



Prototipe Instrumentasi *Control Automatic* dengan *Distributed Control System* (DCS) Berbasis ESP32 pada *Process Truck Loading* Minyak Bumi

Ahmad Kholifatul Ardi

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Pamulang, Indonesia

Penulis Korespondensi: ahmadardhi96@gmail.com

Abstract. This study addresses small-scale crude oil truck loading systems that still rely on manual human control, which endangers the environment, equipment, and personnel. Unmonitored human error such as overfilling occurs because the flow is not observed in real time, fires may arise from crude oil exposed to ambient heat, and miscommunication frequently happens between the local operator running the process and the operator recording the loading data. The purpose of this study is to design a reliable automated control system for the crude oil truck loading operation, to implement instrumentation on that operation, and to build an actual-condition graphical HMI using Node-RED. The method used is experimental research, comprising problem-data collection, design analysis, and implementation. The monitored parameters are tank level, temperature, and crude oil flow, read by an ESP32-based controller and displayed on a local LCD panel as well as a Node-RED DCS HMI in real time. The automated control with the DCS system is equipped with protection mechanisms (overheat, low level, and overflow) that safeguard the equipment and its surroundings in the event of an operational failure. The results show that the ESP32-based automated control runs according to the actual operating design; the HC-SR04 level sensor is accurate but limited below 3 cm, the DS18B20 temperature sensor is accurate within ± 1 C, while the YF-S201C flow sensor is less accurate below 1 L/min. The DCS HMI display makes it easier for operators to view the parameter history for data logging and troubleshooting analysis.

Keywords: Automatic Control; DCS; Operation; Petroleum; Truck Loading.

Abstrak. Sistem *loading truck* minyak bumi berskala kecil masih banyak mengandalkan kontrol manual oleh manusia yang membahayakan lingkungan, peralatan, dan manusia. Banyak terjadi risiko *human error* yang tidak terpantau seperti *overfilling* akibat *flow* tidak terpantau operator secara *real time*, kebakaran akibat minyak bumi yang terpapar panas lingkungan sekitar, serta *miss* komunikasi antar operator karena tidak ada data yang terpantau secara *real time*. Tujuan penelitian ini adalah merancang sistem kontrol otomatis yang handal pada operasi *loading truck* minyak bumi, mengimplementasikan peralatan instrumentasi pada operasi tersebut, serta membuat tampilan HMI grafis kondisi aktual menggunakan Node-RED. Metode yang digunakan adalah *experimental research*, yaitu mengumpulkan data permasalahan, analisa perancangan, lalu melakukan implementasi. Parameter yang dipantau meliputi *level* tangki, *temperature*, dan aliran minyak bumi yang dibaca oleh kontroler berbasis ESP32 dan ditampilkan pada panel LCD lokal serta HMI DCS Node-RED secara *real time*. Kontrol otomatis dengan sistem DCS ini disertai *proteksi* (*overheat*, *level low*, dan *overflow*) yang mengamankan peralatan serta lingkungan sekitarnya jika terjadi kegagalan operasi. Hasil menunjukkan kontrol otomatis berbasis ESP32 berjalan sesuai rancangan kondisi aktual; sensor *level* HC-SR04 akurat namun dibatasi di bawah 3 cm, sensor *temperature* DS18B20 akurat dengan selisih ± 1 C, sedangkan sensor *flow* YF-S201C kurang akurat di bawah 1 L/menit. Tampilan HMI DCS mempermudah operator melihat *history* parameter untuk pencatatan data dan analisis dalam perbaikan peralatan.

Kata Kunci: DCS; Kontrol Otomatis; Loading Truck; Minyak Bumi; Pengoperasian.

1. LATAR BELAKANG

Sistem *truck loading* merupakan tahap krusial dalam rantai distribusi minyak bumi, di mana kesalahan kecil dapat menimbulkan kerugian besar dan risiko keselamatan yang tinggi (American Petroleum Institute, 2021). Instrumentasi sangat penting agar operasi kontrol otomatis dapat berjalan untuk *monitoring*, *proteksi*, dan operasi kontrol yang *squensial*. Sistem *Distributed Control System* (DCS) sendiri adalah konsep kendali terdistribusi yang memungkinkan pengawasan dan kontrol otomatis secara *real time* melalui komunikasi antar-

node dalam satu jaringan (Hua et al., 2021). Penelitian ini memanfaatkan ESP32 *Ethernet* sebagai perangkat kontrol dan sensor, dengan variabel utama yang diamati meliputi data sensor aliran (*flow*), *level fluida* dalam tangki, suhu, dan status aktuator atau katup (*valve*), karena berpengaruh langsung terhadap akurasi, efisiensi, dan keamanan proses pengisian minyak ke truk.

