

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan artikel 10.22146/jnteti.v14i4.21506

Implementasi Sistem Kendali PLC dengan Pengembangan SCADA Industri Berbasis IoT

Hendro Priyatman¹, Seno D. Panjaitan¹, Supriono¹, Muh. Revaldi Frizky¹

¹ Program Studi Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Kalimantan Barat 78124, Indonesia

[Diserahkan: 3 Juli 2025, Direvisi: 19 September 2025, Diterima: 11 November 2025]

Penulis Korespondensi: Hendro Priyatman (email: hendro.priyatman@ee.untan.ac.id)

INTISARI — Tantangan dalam sistem kendali, seperti akses jarak jauh dan eksekusi perintah jarak jauh, dapat diatasi menggunakan sistem *supervisory control and data acquisition* (SCADA). SCADA memungkinkan pemantauan dan pengendalian proses industri secara waktu nyata, sehingga mendukung pengambilan keputusan dari jarak jauh, meningkatkan efisiensi operasional, serta mempercepat respons terhadap permasalahan. SCADA juga meningkatkan transparansi data, sehingga memungkinkan insinyur untuk mendeteksi dan menganalisis kegagalan secara lebih efektif. Namun, implementasi SCADA umumnya memerlukan biaya tinggi serta membutuhkan tenaga ahli untuk pemeliharaannya. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem SCADA yang terjangkau dan dirancang khusus untuk industri kecil dan menengah. Sistem yang dikembangkan menggunakan *programmable logic controller* (PLC) sebagai pengendali dan *human machine interface* (HMI) pada *remote terminal unit* (RTU). Data dari RTU dikirimkan ke *master terminal unit* (MTU) yang dikembangkan secara mandiri, serta memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh melalui teknologi *industrial internet of things* (IIoT) menggunakan protokol *message queueing telemetry transport* (MQTT). Sistem ini memantau dua variabel, yaitu temperatur (RTU 1) dan kecepatan putar (RTU 2), dengan tujuan untuk mengukur waktu komunikasi dan akurasi data. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi sensor sebesar 98,6% untuk RTU 1 dan 100% untuk RTU 2, dengan akurasi komunikasi antarlapisan mencapai 100%. Rata-rata durasi komunikasi waktu nyata adalah 0,324 detik, yang menunjukkan efisiensi tinggi dengan latensi rendah. Hasil ini mengindikasikan bahwa sistem SCADA berbasis IoT bersifat andal, ekonomis, serta sesuai untuk aplikasi industri skala kecil hingga menengah. Sistem ini juga mudah direplikasi dan dikonfigurasi ulang, sehingga menjadi solusi praktis untuk pengadopsian yang lebih luas di sektor industri.

KATA KUNCI — SCADA, *Programmable Logic Controller*, *Industrial Internet of Things*, *Remote Terminal Unit*, *Human Machine Interface*, *Message Queueing Telemetry Transport*.

I. PENDAHULUAN

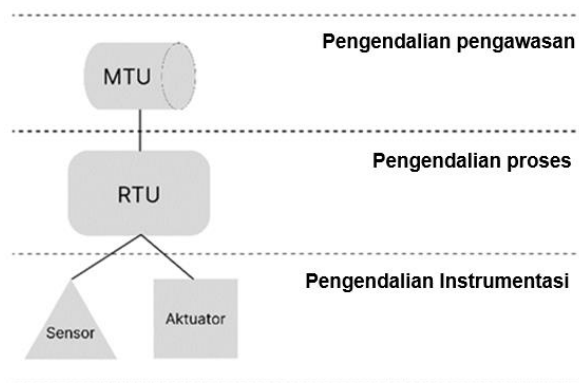
Perkembangan teknologi dalam kehidupan sehari-hari telah memberikan dampak signifikan terhadap berbagai sektor, termasuk proses produksi dalam industri manufaktur. Kemajuan teknologi yang pesat di sektor industri bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas proses produksi [1], yang sering disebut sebagai Revolusi Industri. Saat ini, Revolusi Industri 4.0, yang umum dikenal sebagai Industry 4.0, sedang berlangsung, ditandai dengan penerapan integrasi kecerdasan buatan, teknologi penyimpanan *cloud*, serta *industrial internet of things* (IIoT) [1], [2].

