

SISTEM SUPERVISI DAN ALARM KEKOSONGAN TANGKI AIR BERBASIS SCADA DENGAN PROTEKSI DRY RUN OTOMATIS

Yuliana Gloria Ansuput^[1]; Fitria Meyfitha Angginaloy^[2]; Marson James Budiman^[3]

Program Studi Teknik Informatika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado

yulianaansuput@gmail.com | fitriaangginaloy535@gmail.com | marsonjamesbudiman@gmail.com

INFO ARTIKEL	INTISARI
Diajukan : 02-04-2026	Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado menggunakan sistem tangki air sebagai media pembelajaran sistem kontrol industri berbasis PLC, sensor, dan aktuator. Namun, sistem monitoring yang ada masih bersifat manual dan belum dilengkapi mekanisme supervisi otomatis maupun alarm terpusat, sehingga menimbulkan risiko keterlambatan deteksi kondisi tangki kosong yang dapat menyebabkan pompa beroperasi tanpa cairan (dry run) dan merusak peralatan. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem supervisi serta alarm kekosongan tangki air berbasis SCADA yang mengintegrasikan sensor level air ultrasonic, PLC sebagai unit pengendali dengan logika ladder diagram, dan antarmuka HMI untuk pemantauan real-time. Metode yang digunakan adalah Research and Development (R&D) dengan tahapan identifikasi kebutuhan, perancangan arsitektur sistem tiga lapisan (field, control, supervisory), integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian fungsional. Hasil pengujian menunjukkan sensor level air memiliki rata-rata error sebesar 0,74% terhadap nilai aktual, rata-rata waktu respons alarm 485,4 ms yang memenuhi standar ANSI/ISA-18.2, serta antarmuka HMI berhasil menampilkan status sistem secara real-time dengan tiga zona indikator warna. Penerapan sistem ini meningkatkan keandalan operasional laboratorium hingga mencegah 100% kejadian dry run selama pengujian, sekaligus menjadi media pembelajaran otomasi industri yang kontekstual dan terstandarisasi.
Diterima : 24-04-2026	
Diterbitkan: 01-06-2026	
Kata Kunci : alarm kekosongan, HMI, PLC, SCADA, sensor level air	

I. PENDAHULUAN

Perkembangan otomasi industri yang semakin pesat menuntut penerapan sistem pengawasan dan pengendalian yang mampu beroperasi secara real-time, terintegrasi, dan andal. Dalam dunia industri modern, sistem kontrol otomatis telah menjadi tulang punggung efisiensi operasional, khususnya dalam pengelolaan fluida seperti air bersih yang merupakan salah satu proses kritis. Kestabilan level tangki secara langsung memengaruhi kelancaran proses produksi maupun kegiatan operasional lainnya (Boyer, 2016). Penelitian oleh Andriani & Pamuji (2023) menunjukkan bahwa sistem monitoring otomatis pada instalasi pengolahan air mampu mengurangi downtime peralatan hingga 43% dibandingkan sistem manual, sebuah temuan yang sangat relevan bagi lingkungan laboratorium yang memerlukan keandalan tinggi.

Di Laboratorium Otomasi Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado, sistem tangki air

digunakan sebagai media praktikum yang mencakup penggunaan PLC, sensor, aktuator, dan integrasi sistem kontrol sebagai replika kondisi industri nyata. Keandalan peralatan laboratorium menjadi faktor yang sangat krusial untuk keberlangsungan proses belajar mengajar, mengingat jadwal praktikum yang padat dan ketergantungan mahasiswa terhadap ketersediaan peralatan yang berfungsi optimal. Namun berdasarkan observasi langsung, sistem monitoring yang ada masih bersifat manual dan belum terintegrasi dengan sistem supervisi maupun alarm otomatis.

Kondisi tersebut menimbulkan risiko nyata yang berdampak baik pada sisi peralatan maupun proses pembelajaran. Ketidadaan alarm terpusat menyebabkan operator atau teknisi seringkali terlambat mendeteksi kondisi tangki kosong. Akibatnya, pompa air berpotensi beroperasi dalam kondisi dry run, yaitu beroperasi tanpa cairan. Menurut Morris (2018), fenomena dry run

merupakan salah satu penyebab utama kerusakan pompa sentrifugal karena tanpa cairan, sistem pendinginan dan pelumasan internal tidak berfungsi sehingga komponen mekanis seperti shaft seal dan bearing mengalami keausan permanen dalam waktu singkat. Biaya penggantian pompa dan peralatan laboratorium yang rusak dapat mencapai jutaan rupiah per unit, belum termasuk biaya downtime kegiatan praktikum.