Secara *global*, masih banyak fasilitas *truck loading* minyak bumi di negara berkembang yang mengandalkan operasi *manual* atau *semi-otomatis* (International Energy Agency, 2020). Operator biasanya melakukan pencatatan volume dan status pengisian secara *manual*, yang sangat rawan terhadap kesalahan manusia (*human error*) seperti *overflow*, *shortfill*, dan *spill*. Kesalahan tersebut tidak hanya menimbulkan kerugian finansial, tetapi juga membahayakan keselamatan kerja dan mencemari lingkungan. Lembaga seperti OSHA menekankan pentingnya penerapan sistem keamanan otomatis untuk mencegah kecelakaan kerja dan kebocoran bahan bakar (Occupational Safety & Health Administration, 2019). Namun pada kenyataannya, di banyak fasilitas, sistem pengisian belum dilengkapi *interlock otomatis*, *data logging digital*, ataupun perlindungan *overflow*, sehingga pengawasan masih sangat bergantung pada operator lapangan.

Secara ideal, industri migas seharusnya telah menerapkan proses *truck loading* yang cepat, akurat, terdokumentasi, dan dikendalikan oleh sistem otomatis terintegrasi dengan *monitoring digital*. Beberapa depo besar memang telah mengadopsi sistem kendali modern seperti SCADA dan DCS, tetapi sebagian besar fasilitas kecil di daerah terpencil masih mengandalkan sistem konvensional akibat keterbatasan anggaran dan infrastruktur. Bahkan, Pertamina melaporkan kerugian produk sekitar 1--2% selama proses distribusi yang sebagian besar terjadi pada tahap *loading* akibat kurangnya sistem pemantauan yang akurat (PT Pertamina Patra Niaga, 2021). Kondisi ini memperlihatkan kebutuhan mendesak untuk mengembangkan solusi otomasi yang terjangkau, andal, dan berbasis data agar efisiensi serta keselamatan operasional dapat ditingkatkan tanpa biaya besar (Badan Pengatur Hilir Minyak dan Gas Bumi, 2021).

Sejumlah penelitian sebelumnya telah berupaya mengotomatiskan proses *truck loading*, namun sebagian besar berfokus pada penggunaan perangkat industri berskala besar seperti PLC yang biayanya tinggi dan tidak efisien untuk fasilitas berskala kecil (Tkáčik et al., 2024). Di sisi lain, penelitian berbasis mikrokontroler seperti ESP32 umumnya hanya digunakan untuk *data logging* sederhana tanpa dukungan komunikasi *real time* antar *node* (Bouraiou et al., 2024). Selain itu, banyak prototipe otomasi sebelumnya menggunakan komunikasi nirkabel seperti *Wi-Fi* atau *Bluetooth* yang tidak stabil dan kurang aman untuk

lingkungan industri (Paris et al., 2023), padahal sistem di lapangan memerlukan komunikasi yang stabil, aman, serta mendukung *redundancy* data (Zeghida et al., 2024).

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi antara komunikasi kabel *Ethernet* berbasis TCP/IP, protokol MQTT, dan arsitektur DCS modular menggunakan *mikrokontroler* berbiaya rendah. Sistem yang dirancang bukan hanya melakukan *data logging*, tetapi juga memungkinkan komunikasi dua arah antar *node* untuk mengontrol proses secara otomatis dan terdistribusi, serta dilengkapi fitur keselamatan seperti *flow interlock*, *overflow protection*, dan *remote emergency shutdown* yang biasanya hanya tersedia pada sistem industri berskala besar. Sistem ini dirancang di jaringan lokal tertutup tanpa ketergantungan pada internet publik sehingga lebih aman dan reliabel untuk aplikasi industri (Chaczko & Braun, 2017).

Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah penelitian ini meliputi: (1) bagaimana merancang sistem kontrol otomatis pada operasi *loading truck* minyak bumi; (2) bagaimana mengimplementasikan peralatan instrumentasi pada sistem operasi *loading truck*; dan (3) bagaimana tampilan HMI grafis sistem DCS dengan *Node-RED* yang sesuai dengan kondisi aktual. Tujuan penelitian ini adalah merancang sistem kontrol otomatis, mengimplementasikan peralatan instrumentasi, serta membuat kondisi aktual parameter dengan tampilan HMI grafis *Node-RED* yang efisien, aman, dan mudah direplikasi untuk fasilitas berskala kecil maupun media pembelajaran (Uzougbo et al., 2024).