Industry 4.0 melalui IIoT dan penyimpanan *cloud* untuk basis data merupakan konvergensi antara kemajuan teknologi informasi dan komunikasi dengan sektor produksi di kawasan industri [3]. Pemanfaatan jaringan informasi dan komunikasi berbasis IIoT antar sistem menjadikan sistem kendali otomatis makin canggih, karena mengintegrasikan berbagai pengendali, sensor, dan aktuator dalam satu sistem yang saling berinteraksi serta dapat dikendalikan dari terminal pusat, seperti pada sistem *supervisory control and data acquisition* (SCADA) [4]. Namun demikian, Industry 4.0 juga menjadi tantangan bagi industri di Indonesia, khususnya bagi industri kecil dan menengah. *Internet of things* (IoT) didefinisikan sebagai sekumpulan infrastruktur yang saling menghubungkan objek-objek terintegrasi serta memungkinkan pengelolaan, penambangan data, dan akses terhadap data yang dihasilkan, dengan objek yang terhubung tersebut berupa sensor dan/atau aktuator yang menjalankan fungsi tertentu serta mampu

berkomunikasi dengan peralatan lain [5], khususnya dalam konteks industri kecil dan menengah. Makin kecil skala perusahaan, makin tinggi risiko yang dihadapi untuk menjadi pihak yang dirugikan, dibandingkan memperoleh manfaat dari revolusi industri ini [6], [7]. Hal ini disebabkan oleh rendahnya kesiapan perusahaan kecil dan menengah maupun *start-up* dalam menghadapi Industry 4.0, salah satunya terkait keterbatasan kapasitas pendanaan dalam pengadaan sistem SCADA, meskipun teknologi ini merupakan aspek yang signifikan dalam menghadapi Industry 4.0. Selain itu, kecerdasan perangkat dasar (*underlying equipment*) perlu ditingkatkan guna memenuhi kebutuhan IoT. Pada lapisan jaringan, IIoT harus mendukung protokol dan format data baru dengan tingkat fleksibilitas dan skalabilitas yang tinggi, sementara *industrial wireless sensor networks* (IWSNs) membuka peluang baru dalam pengembangan jaringan industri [8].

Oleh karena itu, diperlukan penelitian untuk mengembangkan sistem SCADA yang bersifat *customized* dan *open-source* dengan biaya yang terjangkau bagi industri kecil dan menengah. Dengan mempertimbangkan tujuan penggunaan SCADA pada tingkat industri, penelitian ini menggunakan lebih dari satu subsistem yang terdiri atas *programmable logic controller* (PLC) sebagai pengendali, *human machine interface* (HMI) sebagai antarmuka, serta sebagai sarana pertukaran data dengan server.

Gambar 1 menunjukkan arsitektur utama sistem SCADA. Sensor berfungsi sebagai sumber akuisisi data, sedangkan



Gambar 1. Arsitektur utama sistem SCADA.

TABEL I
PERBANDINGAN ANTARA IIoT DAN IIoT

Implementasi	IoT	IIoT
Aplikasi	Mendukung optimasi konsumsi energi	Memaksimalkan efisiensi dan alur kerja yang mulus
Orientasi	Berpusat pada manusia	Berpusat pada mesin
Keandalan	Fleksibel bergantung pada latensi	Dirancang untuk memenuhi kebutuhan latensi rendah
Kasus penggunaan	Otomasi skala kecil	Otomasi dan pemantauan skala besar
Konektivitas	<i>Ad-Hoc</i> (tanpa infrastruktur tetap, <i>node</i> dapat berubah)	Terstruktur (<i>node</i> tetap, manajemen jaringan terpusat)
Tingkat kekritisan	Tidak ketat	Ketat (waktu, keandalan, privasi)
Ukuran sistem	Kecil hingga menengah	Besar hingga sangat besar

aktuator dapat dikendalikan oleh pengguna. Dalam penelitian ini, dikembangkan aplikasi berbasis *desktop* yang dapat dijalankan pada komputer sebagai terminal pusat untuk pengumpulan data sekaligus sebagai pusat kendali sistem SCADA.