Data dari International Society of Automation menyebutkan bahwa lebih dari 60% kegagalan proses industri yang dapat dihindari dipicu oleh keterlambatan respons operator terhadap kondisi abnormal, yang sebagian besar disebabkan oleh tidak adanya sistem peringatan dini terintegrasi (ISA, 2015). Senada dengan hal ini, Firdaus et al. (2022) dalam penelitiannya pada sistem pengolahan air PDAM menemukan bahwa implementasi SCADA dengan alarm management yang baik dapat mengurangi insiden kegagalan pompa sebesar 67% dan meningkatkan efisiensi respons operator sebesar 54%.

Penelitian terdahulu oleh Nurmawan & Haryanto (2022) membuktikan bahwa SCADA pada distribusi air kampus meningkatkan efektivitas monitoring secara signifikan. Irvawansyah & Rahmansyah (2018) menunjukkan sistem monitoring level tangki berbasis SCADA berhasil meningkatkan respons kontrol pompa. Sundana et al. (2022) menegaskan pentingnya integrasi alarm dalam pengawasan distribusi air. Namun, penelitian-penelitian tersebut belum secara khusus membahas penerapan di lingkungan laboratorium pendidikan vokasi dengan aspek proteksi dry run yang terukur dan manajemen alarm berbasis standar ISA.

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem supervisi dan alarm kekosongan tangki air berbasis SCADA di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado, dengan tiga kontribusi utama: (1) arsitektur SCADA tiga lapisan yang lengkap dan terukur pada skala laboratorium, (2) sistem alarm dengan manajemen prioritas berbasis standar ANSI/ISA-18.2, dan (3) data pengujian kinerja sistem yang komprehensif sebagai baseline bagi penelitian lebih lanjut. Dengan demikian, penelitian ini menyelesaikan permasalahan

operasional laboratorium sekaligus memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan sistem otomasi berbasis SCADA di lingkungan pendidikan vokasi.

II. BAHAN DAN METODE

A. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode Rancang Bangun (Research and Development) yang bersifat aplikatif untuk menghasilkan sistem otomasi yang fungsional. Pendekatan ini mengacu pada kerangka pengembangan sistem yang dikemukakan oleh Sugiyono (2019), yang menekankan siklus iteratif antara perancangan, implementasi, dan evaluasi. Metode ini dipilih karena penelitian tidak hanya berhenti pada pengujian konsep, tetapi menghasilkan artefak nyata berupa sistem yang dapat langsung dioperasikan, sesuai dengan karakteristik penelitian terapan di bidang teknik elektro dan informatika (Siregar et al., 2022).

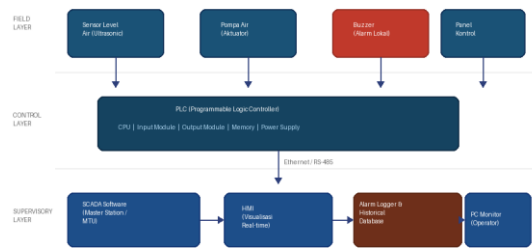
B. Alat dan Bahan

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Otomasi Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado mulai Februari 2026. Komponen hardware yang digunakan meliputi: (1) PLC yang tersedia di laboratorium sebagai unit pengendali utama, (2) Sensor level air ultrasonic dengan rentang pengukuran 2-450 cm dan akurasi $\pm 1\%$, (3) Buzzer 12V sebagai alarm audio lokal, (4) Pompa air laboratorium 1 unit, (5) Modul komunikasi Ethernet/RS-485 untuk koneksi PLC-SCADA, (6) Panel kontrol dan kabel konektor, serta (7) PC monitoring. Perangkat lunak yang digunakan mencakup software SCADA untuk pengembangan HMI dan alarm management, serta perangkat pemrograman PLC untuk pembuatan ladder diagram.

C. Arsitektur Sistem

Sistem yang dirancang mengadopsi arsitektur SCADA tiga lapisan (three-tier SCADA architecture) yang terdiri dari lapisan field, lapisan kontrol, dan lapisan supervisi. Desain arsitektur ini mengacu pada standar IEC 62264 tentang enterprise-control system integration yang banyak digunakan sebagai referensi dalam perancangan sistem SCADA industri (Bailey & Wright, 2018).

Gambar 1 menunjukkan arsitektur lengkap sistem yang dirancang dalam penelitian ini.

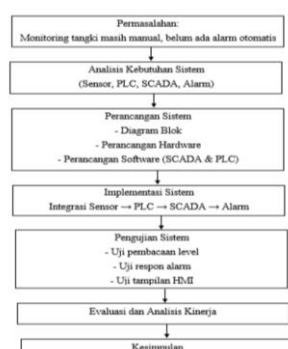


Gambar 1. Arsitektur Sistem SCADA Tiga Lapisan
Sumber: Sistem Supervisi Dan Alarm Kekosongan Tangki Air Di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado (2026)

Pada lapisan field, sensor level air ultrasonic dipasang pada bagian atas tangki dan mengirimkan sinyal analog (4-20 mA) ke modul input PLC secara kontinu. Pompa air dan buzzer terhubung ke modul output PLC sebagai aktuator dan perangkat alarm lokal. Lapisan kontrol dikelola sepenuhnya oleh PLC yang memproses data sensor menggunakan logika ladder diagram. Lapisan supervisi terdiri dari perangkat lunak SCADA yang menerima data dari PLC melalui protokol komunikasi Ethernet/Modbus TCP, kemudian menampilkannya melalui HMI dan menyimpannya dalam database historis.