2. KAJIAN TEORI

Sistem otomasi industri merupakan penerapan teknologi untuk mengendalikan proses secara otomatis tanpa campur tangan manusia secara langsung guna meningkatkan efisiensi, akurasi, keamanan, dan kestabilan proses (Hua et al., 2021). *Distributed Control System* (DCS) sebagai *grand theory* penelitian ini merupakan sistem kontrol yang didistribusikan ke beberapa unit pengendali yang saling terhubung melalui jaringan komunikasi, sehingga setiap unit dapat melakukan kontrol lokal sementara sistem pusat berfungsi untuk pengawasan dan koordinasi (Rahman & Tarek, 2025). Arsitektur DCS umumnya terdiri atas *field devices layer* (sensor dan aktuator), *control layer* (*controller*), *supervisory layer* (SCADA/HMI), dan *enterprise layer*, dengan komunikasi antar lapisan menggunakan protokol industri seperti Modbus, *Ethernet/IP*, atau protokol berbasis TCP/IP seperti MQTT (Đorđević & Jovanović, 2021).

Sistem kontrol yang digunakan bertipe *closed-loop* (loop tertutup), yaitu sistem yang menghasilkan sinyal kendali berdasarkan umpan balik (*feedback*) dari keluaran, sehingga selisih antara nilai acuan (*setpoint*) dan keluaran aktual (*error*) digunakan untuk mengoreksi

aksi kontrol secara otomatis. Komponen utamanya meliputi *setpoint*, sensor, umpan balik, komparator, *controller*, dan aktuator/*plant* (Liu et al., 2024). Sensor berperan sebagai indera sistem yang mengubah besaran fisik menjadi sinyal listrik, sedangkan aktuator berperan sebagai penggerak yang mengubah sinyal kontrol menjadi tindakan fisik (Fraden, 2024). Dalam penelitian ini, kontroler berbasis ESP32 digunakan sebagai *node* cerdas yang membaca sensor dan mengendalikan aktuator (Prabowo & Irwanto, 2023), sementara *Node-RED* digunakan sebagai platform HMI berbasis *flow* yang menampilkan data secara *real time* melalui *dashboard* dan visualisasi SVG (Domínguez et al., 2023).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *experimental research* dengan pendekatan rekayasa sistem, yang berfokus pada perancangan dan implementasi prototipe instrumentasi *control automatic* dengan *Distributed Control System* (DCS) berbasis ESP32 *Ethernet* pada proses *truck loading* minyak bumi. Subjek penelitian adalah sistem operasi *loading truck* minyak bumi berskala laboratorium beserta seluruh peralatan instrumentasinya, yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Elektro, Universitas Pamulang pada Oktober--Desember 2025. Instrumen yang digunakan secara spesifik meliputi sensor *level* ultrasonik HC-SR04 (rentang 2--400 cm), sensor *temperature* DS18B20 (rentang -55/+125 C), dan sensor *flow* YF-S201C (1--30 L/min), dengan aktuator berupa pompa *mini* 5 VDC dan *solenoid valve shut off* 12 VDC yang dikendalikan melalui *relay*, sedangkan kontrolernya adalah *mikrokontroler* ESP32 (Prabowo & Irwanto, 2023).

Prosedur penelitian dilakukan secara kronologis, dimulai dari studi literatur dan analisis kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, instalasi sensor serta aktuator, *wiring* instrumentasi, pemrograman kontroler, pengecekan pembacaan parameter, kalibrasi sensor terhadap nilai standar, pengujian kontrol otomatis beserta proteksinya, sinkronisasi kontrol dengan DCS, hingga uji simulasi sistem DCS. ESP32 berperan sebagai *publisher* yang mengirim data sensor melalui *Ethernet* ke *broker* MQTT Mosquitto, sedangkan *Node-RED* bertindak sebagai *subscriber* yang menampilkan data pada *dashboard* SVG sekaligus mengirim perintah balik ke ESP32, dilengkapi mekanisme *fail-safe* apabila koneksi terputus (Paris et al., 2023). Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif melalui perbandingan nilai pembacaan sensor sebelum dan sesudah kalibrasi terhadap nilai standar (penggaris, termometer, dan gelas ukur) untuk menentukan nilai *error*, serta perbandingan kesesuaian parameter antara tampilan *LCD* lokal dan HMI DCS guna menarik kesimpulan mengenai akurasi, kehandalan, dan fungsi proteksi sistem (Zeghida et al., 2024).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Permasalahan

Perancangan sistem ini mengacu pada kondisi operasi *aktual* pada *loading truck* minyak bumi berskala kecil yang masih menggunakan operasi *manual*, di mana banyak faktor menyebabkan kegagalan operasi. Permasalahan utama yang sering terjadi beserta akibat dan penanggulangannya dirangkum pada Tabel 1, mencakup *human error*, *overflowing*, paparan sumber panas, selisih pencatatan hasil pengukuran, serta tingkat *safety* yang rendah. Dari permasalahan tersebut dirancang sistem operasi *auto loading truck* yang saling berkaitan untuk menghindari risiko kegagalan pada sistem.

