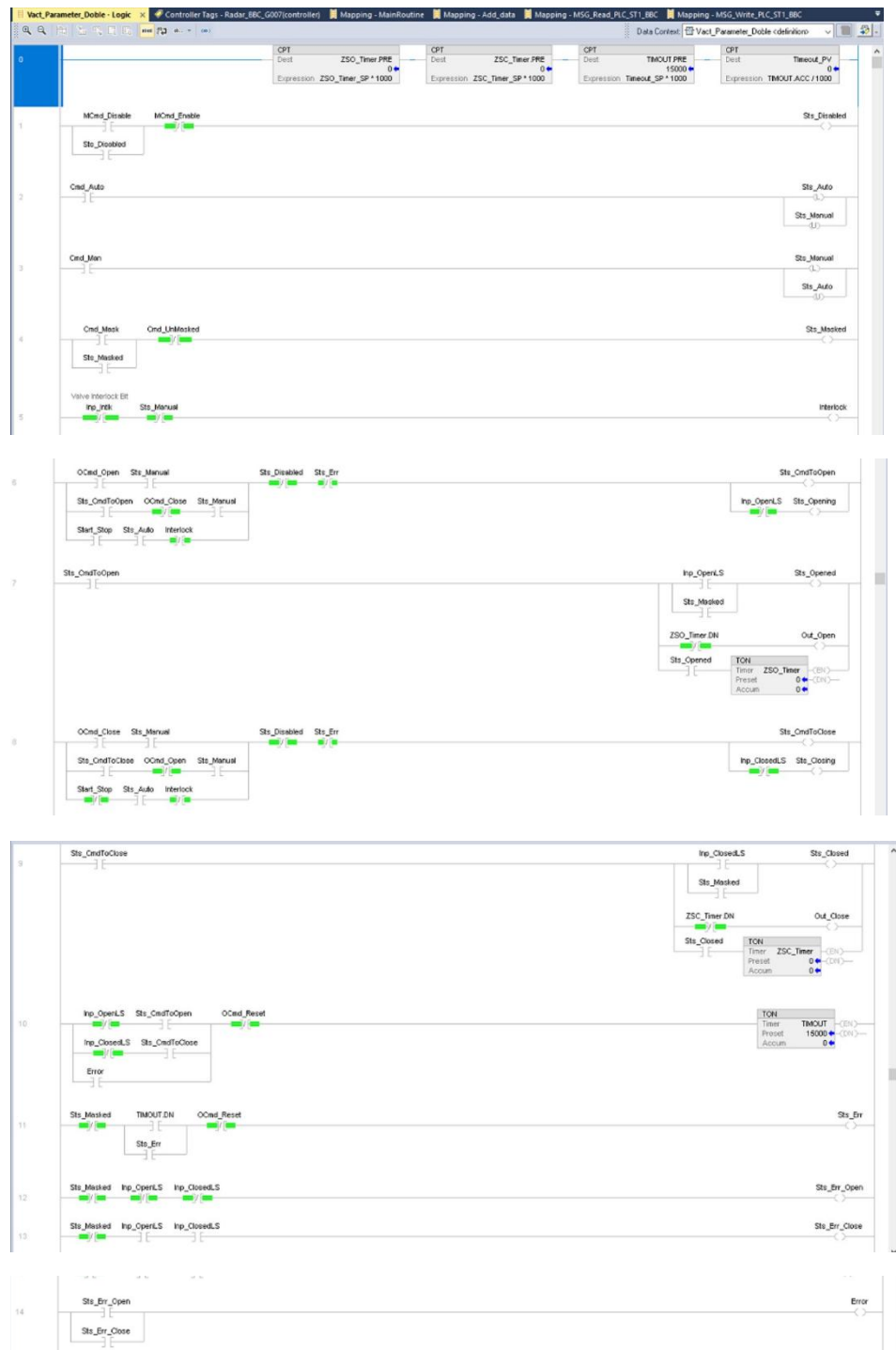
Lampiran 6. Ladder AOI Motor



Lampiran 7. Ladder AOI Transfer



Lampiran 8. Ladder Vact Parameter



Lampiran 9. Ladder LS_TYPE