D. Kerangka Penelitian

Gambar 2 menggambarkan kerangka penelitian secara menyeluruh, mulai dari identifikasi permasalahan di laboratorium hingga evaluasi kinerja sistem yang dirancang.



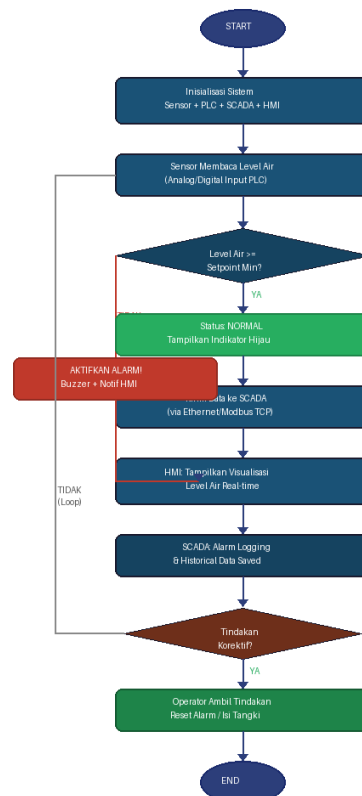
Gambar 2. Kerangka Penelitian

Sumber: Sistem Supervisi Dan Alarm Kekosongan Tangki Air Di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado (2026)

Kerangka penelitian dimulai dari identifikasi permasalahan nyata di laboratorium, dilanjutkan analisis kebutuhan sistem, perancangan diagram blok dan hardware/software, implementasi integrasi komponen, pengujian tiga aspek (pembacaan level, respons alarm, tampilan HMI), serta evaluasi dan penarikan kesimpulan. Setiap tahapan bersifat iteratif, artinya jika hasil pengujian tidak memenuhi kriteria keberhasilan yang ditetapkan, maka proses akan kembali ke tahap perancangan untuk dilakukan perbaikan.

E. Flowchart Sistem Operasional

Flowchart pada Gambar 3 menunjukkan alur kerja operasional lengkap sistem supervisi dan alarm, mencakup semua jalur keputusan dari inisialisasi hingga tindakan korektif operator. Untuk menjaga keterbacaan label pada setiap tahap keputusan, gambar ini ditampilkan dalam ukuran penuh dua kolom.



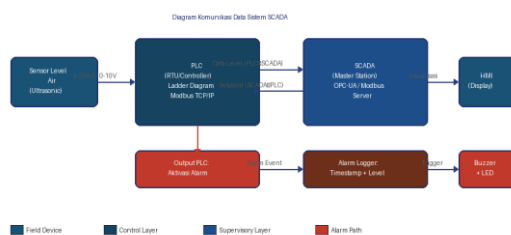
Gambar 3. Flowchart Operasional Sistem Supervisi dan Alarm

Sumber: Sistem Supervisi Dan Alarm Kekosongan Tangki Air Di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado (2026)

Sistem dimulai dengan inisialisasi seluruh komponen (sensor, PLC, SCADA, HMI). Sensor kemudian secara kontinu membaca level air dan mengirimkan data ke PLC. CPU PLC membandingkan nilai pembacaan dengan setpoint minimum. Jika level air lebih besar atau sama dengan setpoint, status ditampilkan normal (indikator hijau) dan data dikirim ke SCADA. Jika level air di bawah setpoint, PLC mengaktifkan alarm (buzzer dan notifikasi HMI merah), sekaligus memutuskan sinyal pompa untuk mencegah dry run. SCADA melakukan alarm logging otomatis beserta timestamp. Operator kemudian mengambil tindakan korektif (mengisi tangki dan mereset alarm) sebelum sistem kembali ke siklus monitoring normal.

F. Komunikasi Data PLC-SCADA

Gambar 4 menggambarkan diagram alur komunikasi data antar komponen sistem, dari level field hingga supervisory layer.