Tabel 1. Masalah Operasi *Loading Truck* Minyak Bumi.

Permasalahan	Akibat	Penanggulangan
<i>Human error</i>	Hasil operasi tidak sesuai keinginan	Pemasangan sistem kontrol otomatis <i>loop</i> tertutup yang saling berkaitan
<i>Overflowing</i>	Terjadi tumpahan minyak karena <i>level</i> tangki tidak terpantau	Pemasangan sensor <i>level</i> dan <i>flowmeter</i>
Paparan sumber panas	Menimbulkan risiko kebakaran atau ledakan	Pemasangan sensor <i>temperature</i>
Selisih pencatatan hasil pengukuran	Selisih pembacaan operator dalam menentukan kondisi aktual	Pemasangan sensor yang akurat dan <i>display</i> yang mudah dipahami
Tingkat <i>safety</i> rendah	Operasi <i>manual</i> memiliki tingkat kecelakaan kerja tinggi	Pemasangan sistem kontrol terpusat yang jauh dari area operasi

Pemilihan Komponen

Pemilihan komponen instrumentasi merupakan langkah kunci dalam memastikan keberhasilan sistem operasi otomatis *loading truck* minyak bumi, dengan mempertimbangkan kecocokan fitur, *range* kerja sensor, tingkat akurasi, dan kemudahan integrasi antar peralatan. Pemilihan komponen yang tepat menentukan performa, kehandalan, serta akurasi pembacaan parameter *critical* yang dipantau operator, sehingga sistem mampu berjalan *auto* dengan proteksi yang handal dan dapat mengisolasi peralatan saat terjadi gangguan. Komponen peralatan instrumentasi yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komponen Operasi.

No	Nama Komponen	Type	Fungsi
1	Sensor <i>Level</i>	HC-SR04 <i>Ultrasonic</i>	Membaca <i>level</i> ketinggian air dalam tangki
2	Sensor <i>Temperature</i>	DS18B20	Membaca <i>temperature sample</i> dalam <i>line</i>
3	Sensor <i>Flowmeter</i>	YF-S201C <i>Water flow</i>	Membaca <i>sample</i> yang keluar
4	Pompa Air Mini	Pompa mini 5 V	Mengalirkan <i>sample</i> ke <i>output</i>
5	<i>Manual Valve</i>	<i>Ball valve</i>	Mengamankan <i>sample</i> saat perbaikan
6	<i>Solenoid Valve</i>	<i>Solenoid shut off</i> 12 V	Mengatur <i>sample</i> yang keluar
7	<i>Mikrokontroler</i>	ESP32	Mengontrol <i>sinyal input output</i> dan <i>proses data</i>
8	<i>Relay</i>	SRD05V	Mengalirkan <i>supply</i> daya ke peralatan

9	Keypad	Keypad 4x4 matrix	Menginputkan nilai oleh operator
10	Display Lokal	LCD 4x20 I2C	Menampilkan data di panel lokal
11	Lampu Indikasi	LED 3 warna	Indikasi lampu <i>run</i> , <i>stop</i> , <i>alarm</i>
12	Aplikasi Display DCS	Node-RED	Menampilkan data parameter pada komputer

Langkah Implementasi

Langkah implementasi diawali dengan perencanaan proses sistem operasi sesuai *flowchart* yang diinginkan, dilanjutkan pemilihan komponen instrumentasi sebagaimana Tabel 2, kemudian pengetesan setiap peralatan instrumentasi secara individual untuk memastikan kondisinya *normal*. Setelah itu dilakukan pemasangan alat instrumentasi pada *plant* sesuai kondisi aktual *loading truck* minyak bumi, pemasangan *wiring* kabel sesuai perencanaan blok diagram, serta *upload program* kontrol pada ESP32 yang sebelumnya disimulasikan untuk koreksi.

Tahap berikutnya adalah pembuatan kontrol DCS menggunakan *Node-RED* dengan tata letak *display* HMI yang disesuaikan dengan rangkaian aktual, kemudian diakhiri dengan proses uji operasi dan pencatatan hasil. Rangkaian *plant* yang dibangun disesuaikan dengan kondisi aktual operasi *loading truck* minyak bumi seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian *Plant*.

Pengujian Peralatan dan Kalibrasi

Pengujian dilakukan untuk memastikan seluruh instrumen berfungsi sesuai spesifikasi, dengan mengidentifikasi tingkat akurasi, kestabilan, serta respons sensor sebelum dan sesudah kalibrasi. Hasil pengujian sensor *level* HC-SR04 disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Tes Sensor *Level* (cm).