Teknologi IIoT merupakan suatu ekosistem yang terdiri atas perangkat, sensor, aplikasi, dan perangkat jaringan yang terkait dengan proses pengumpulan, pemantauan, dan analisis data dari operasi industri. Tabel I menyajikan perbandingan antara IoT dan IIoT. Secara teknis, teknologi IoT dan IIoT memiliki keterkaitan yang erat. Namun demikian, IIoT secara khusus dirancang untuk keperluan otomasi industri.

Penelitian sebelumnya bertujuan untuk mengembangkan perangkat IoT sebagai pengganti *remote terminal unit* (RTU) serta mengintegrasikannya dengan Amazon Web Services sebagai pengganti *master terminal unit* (MTU) [9]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan dinyatakan aman, ringan, berbiaya rendah, mudah diperoleh, serta mudah untuk dikonfigurasi ulang. Studi lain memperkenalkan konsep penggunaan model multi-PLC dan multi-HMI, dengan dua PLC digunakan sebagai RTU dan dua komputer digunakan sebagai HMI yang berfungsi sebagai MTU [10]. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu mencapai sinkronisasi yang baik antara komputer pemantau dan PLC, sehingga komputer dapat melakukan pemantauan terhadap *plant*. Penelitian selanjutnya

bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem SCADA *open-source* berbiaya rendah dengan memanfaatkan platform IoT lokal Thingier.IO sebagai MTU dan mikrokontroler ESP32 sebagai RTU [11]. Server Thingier.IO lokal tersebut mampu menyimpan data, melakukan pemantauan, serta menjalankan kendali jarak jauh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsep basis data memungkinkan penyimpanan data pada server Thingier.IO. Penelitian berikutnya berfokus pada perancangan *gateway* IoT yang memungkinkan perangkat identik berbasis komunikasi Modbus RTU untuk terintegrasi dengan jaringan IoT [12]. Penelitian ini mengintegrasikan protokol *message queueing telemetry transport* (MQTT) ke dalam sistem SCADA. Studi lanjutan menghasilkan simulator panel kendali berbasis SCADA yang menggunakan ESP32 sebagai pengendali dan layanan internet Blynk sebagai perantara untuk menghubungkan pengguna dengan simulator [13]. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data berhasil dikirimkan sebesar 100%, dengan syarat kondisi jaringan internet berada dalam keadaan baik.

Penelitian-penelitian sebelumnya umumnya memanfaatkan komponen perangkat keras yang belum memenuhi standar industri atau tidak menggunakan protokol MQTT untuk komunikasi. Dalam penelitian ini, digunakan PLC dan HMI standar industri, sehingga perangkat yang dikembangkan memiliki kapabilitas yang memadai untuk aplikasi industri.

II. PERANCANGAN SISTEM

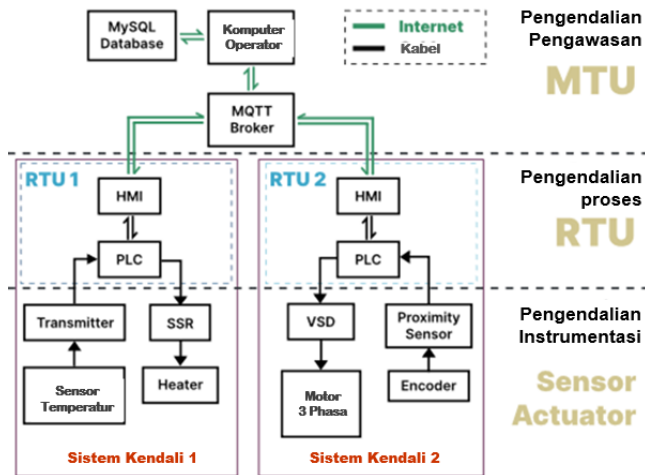
Perancangan sistem dalam penelitian ini memanfaatkan masukan dan keluaran digital dengan sensor kecepatan dan pemanas, masukan analog dengan sensor temperatur, serta komunikasi Modbus. Setiap RTU terhubung ke internet dan berkomunikasi dengan *broker* MQTT. Gambar 2 menunjukkan diagram blok keseluruhan dari perancangan sistem yang terhubung melalui internet dan kabel, yang terdiri atas lapisan kendali supervisi (*supervisory control layer*), lapisan kendali proses (*process control layer*), serta lapisan instrumentasi lapangan (*field instrumentation control layer*) pada sistem SCADA yang dirancang [14].