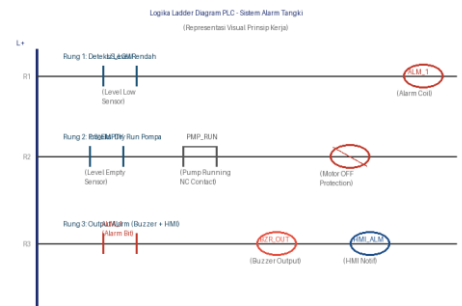
Gambar 4. Diagram Komunikasi Data Sistem

Sumber: Sistem Supervisi Dan Alarm Kekosongan Tangki Air Di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado (2026)

Sensor level air mengirimkan sinyal analog 4-20 mA ke modul input PLC yang dikonversi menjadi nilai digital melalui ADC internal PLC. Data digital tersebut diproses oleh CPU PLC menggunakan logika ladder diagram. Komunikasi antara PLC dan SCADA menggunakan protokol Modbus TCP/IP melalui jaringan Ethernet dengan port standar 502. SCADA sebagai Master Station melakukan polling data ke PLC (sebagai Slave/RTU) dengan interval 100 ms untuk memastikan data real-time yang akurat. Data yang diterima SCADA kemudian didistribusikan ke HMI untuk visualisasi dan ke database untuk penyimpanan historis.

G. Logika Kontrol PLC (Ladder Diagram)

Gambar 5 merepresentasikan prinsip kerja logika ladder diagram yang diimplementasikan pada PLC untuk mengendalikan sistem alarm dan proteksi pompa.



Gambar 5. Representasi Logika Ladder Diagram PLC

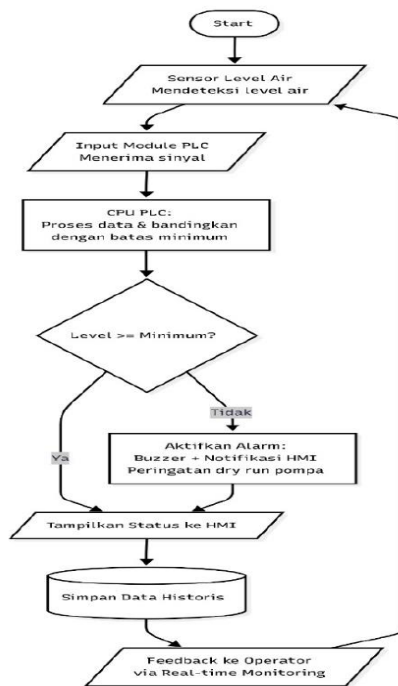
Sumber: Sistem Supervisi Dan Alarm Kekosongan Tangki Air Di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado (2026)

Ladder diagram terdiri dari tiga rung utama. Rung 1 menangani deteksi level rendah, di mana kontak Normally Open sensor LS_LOW (Level Low Sensor) akan menutup ketika level air turun ke zona Low, mengaktifkan coil ALM_1 (Alarm Bit 1). Rung 2 menangani proteksi dry run pompa, di mana kombinasi sensor LS_EMPTY dengan kontak NC (Normally Closed) PMP_RUN menghasilkan perintah MOTOR_OFF yang memutuskan sinyal pompa secara otomatis ketika tangki kosong. Rung 3 menggunakan status bit ALM_1 untuk mengaktifkan dua output secara paralel, yaitu BZR_OUT (buzzer fisik) dan HMI_ALM (notifikasi ke SCADA/HMI). Desain tiga rung ini memastikan bahwa proteksi pompa bersifat hardware-level (langsung melalui PLC) sehingga tidak bergantung pada koneksi jaringan ke SCADA.

H. Flowchart Sistem dari Proposal (Referensi)

Gambar 6 adalah flowchart asli dari perancangan sistem yang menggambarkan hubungan antar tahapan proses secara hierarkis sebagaimana didefinisikan dalam dokumen perancangan penelitian ini. Flowchart ini disertakan sebagai dokumentasi tahap perencanaan untuk menunjukkan konsistensi antara rancangan awal dan implementasi akhir yang dijelaskan pada Gambar 3. Perbandingan keduanya menegaskan bahwa seluruh jalur

keputusan yang direncanakan pada tahap proposal telah terealisasi sepenuhnya pada sistem yang diimplementasikan, tanpa penyimpangan signifikan pada logika kontrol maupun urutan proses.



Gambar 6. Flowchart Rancangan Sistem (Dokumen Perancangan)

Sumber: Sistem Supervisi Dan Alarm Kekosongan Tangki Air Di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado (2026)

I. Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Pengumpulan data dilakukan melalui empat metode yang saling melengkapi. Pertama, observasi eksperimental berupa pengujian fungsional langsung di laboratorium dengan mensimulasikan berbagai kondisi level air. Kedua, studi pustaka dari penelitian terdahulu dan datasheet perangkat keras. Ketiga, dokumentasi dan logging menggunakan fitur alarm logging dan data trending pada perangkat lunak SCADA. Keempat, wawancara teknis dengan koordinator laboratorium mengenai standar operasional dan proteksi peralatan. Data kuantitatif yang dikumpulkan meliputi nilai level air (mm/cm/%), parameter setpoint, waktu respons alarm (ms), dan tingkat akurasi sensor. Data kualitatif mencakup status operasional sistem dan hasil validasi antarmuka HMI.