Waktu	<i>Level before</i> kalibrasi	<i>Level after</i> kalibrasi	Nilai standar penggaris	Nilai <i>error</i>
14.11	2	2	1	+1
14.13	3	3	2	+1
14.15	6	4	4	0
14.18	8	6	6	0
14.22	9	8	8	0
14.31	12	10	10	0
14.37	13	12	12	0

Berdasarkan Tabel 3, sensor *level* HC-SR04 memiliki kekurangan pada pembacaan di bawah 2 cm karena tidak mampu membaca secara akurat, sehingga kalibrasi dilakukan dengan membatasi *range* media yang digunakan. Setelah kalibrasi, nilai pembacaan *level* menjadi sama dengan nilai standar penggaris pada rentang 4 cm ke atas dengan nilai *error* 0, menunjukkan sensor akurat pada rentang kerja yang dibatasi sebagai pengaman.

Tabel 4. Tes Sensor *Temperature* (C).

Waktu	Sensor <i>temp before</i> kalibrasi	Sensor <i>temp after</i> kalibrasi	Nilai standar termometer	Nilai <i>error</i>
15.15	32.86	30.87	31.3	-0.43
15.21	47.43	46.32	45.57	+0.75
15.33	58.45	57.85	57.25	+0.6
15.42	63.43	62.87	62.33	+0.54
15.51	69.31	68.24	67.87	+0.87
16.05	73.86	73.16	72.65	+0.51
16.12	86.87	86.25	85.64	+0.61

Berdasarkan Tabel 4, sensor *temperature* DS18B20 menghasilkan pengukuran yang cukup akurat dan sangat cocok digunakan pada media cair karena bersifat *waterproof*. Setelah kalibrasi, nilai pembacaan jika dibandingkan dengan nilai standar termometer sangat mendekati dengan selisih *error* di kisaran ± 1 C, sehingga sensor ini layak digunakan untuk memantau suhu minyak bumi guna mencegah paparan panas berlebih pada sistem operasi.

Tabel 5. Tes Sensor *Flowmeter* (mL).

Waktu	Sensor <i>flow before</i> kalibrasi	Sensor <i>flow after</i> kalibrasi	Gelas ukur	Nilai <i>error</i>
17.55	150	102	100	+2
18.01	220	130	150	-20
18.11	260	230	200	+30
18.22	340	300	250	+50
18.34	370	340	300	+40
18.46	400	360	350	+10
18.51	450	430	400	+30
19.05	520	470	450	+20

Berdasarkan Tabel 5, sensor *flowmeter* YF-S201C menunjukkan hasil yang kurang linier meskipun sudah dikalibrasi, karena media pemasangan *line* yang digunakan kurang bebas. Selain itu, sesuai *data sheet* sensor, untuk aliran kecil di bawah 1 L/menit pembacaan menjadi kurang akurat karena kincir tidak berputar secara konsisten, sehingga nilai *error* pada volume kecil masih relatif besar dan sensor lebih sesuai digunakan pada aliran yang lebih tinggi.

Uji Tes Operasi

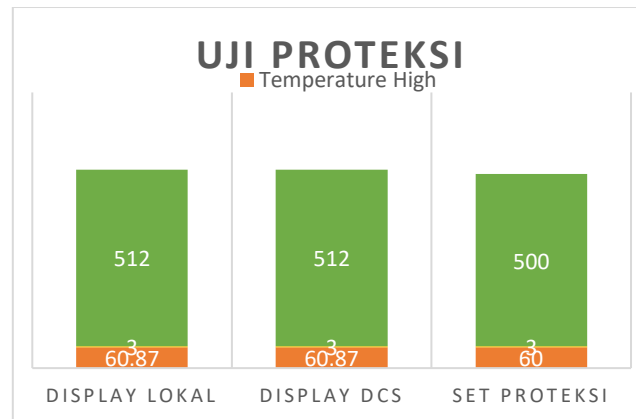
Pengambilan data operasi bertujuan memperoleh hasil yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan serta memastikan seluruh alat bekerja sesuai standar operasional prosedur. Data yang akurat mempermudah operator dalam mengoperasikan peralatan sekaligus menjaga kehandalan proteksi. Perbandingan tampilan *LCD* lokal dan HMI DCS dilakukan untuk mengurangi risiko kesalahan operasi *loading truck* minyak bumi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Uji tes *running* dilakukan dengan menginputkan nilai volume yang diisi pada layar *LCD* lokal dan dipantau pada sistem HMI DCS, sedangkan uji tes *loading* membandingkan hasil volume yang dikeluarkan dengan pengukuran gelas ukur, dan hasilnya menunjukkan nilai yang hampir sama.



