

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.