Perancangan jaringan komunikasi nirkabel dalam pengembangan penelitian SCADA berbasis IIoT menggunakan dua jenis protokol, yaitu protokol MQTT antara MTU dan RTU, serta *wireless local area network* (WLAN) pada MTU untuk aplikasi SCADA yang melakukan pertukaran data dengan basis data. Selain itu, antara komponen-komponen kendali dalam sistem terdapat komunikasi berbasis kabel menggunakan protokol Modbus tipe RS-485, untuk komunikasi antara PLC dengan *variable speed drive* (VSD) dalam pengendalian motor, serta tipe RS-232, untuk pertukaran data antara PLC dan HMI.

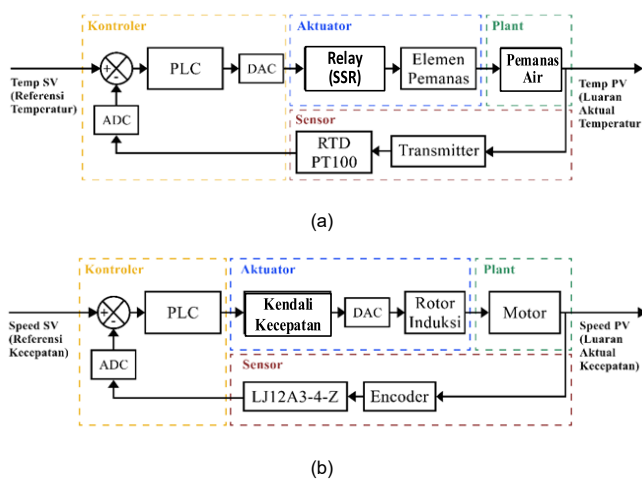
A. PERANCANGAN SISTEM KENDALI

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, RTU 1 dan RTU 2 berperan sebagai pusat kendali dari masing-masing sistem kendali karena terhubung langsung dengan instrumen lapangan. Sistem kendali pada kedua RTU dikelola oleh PLC masing-masing, yang menangani proses kendali yang berbeda. HMI pada setiap RTU digunakan sebagai antarmuka. HMI tersebut mendukung koneksi internet, sehingga dapat digunakan untuk berkomunikasi dengan *broker* MQTT.

Gambar 3 menunjukkan diagram blok sistem kendali pada masing-masing RTU. Variabel keluaran temperatur (*temperature process variable*, *temp PV*) dan nilai referensi temperatur yang diinginkan (*temperature set value*, *temp SV*)



Gambar 2. Diagram blok sistem.



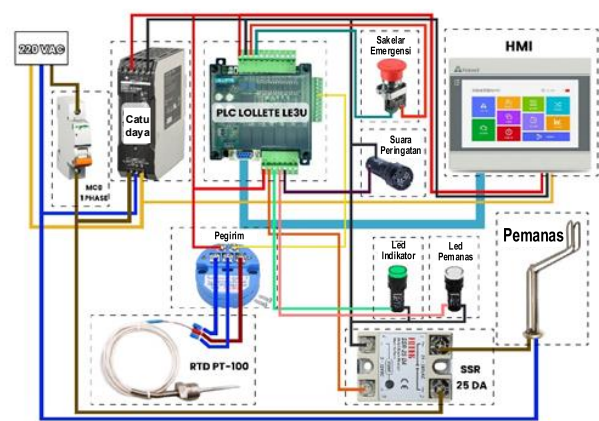
Gambar 3 Diagram blok sistem kendali, (a) RTU 1, (b) RTU 2.

pada RTU 1 diukur dalam derajat Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Selanjutnya, keluaran kecepatan putar (*speed process variable*, *speed PV*) dan nilai referensi kecepatan yang diinginkan (*speed set value*, *speed SV*) pada RTU 2 diukur dalam satuan *revolutions per minute* (rpm). Nilai-nilai tersebut digunakan untuk proses pengolahan dan perolehan data tambahan yang diperlukan dalam penelitian. Data tambahan tersebut diamati untuk mengevaluasi akurasi serta kinerja waktu nyata guna menentukan persentase akurasi data dan keterlambatan pengirimannya.