Gambar 2. Tampilan Lokal dan DCS.

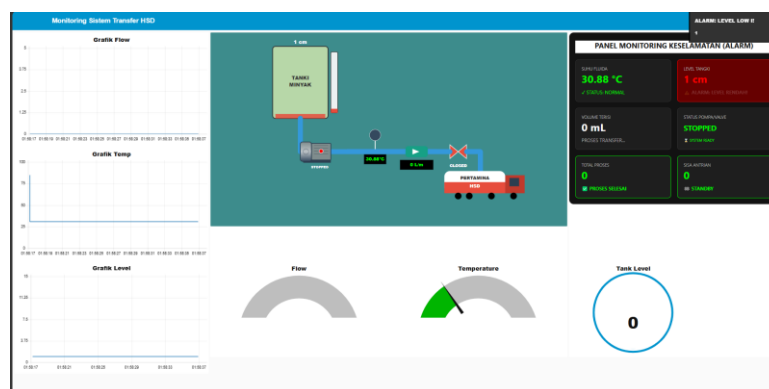
Pengambilan Data Proteksi

Uji proteksi digunakan untuk mengetahui jika terdapat abnormal pada sistem operasi dan mengamankan peralatan serta operator agar tidak terjadi hal yang tidak diinginkan. Berikut uji data proteksi :



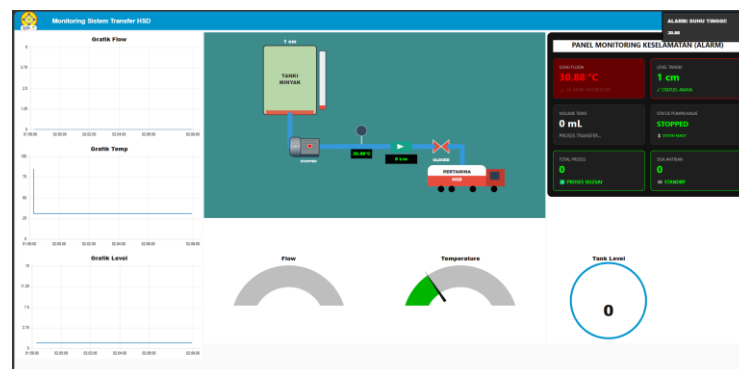
Gambar 3. Grafik Uji Proteksi.

Dari data uji proteksi tersebut menunjukan bahwa nilai *set point proteksi* sama dengan kontrol lokal dan DCS. Seperti *set point proteksi temperature high* 60°C jika nilai melebihi maka akan muncul *alarm overheat* pada sistem. Begitu juga nilai *level low set point* 3cm dan *flow over set point* 500ml Berikut ini tampilan proteksi pada sistem DCS :



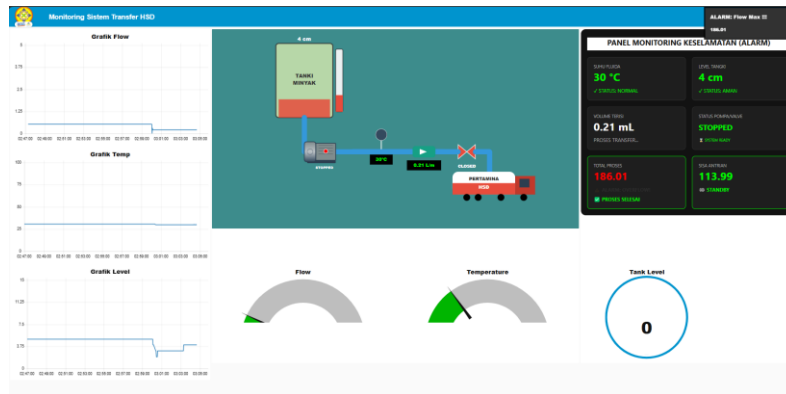
Gambar 4. Alarm Level Low.

Jika nilai *level* kurang dari *set point* yang ditentukan maka alarm akan muncul dengan inikasi *pop-up alarm level low* dan *display* pengukuran *level* akan terbaca merah sesuai pada Gambar 4.



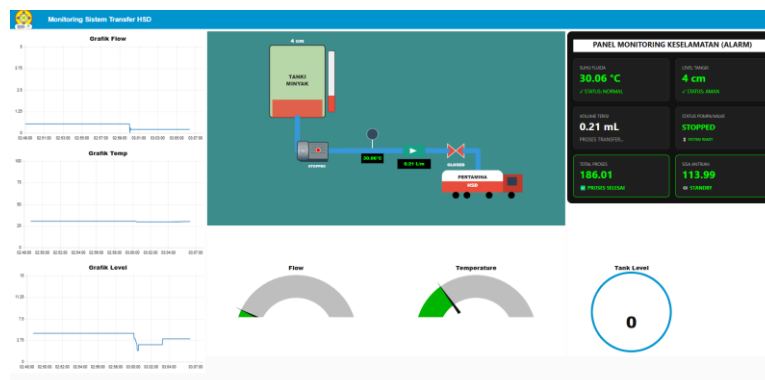
Gambar 5. Alarm Overheat.