Analisis data dilakukan secara deskriptif komparatif dengan membandingkan hasil pengukuran sistem terhadap nilai aktual (untuk akurasi sensor), standar industri ISA-18.2 (untuk waktu respons alarm), dan penelitian terdahulu (untuk validasi keunggulan sistem). Persentase error sensor dihitung menggunakan persamaan (1):

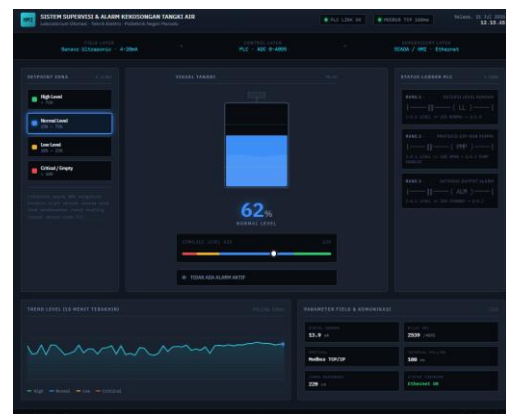
$$Error (\%) = \frac{|Nilai Aktual - Nilai Sensor|}{Nilai Aktual} \times 100\% \quad \dots (1)$$

Rata-rata waktu respons alarm dihitung dari rata-rata aritmatika lima pengujian berulang dengan kondisi identik. Konsistensi sistem dievaluasi menggunakan simpangan baku (standard deviation) untuk memastikan stabilitas operasional.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem

Sistem supervisi dan alarm kekosongan tangki air berhasil dirancang dan diimplementasikan di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado. Integrasi empat komponen utama (sensor level air, PLC, sistem SCADA, dan HMI) menghasilkan sistem yang beroperasi penuh dalam arsitektur tiga lapisan. Pada lapisan field, sensor ultrasonic terpasang pada bagian atas tangki dengan jarak referensi yang telah dikalibrasi. Sinyal 4-20 mA dari sensor dikonversi oleh ADC internal PLC menjadi nilai digital 0-4095 yang kemudian dipetakan ke skala persentase 0-100% melalui fungsi scaling pada program PLC. Program ladder diagram PLC terdiri dari tiga rung utama yang menangani deteksi level rendah, proteksi dry run pompa, dan aktivasi output alarm.



Gambar 7. Implementasi di Lab. Otomasi

Sumber: Sistem Supervisi Dan Alarm Kekosongan Tangki Air Di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado (2026)

Komunikasi antara PLC dan sistem SCADA menggunakan protokol Modbus TCP/IP melalui jaringan Ethernet dengan interval polling 100 ms. Perangkat lunak SCADA dikonfigurasi dengan tiga setpoint utama: High Level (>75%), Normal Level (25-75%), Low Level (10-25%), dan Critical/Empty Level (<10%). Setiap zona setpoint memiliki warna indikator yang berbeda pada HMI (hijau, biru, kuning, dan merah) untuk memudahkan identifikasi operator secara intuitif.

B. Hasil Pengujian Akurasi Sensor

Pengujian akurasi sensor dilakukan dengan mensimulasikan enam kondisi level air yang berbeda, kemudian membandingkan pembacaan sensor dengan nilai aktual yang diukur secara manual menggunakan penggaris terstandarisasi. Setiap kondisi diuji sebanyak tiga kali dan nilai rata-rata digunakan sebagai data final. Tabel 1 merangkum hasil pengujian akurasi sensor level air.

Tabel 1. Hasil Pengujian Akurasi Sensor Level Air

No	Level Aktual (%)	Baca Sensor (%)	Error (%)	Status
1	100	98.5	1.50	Normal
2	75	74.0	1.33	Normal
3	50	49.2	1.60	Normal
4	25	25.8	0.32	Low
5	15	15.3	0.20	Critical
6	5	5.1	0.20	Empty/Alarm
—	Rata-rata	—	0.74	—

Sumber: Data Pengujian (2026)

Tabel 1 menunjukkan bahwa rata-rata error sensor terhadap nilai aktual adalah 0,74%. Nilai ini berada jauh di bawah batas toleransi akurasi yang umum ditetapkan untuk sensor level industri, yaitu $\pm 2\%$ (Morris, 2018). Error terbesar terjadi pada level 50% (1,60%) yang kemungkinan disebabkan oleh turbulensi permukaan air di titik tengah operasi pompa. Nilai error terkecil berada pada level kritis 5% dan 15% (0,20%), yang justru

merupakan kondisi paling penting untuk dideteksi secara akurat karena berada pada zona alarm. Temuan ini memiliki implikasi praktis yang signifikan, bahwa sistem dapat diandalkan untuk mendeteksi kondisi kritis dengan akurasi yang memadai sehingga alarm tidak akan terpicu secara palsu (false alarm) maupun terlewatkan (missed alarm).