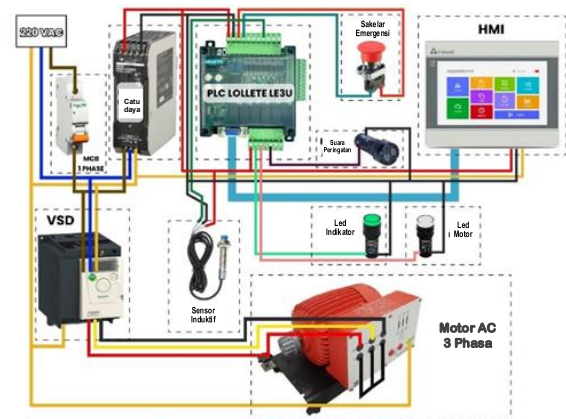
B. PERANCANGAN PERANGKAT KERAS

Perancangan perangkat keras bertujuan untuk mempermudah proses pengabelan serta penataan komponen yang digunakan. Gambaran umum skema rangkaian pengabelan sistem SCADA berbasis teknologi IIoT ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5 untuk masing-masing RTU.

Perancangan diawali dengan mengonversi tegangan catu daya 220 VAC menjadi 24 VDC, yang digunakan sebagai sumber masukan bagi PLC, HMI, dan komponen kendali lainnya yang memerlukan tegangan 24 VDC. HMI berkomunikasi dengan PLC menggunakan kabel data RS-232. Setiap RTU terhubung dengan sensor dan aktuator masing-masing. RTU 1 (Gambar 1) dan RTU 2 (Gambar 2) juga dilengkapi dengan tombol darurat untuk mematikan sistem apabila diperlukan, dilengkapi dengan *buzzer* yang aktif saat kondisi alarm, serta indikator LED yang menunjukkan status



Gambar 4. Perancangan perangkat keras RTU 1.



Gambar 5. Perancangan perangkat keras RTU 2.

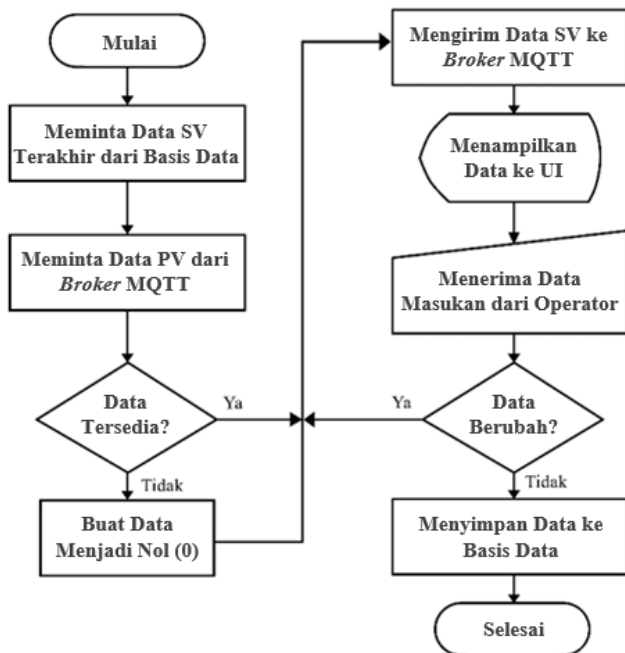
sistem aktif dan indikator LED yang menunjukkan kondisi aktuator dalam keadaan menyala.

C. PERANCANGAN ALGORITMA SISTEM

Perancangan algoritma sistem pada penelitian ini dilakukan secara terpisah untuk MTU, RTU 1, dan RTU 2. Pada MTU, aplikasi desktop dikembangkan menggunakan Visual Studio 2022 dan RevaldiOieK Scada Solution (ROSS), yang terdiri atas enam halaman dengan fungsi masing-masing, seperti halaman basis data dan halaman kendali. Perangkat lunak ROSS diinstal pada komputer server, dengan fungsi utama meliputi permintaan dan pengiriman data ke setiap RTU melalui topik unik pada *broker* MQTT, penyimpanan dan pengambilan data dari basis data (sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6), serta penyajian data dalam antarmuka pengguna yang mudah dipahami oleh operator.