Pada Gambar 5 menunjukkan jika terjadi nilai pengukuran *temperature* melebihi *set point* yang ditentukan maka akan terbaca *alarm* oleh *display HMI DCS* dengan *pop-up alarm* *overheat* dan nilai pembacaan pada *temperature* akan mengindikasikan merah. *Pop-up* dan *alarm* tersebut tidak akan hilang sampai nilai pembacaan *temperature* Kembali *normal* dibawah nilai *set point* yang ditentukan untuk memproteksi sistem peralatan dan operator agar tidak terjadi sesuatu yang tidak diinginkan. Selama *alarm overheat* dan *level low* muncul sistem tidak dapat dioperasikan karena berbahaya bagi peralatan dan operator.



Gambar 6. Alarm Overflow.

Pada Gambar 6 menunjukkan alarm *overflow* pada sistem dikarenakan total volume yang dikeluarkan melebihi *set point* yang ditentukan sehingga peralatan akan memproteksi secara *otomatis*. Indikasi sama seperti *alarm* sebelumnya yaitu muncul *pop-up alarm overflow* dan indikasi merah peralatan akan *otomatis* berhenti operasi. Namun jika kondisi *overflow* bisa dilakukan reset dengan menekan tombol merah pada panel local untuk menghilangkannya.



Gambar 7. Kondisi Normal.

Pada Gambar 7 yaitu tampilan kondisi *normal* atau *standby* operasi. Tidak terdapat *alarm* sehingga sistem siap dioperasikan oleh operator. Indikasi layar *HMI DCS* keseluruhan akan terbaca hijau dan tidak terdapat *pop-up alarm* apapun.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontrol otomatis berbasis ESP32 pada sistem *loading truck* mampu berjalan sesuai rancangan kondisi aktual operasi, disertai proteksi sebagai pengaman saat kondisi parameter *abnormal*. Kemampuan sistem melakukan komunikasi dua arah antara kontrol lokal dan HMI DCS secara *real time* membuktikan bahwa arsitektur DCS terdistribusi dapat direalisasikan menggunakan *mikrokontroler* berbiaya rendah, sejalan dengan konsep kendali terdistribusi yang memungkinkan pengawasan terpusat dalam satu jaringan (Hua et al., 2021; Rahman & Tarek, 2025). Penggunaan protokol MQTT pada jaringan lokal tertutup terbukti mendukung pengiriman data yang stabil dibandingkan komunikasi nirkabel yang rawan gangguan (Paris et al., 2023).

Dari sisi implementasi instrumentasi, pengujian individual menunjukkan karakteristik yang berbeda pada setiap sensor. Sensor *level* HC-SR04 akurat namun dibatasi pembacaannya di bawah nilai 3 cm sebagai pengaman, sensor *temperature* DS18B20 memberikan pembacaan akurat dengan selisih ± 1 C sehingga sesuai untuk media cair, sedangkan sensor *flow* YF-S201C kurang cocok pada pengukuran aliran rendah di bawah 1 L/menit karena pembacaannya menjadi kurang akurat. Temuan ini menegaskan pentingnya kalibrasi dan pemilihan *range* kerja sensor agar akurasi pembacaan parameter tetap terjaga selama operasi berlangsung (Prabowo & Irwanto, 2023; Fraden, 2024).

Kontrol HMI DCS berbasis *Node-RED* mampu membaca kondisi parameter aktual secara *real time* disertai indikasi *proteksi* serta grafik *history* parameter, sehingga mempermudah operator dalam pencatatan data dan analisis perbaikan peralatan. Kesesuaian nilai antara tampilan *LCD* lokal dan HMI DCS menunjukkan tidak adanya penyimpangan data yang berarti antara kontrol lokal dan terpusat, sehingga risiko *miss* komunikasi antar operator dapat ditekan. Hal ini memperkuat temuan bahwa integrasi *Node-RED* dengan visualisasi SVG efektif digunakan sebagai antarmuka pemantauan proses industri yang interaktif dan mudah direplikasi (Domínguez et al., 2023; Uzougbo et al., 2024).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa sistem operasi *loading truck* minyak bumi berbasis ESP32 dengan *Distributed Control System* (DCS) berhasil dirancang dan berjalan sesuai kondisi aktual operasi, di mana kontrol otomatis *loop* tertutup disertai proteksi *overheat*, *level low*, dan *overflow* mampu mengamankan peralatan saat kondisi *abnormal*; implementasi instrumentasi menunjukkan sensor *level* HC-SR04 akurat dengan

pembatasan pembacaan di bawah 3 cm, sensor *temperature* DS18B20 akurat dengan selisih ± 1 C, sedangkan sensor *flow* YF-S201C kurang akurat pada aliran di bawah 1 L/menit; serta HMI DCS berbasis *Node-RED* mampu menampilkan kondisi parameter aktual secara *real time* disertai indikasi proteksi dan grafik *history* parameter, sehingga mempermudah operator dalam pemantauan, pencatatan data yang akurat, dan analisis perbaikan peralatan.