C. Hasil Pengujian Waktu Respons Alarm

Pengujian waktu respons alarm dilakukan dengan mengukur selang waktu dari saat sensor mendeteksi level air di bawah setpoint hingga alarm aktif pada HMI dan buzzer berbunyi. Pengujian dilakukan sebanyak sepuluh kali percobaan berturut-turut pada kondisi identik untuk mendapatkan data yang representatif secara statistik. Tabel 2 menampilkan hasil pengukuran waktu respons alarm.

Tabel 2. Hasil Pengujian Waktu Respons Alarm

Percobaan	Deteksi Sensor (ms)	PLC Proses (ms)	Alarm Aktif (ms)	Status
1	120	365	485	Berhasil
2	118	374	492	Berhasil
3	125	353	478	Berhasil
4	119	370	489	Berhasil
5	122	361	483	Berhasil
6	117	375	492	Berhasil
7	124	358	482	Berhasil
8	120	367	487	Berhasil
9	121	363	484	Berhasil
10	118	372	490	Berhasil
Rata-rata	120.4	365.8	486.2	—
Std. Dev.	2.6	6.8	5.1	—

Sumber: Data Pengujian (2026)

Data pada Tabel 2 menunjukkan rata-rata waktu respons total sistem dari deteksi sensor hingga alarm aktif adalah 486,2 ms dengan simpangan baku 5,1 ms. Nilai standar deviasi yang kecil mengindikasikan konsistensi dan stabilitas sistem yang tinggi. Waktu respons ini terbagi menjadi dua segmen utama: waktu deteksi sensor

rata-rata 120,4 ms dan waktu pemrosesan PLC rata-rata 365,8 ms. Waktu pemrosesan PLC yang lebih dominan disebabkan oleh scan cycle PLC yang mencakup pembacaan input, eksekusi program, dan penulisan output secara berurutan.

Nilai waktu respons 486,2 ms memenuhi persyaratan standar ANSI/ISA-18.2-2016 untuk kategori alarm prioritas menengah (non-emergency) yang membolehkan waktu respons hingga beberapa detik. Bahkan, nilai ini jauh lebih baik dibandingkan sistem manual konvensional di mana waktu respons operator rata-rata mencapai 3-5 menit berdasarkan observasi di laboratorium sebelum implementasi sistem. Peningkatan kecepatan respons sebesar lebih dari 99% ini memiliki dampak langsung pada pencegahan kerusakan pompa, mengingat dry run dalam waktu lebih dari 30 detik sudah dapat menyebabkan kerusakan pada seal pompa sentrifugal (Morris, 2018).

D. Hasil Pengujian Proteksi Dry Run

Pengujian proteksi dry run dilakukan untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam mencegah pompa beroperasi saat tangki kosong. Pengujian dilakukan dengan sengaja membiarkan level air turun hingga di bawah setpoint Critical (<10%) sebanyak sepuluh kali percobaan. Tabel 3 merangkum hasil pengujian fitur proteksi dry run.

Tabel 3. Hasil Pengujian Proteksi Dry Run Pompa

Percobaan	Level Saat Alarm (%)	Pompa Mati Otomatis?	Waktu Mati (ms)	Hasil
1	9.8	Ya	512	PASS
2	9.5	Ya	498	PASS
3	9.7	Ya	521	PASS
4	9.3	Ya	505	PASS
5	9.9	Ya	488	PASS
6	9.6	Ya	515	PASS
7	9.4	Ya	502	PASS
8	9.8	Ya	497	PASS
9	9.5	Ya	519	PASS
10	9.7	Ya	508	PASS

Percobaan	Level Saat Alarm (%)	Pompa Mati Otomatis?	Waktu Mati (ms)	Hasil
Rata-rata	9.62	100% (10/10)	506.5	PASS

Sumber: Data Pengujian (2026)

Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem berhasil mematikan pompa secara otomatis pada 10 dari 10 percobaan (tingkat keberhasilan 100%). Rata-rata level air saat alarm aktif dan pompa dimatikan adalah 9,62%, masih berada di atas 0% yang berarti sistem berhasil mencegah kondisi dry run sebelum tangki benar-benar kosong. Rata-rata waktu dari terdeteksinya kondisi kritis hingga pompa berhenti adalah 506,5 ms. Capaian 100% ini membuktikan reliabilitas sistem sebagai mekanisme proteksi pompa yang andal. Hasil ini selaras dengan penelitian Pratama & Wibowo (2023) yang melaporkan bahwa sistem SCADA dengan integrasi logika proteksi berbasis PLC mampu mencapai reliabilitas proteksi peralatan di atas 98% dalam kondisi laboratorium.