Gambar 7(a) dan Gambar 7(b) menunjukkan bahwa secara umum RTU 1 dan RTU 2 memiliki algoritma yang serupa karena keduanya menggunakan sistem kendali yang hampir sama. Perbedaan terletak pada instrumen lapangan yang digunakan pada masing-masing RTU. Perancangan perangkat lunak pada RTU 1 dan RTU 2 mencakup proses pengiriman dan penerimaan data dari MTU melalui topik yang disesuaikan pada *broker* MQTT. Setiap program pada RTU dikembangkan menggunakan GX Works2 untuk sistem pemantauan dan pengendalian PLC Lollette LE3U serta Haiwell Cloud SCADA sebagai antarmuka RTU dan koneksi internet berbasis protokol MQTT. Gambar 7 menunjukkan skema perancangan perangkat lunak untuk RTU 1 dan RTU 2.

Untuk memperoleh data *temp-PV* pada RTU 1, diperlukan *transmitter* yang berfungsi mengonversi arus keluaran sensor



Gambar 6. Diagram alir sistem algoritma MTU.

menjadi arus dengan rentang yang dapat dibaca oleh PLC 12-bit. *Transmitter* yang digunakan dalam penelitian ini mengonversi arus keluaran sensor ke dalam rentang 4–20 mA yang merepresentasikan suhu 0°C hingga 100°C, sehingga memungkinkan algoritma pemrograman mengonversi nilai tersebut menjadi nilai temperatur aktual menggunakan (1).

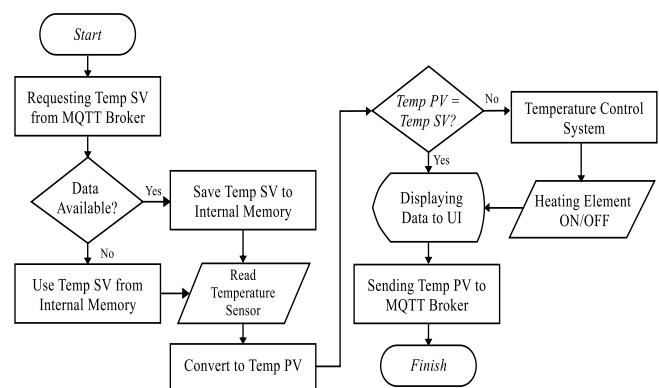
$$Temp\ PV = \frac{P_S - 4mA / 20mA (2^{12})}{2^{12} - 4mA / 20mA (2^{12})} \times 100^\circ C. \quad (1)$$

Elemen pemanas pada RTU 1 menggunakan sumber tegangan 220 VAC, sehingga diperlukan suatu *driver* agar PLC dengan *rating* 24 VDC dapat mengaktifkannya. Untuk elemen pemanas, *driver* yang paling sesuai adalah *solid state relay* (SSR). SSR memiliki fungsi yang sama dengan relai elektromekanis, tetapi tidak memiliki bagian bergerak karena bekerja berdasarkan prinsip yang serupa dengan transistor. Penggunaan SSR sangat sesuai untuk pengendalian sistem pemanas karena pada sistem ini sering terjadi proses penyakelaran yang sangat cepat antara kondisi *on* dan *off* guna mempertahankan suhu.

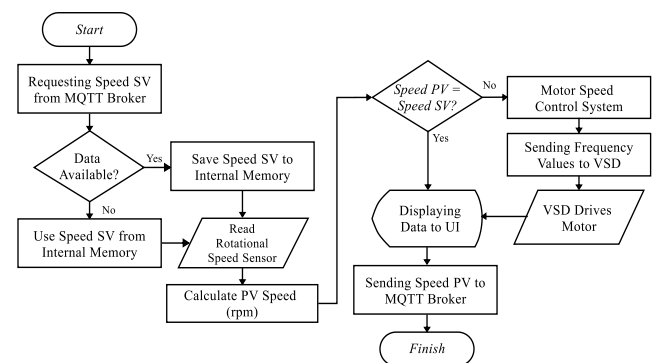
Pada RTU 2, enkoder bekerja dengan membaca jumlah tanda (*mark*) yang terdeteksi oleh sensor *proximity* [15]. Ketika motor menyelesaikan satu putaran penuh, sensor akan membaca sejumlah tanda sesuai dengan jumlah tanda yang digunakan. Berdasarkan konsep ini, serta dengan algoritma yang tepat, sensor *proximity* yang mampu membaca perbedaan tanda dapat dimanfaatkan sebagai sensor kecepatan motor dengan cara membandingkan frekuensi pembacaan sensor yang dibagi dengan jumlah tanda pada enkoder dalam satu satuan waktu, kemudian hasilnya dikonversi menjadi satuan rpm sebagai *speed PV*, sebagaimana ditunjukkan pada (2).