Saran

Penelitian ini dapat diimplementasikan pada berbagai jenis kontrol peralatan instrumentasi dengan mempertimbangkan perancangan yang dibutuhkan sistem operasi, sehingga dapat dikembangkan untuk meningkatkan kehandalan dan *safety* proteksi. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan pengujian dengan *flow* yang lebih besar sesuai *data sheet* agar data *flow* lebih stabil dan akurat.

DAFTAR REFERENSI

- American Petroleum Institute. (2021). *API Standard 2350: Overfill protection for storage tanks in petroleum facilities*. American Petroleum Institute.
- Badan Pengatur Hilir Minyak dan Gas Bumi. (2021). *Laporan Tahunan 2021*. BPH Migas.
- Bouraiou, A., Slimani, A., Neçaibia, A., Lachtar, S., Labed, N., Dahbi, A., Rouabhia, A., & Rahli, C. (2024). A simple platform to establish supervision, monitoring, and control using ESP32/Ethernet Shield and SCADA via industrial Modbus TCP/IP communication protocol. *Algerian Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, 6(1), 11--22.
- Chaczko, Z., & Braun, R. (2017). *Learning data engineering: Creating IoT apps using the Node-RED and the RPI technologies*. IEEE.
- Domínguez, M., González-Herbón, R., Rodríguez-Ossorio, J. R., Fuertes, J. J., Prada, M. A., & Morán, A. (2023). Development of a remote industrial laboratory for automatic control based on Node-RED. *Applied Sciences*, 13(4), 2453.
- Đorđević, A., & Jovanović, Z. (2021). Current trends and challenges in distributed control systems -- An overview. *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics*, 20(2), 123--140.
- Fraden, J. (2024). *Handbook of modern sensors: Physics, designs, and applications* (5th ed.). Springer.
- Hua, H., Wei, Z., Qin, Y., Wang, T., Li, L., & Cao, J. (2021). Review of distributed control and optimization in energy internet: From traditional methods to artificial intelligence-based methods. *IET Cyber-Physical Systems: Theory and Applications*, 6(2), 63--79.
- International Energy Agency. (2020). *Digitalization and energy efficiency in oil and gas operations*. IEA.
- Liu, M., Zhang, Y., Chen, H., & Li, X. (2024). Adaptive and robust control strategies for complex industrial systems: A review on closed-loop implementation. *ISA Transactions*, 147, 1--18.

- Occupational Safety & Health Administration*. (2019). *Process safety management for petroleum refining and handling*. U.S. Department of Labor.
- Paris, I. L. B. M., Habaebi, M. H., & Zyoud, A. M. (2023). Implementation of SSL/TLS security with MQTT protocol in IoT environment. *Wireless Personal Communications*, 132(1), 163--182.
- Prabowo, N. K., & Irwanto, I. (2023). The implementation of ESP32 microcontroller boards in science: A bibliometric analysis from 2008 to 2022. *Journal of Engineering Education Transformations*, 37(2), 106--123.
- PT Pertamina Patra Niaga. (2021). *Laporan Tahunan 2021 -- Subholding Commercial & Trading*. PT Pertamina Patra Niaga.
- Rahman, W., & Tarek, J. H. (2025). Modbus/DNP3 over TCP/IP implementation on TMDSCNCD28388D and ESP32 with Simulink HMI for IoT-based cybersecure electrical systems. *International Journal of Business and Economics Insights*, 5(3), 494--522.
- Tkáčik, M., Jadlovský, J., Jadlovská, S., Jadlovská, A., & Tkáčik, T. (2024). Modeling and analysis of distributed control systems: A methodology. *Processes*, 12(1), 5.
- Uzougbo, O. I., Olanrewaju, O. A., & Kayode, A. K. (2024). Node-RED and IoT analytics: A real-time data processing and visualization platform. *Tech-Sphere Multidisciplinary International Journal*, 1, 36--48.
- Zeghida, H., Boulaiche, M., & Chikh, R. (2024). *Security of MQTT protocol: A brief overview*. Springer.