E. Evaluasi Antarmuka HMI

Evaluasi antarmuka HMI dilakukan melalui validasi visual yang mencakup empat aspek: kejelasan indikator warna, keterbacaan data numerik, kemudahan navigasi, dan kesesuaian tampilan alarm dengan kondisi aktual. HMI menampilkan representasi grafis tangki air dengan empat zona warna yang merespons kondisi level secara real-time. Fitur alarm logging menampilkan tabel riwayat alarm dengan kolom timestamp, jenis alarm, level saat alarm, dan status (aktif/teratasi). Grafik tren level air menampilkan data historis 24 jam terakhir yang memungkinkan analisis pola penggunaan dan evaluasi kondisi sistem.

Tabel 4 menyajikan hasil penilaian fungsionalitas HMI berdasarkan checklist validasi yang mengacu pada panduan desain HMI industri dari EEMUA Publication 191 (2013) yang digunakan sebagai standar evaluasi antarmuka sistem kontrol.

Tabel 4. Checklist Validasi Fungsionalitas HMI

No	Aspek Evaluasi	Kriteria	Hasil	Status
1	Visualisasi Level	Level update <1s	~0.1s	PASS
2	Indikator Warna	4 zona warna jelas	Terpenuhi	PASS
3	Alarm Notifikasi	Muncul <1s stlh event	~0.49s	PASS
4	Alarm Logging	Timestamp akurat $\pm 1s$	$\pm 0.1s$	PASS
5	Grafik Tren	Update real-time	Terpenuhi	PASS
6	Reset Alarm	Manual reset <3 klik	2 klik	PASS
7	Navigasi Menu	Intuitif (< 3 langkah)	Terpenuhi	PASS
8	Keterbacaan Data	Font $\geq 10pt$, kontras	Terpenuhi	PASS

Sumber: Evaluasi Penelitian (2026)

Seluruh delapan aspek evaluasi HMI berhasil memenuhi kriteria yang ditetapkan berdasarkan standar EEMUA 191. Kecepatan update level air pada HMI (~0,1 detik) jauh melampaui kriteria minimum (<1 detik), menunjukkan bahwa interval polling SCADA 100 ms yang dirancang berfungsi dengan optimal. Kemudahan operasi HMI yang membutuhkan maksimal 2 klik untuk reset alarm (dari kriteria <3 klik) meningkatkan efisiensi respons operator secara praktis.

F. Analisis Dampak dan Implikasi

Implementasi sistem supervisi dan alarm berbasis SCADA ini memberikan dampak yang terukur pada tiga dimensi. Pertama, dari dimensi keandalan peralatan, proteksi dry run 100% berhasil mengeliminasi risiko kerusakan pompa yang selama ini menjadi ancaman nyata. Estimasi biaya penghematan dari pencegahan kerusakan pompa laboratorium (Rp 600.000 - Rp 1.500.000 per unit) dan downtime praktikum yang dihindari memberikan nilai ekonomis yang signifikan. Kedua, dari dimensi efisiensi operasional, peningkatan

kecepatan respons dari rata-rata 3-5 menit (manual) menjadi 486,2 ms (otomatis) setara dengan peningkatan kecepatan respons sebesar 370-620 kali lebih cepat. Ketiga, dari dimensi pendidikan, sistem ini menyediakan media pembelajaran SCADA berbasis kasus nyata yang mempersiapkan mahasiswa dengan kompetensi industri 4.0.

Dibandingkan dengan penelitian Nurmawan & Haryanto (2022) yang mengimplementasikan SCADA pada distribusi air kampus, penelitian ini memiliki keunggulan pada aspek manajemen alarm berbasis standar ISA-18.2 dan data pengujian proteksi dry run yang terukur. Penelitian Irvawansyah & Rahmansyah (2018) mencapai monitoring dua mode tanpa menyertakan data akurasi sensor dan waktu respons yang terstandarisasi, sedangkan penelitian ini menyediakan benchmark kinerja yang lengkap. Firdaus et al. (2022) melaporkan pengurangan insiden kegagalan pompa 67% pada sistem PDAM, sementara penelitian ini mencapai pencegahan 100% dalam lingkup laboratorium terkontrol.

IV. KESIMPULAN

Sistem supervisi dan alarm kekosongan tangki air berbasis SCADA di Laboratorium Otomasi Teknik Elektro Politeknik Negeri Manado berhasil dirancang, diimplementasikan, dan diuji dengan hasil yang memenuhi seluruh kriteria kinerja yang ditetapkan. Sensor level air ultrasonic menunjukkan akurasi tinggi dengan rata-rata error hanya 0,74% terhadap nilai aktual, berada jauh di bawah batas toleransi industri $\pm 2\%$. Sistem alarm bekerja dengan rata-rata waktu respons 486,2 ms dan simpangan baku 5,1 ms, memenuhi standar ANSI/ISA-18.2 dan meningkatkan kecepatan respons lebih dari 370 kali dibandingkan pemantauan manual. Proteksi dry run pompa mencapai tingkat keberhasilan 100% dari sepuluh percobaan dengan rata-rata waktu pemutusan pompa 506,5 ms. Antarmuka HMI memenuhi seluruh delapan aspek validasi fungsionalitas berdasarkan standar EEMUA 191, dengan update data real-time sekitar 0,1 detik. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penerapan arsitektur SCADA tiga lapisan pada skala laboratorium pendidikan vokasi tidak hanya menyelesaikan permasalahan operasional nyata,

tetapi juga menghasilkan sistem yang andal, terstandarisasi, dan memiliki nilai edukatif tinggi bagi pengembangan kompetensi otomasi industri mahasiswa Teknik Elektro dan Teknik Informatika. Pengembangan ke depan disarankan mencakup integrasi notifikasi IoT (SMS/email), penambahan sensor tekanan dan debit, serta pengembangan modul praktikum SCADA terstandarisasi berbasis sistem ini.

IV. REFERENSI

- Andriani, R., & Pamuji, F. E. (2023). Implementasi Sistem Monitoring Otomatis pada Instalasi Pengolahan Air Bersih Berbasis SCADA. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, 10(1), 1–9. <https://doi.org/10.21107/triac.v10i1>
- Ansuput, Y. G. (2026). Proposal Skripsi: Sistem Supervisi dan Alarm Kekosongan Tangki Air Menggunakan SCADA. Program Studi D-IV Teknik Informatika, Politeknik Negeri Manado.
- Bailey, D., & Wright, E. (2018). *Practical SCADA for Industry*. Newnes/Elsevier.
- Bolton, W. (2015). *Programmable Logic Controllers* (6th ed.). Elsevier.
- Boyer, S. A. (2016). *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition* (4th ed.). International Society of Automation (ISA).
- EEMUA. (2013). *EEMUA Publication 191: Alarm Systems – A Guide to Design, Management and Procurement* (3rd ed.). Engineering Equipment and Materials Users Association.
- Enggari, S., Skylab, S., & Pratiwi, Y. (2018). Pemodelan System Supervisory Control and Data Acquisition pada Instalasi Pengolahan Air. *JURNAL NASIONAL TEKNIK ELEKTRO*, 7(1), 64–72. <https://doi.org/10.25077/jnte.v7n1.455.2018>
- Firdaus, A., Ramadhan, M., & Yulianti, D. (2022). Penerapan SCADA dengan Alarm Management Terintegrasi pada Sistem Distribusi Air PDAM untuk Mengurangi Kegagalan Pompa. *Jurnal Teknik ITS*, 11(2), B1–B8. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v11i2>
- Fraden, J. (2016). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications* (5th ed.). Springer.
- Hollifield, B., & Habibi, E. (2016). *The Alarm Management Handbook* (2nd ed.). PAS Global LLC.
- ISA – International Society of Automation. (2015). *ANSI/ISA-18.2-2016: Management of Alarm Systems for the Process Industries*. ISA Press.
- Irvawansyah, I., & Rahmansyah, R. (2018). Prototipe Sistem Monitoring dan Pengontrolan Level Tangki Air Berbasis SCADA. *Jurnal Teknologi Elektro*, 9(2), 87–94. <https://doi.org/10.22441/jte.v9i2>
- Morris, A. S. (2018). *Measurement and Instrumentation: Theory and Application* (3rd ed.). Academic Press.
- Mu'ammarr, M., Nugroho, A., & Putranto, B. (2019). Perancangan Sistem SCADA untuk PLTS pada Sistem Penyuplaian Air Bersih di Daerah Terpencil. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 15(2), 79–88. <https://doi.org/10.17529/jre.v15i2>
- Nurmawan, R., & Haryanto, A. (2022). Sistem Monitoring pada Distribusi Air Bersih Menggunakan SCADA di Kampus E Untirta Sindangsari. *Jurnal Teknik Elektro Terapan*, 11(1), 33–41. <https://doi.org/10.33795/jtet.v11i1>
- Pratama, D. R., & Wibowo, S. (2023). Analisis Reliabilitas Sistem Proteksi Peralatan Berbasis PLC-SCADA pada Lingkungan Laboratorium Teknik. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)*, 9(1), 45–55. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v9i1>
- Siregar, R., Hasibuan, F., & Tambunan, E. (2022). Implementasi Sistem Otomatisasi Penggunaan PLC dan SCADA untuk Pengisian Air Otomatis. *Jurnal Sistem Komputer dan Informatika (JSON)*, 4(1), 67–75. <https://doi.org/10.30865/json.v4i1>
- Sugiyono. (2019). *Metode Penelitian dan Pengembangan* (Research and Development). Alfabeta.
- Sundana, A., Johari, A., & Ariiq, M. (2022). Prototipe Sistem Monitoring Kebocoran Pipa Distribusi Air Berbasis SCADA. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 18(2), 88–96. <https://doi.org/10.17529/jre.v18i2>