$$Speed\ PV = \frac{Read\ marks / Number\ of\ markers}{\Delta t}. \quad (2)$$

Perancangan pada penelitian ini menggunakan enam tanda dengan waktu pencuplikan 1 s ($1/60$ menit). Dengan demikian, berdasarkan (2), kecepatan putar dapat dihitung menggunakan (3).



(a)



(b)

Gambar 7. Diagram alir algoritma sistem, (a) RTU 1, (b) RTU 2.

$$Speed\ PV = \frac{Read\ marks / 6}{1/60}. \quad (3)$$

Pengendalian kecepatan sudut sinkron motor pada penelitian ini tidak melibatkan *slip* karena motor tidak dibebani secara signifikan. Kecepatan dapat diatur dengan mengubah frekuensi yang diberikan ke motor, sebagaimana dinyatakan pada (4) [16], [17]. Jumlah kutub motor AC tiga fase yang digunakan dalam penelitian ini adalah empat.

$$Speed\ SV = \frac{120 \times f}{4}. \quad (4)$$

Hasil perhitungan menggunakan (4) menunjukkan bahwa kecepatan putar motor induksi pada sistem yang dirancang bernilai tiga puluh kali frekuensi yang diberikan ke motor induksi. Frekuensi ini diatur menggunakan VSD untuk mengendalikan kecepatan motor [18]. VSD bekerja dengan masukan AC satu fase atau tiga fase yang dikonversi menjadi tegangan DC melalui rangkaian penyearah (*rectifier*). Selanjutnya, tegangan DC tersebut diubah kembali menjadi sinyal tegangan yang menyerupai tegangan AC tiga fase menggunakan rangkaian yang terdiri atas enam transistor. Pengaturan pewaktuan (*timing*) yang presisi oleh unit kendali terhadap enam transistor tersebut menghasilkan sinyal arus tiga fase dengan frekuensi tertentu sesuai kebutuhan: makin kecil nilai *timing*/periode, makin besar frekuensi keluaran yang dihasilkan.

Sinyal data frekuensi menuju VSD dikendalikan oleh PLC yang berkomunikasi melalui *port* RS-485. Parameter komunikasi yang perlu dikonfigurasi meliputi laju *baud*, panjang data, bit *stop*, dan bit paritas. Selain konfigurasi pada PLC, diperlukan pula pengaturan protokol komunikasi sebagai

TABEL II
TOPIK DARI SETIAP VARIABEL

Variabel	Deklarasi	Topik
Temperatur keluaran	<i>TempPV</i>	data/ROSS/RTU1TempPV/123
Temperatur referensi	<i>TempSV</i>	data/ROSS/RTU1TempSV/123
Status aktuator RTU 1	<i>StaAkt1</i>	data/ROSS/RTU1AktuStat/123
Hak akses RTU 1	<i>RTUAks1</i>	data/ROSS/RTU1Aks/123
Batas alarm RTU 1	<i>Range1</i>	data/ROSS/RTU1RangeTempSV/123
Pengaturan alarm RTU 1	<i>AlarmEnDis1</i>	data/ROSS/RTU1AlarmSet/123
Kecepatan keluaran	<i>Speed PV</i>	data/ROSS/RTU2SpeedPV/123
Kecepatan referensi	<i>Speed SV</i>	data/ROSS/RTU2SpeedSV/123
Status actuator RTU 2	<i>StaAkt2</i>	data/ROSS/RTU2AktuStat/123
Hak akses RTU 2	<i>RTUAks2</i>	data/ROSS/RTU2Aks/123
Batas alarm RTU 2	<i>Range2</i>	data/ROSS/RTU2RangeTempSV/123
Pengaturan alarm RTU 2	<i>AlarmEnDis2</i>	data/ROSS/RTU2AlarmSet/123

master serta penentuan nilai *slave ID* pada VSD. Sementara itu, pada sisi VSD, *slave ID* disesuaikan dengan konfigurasi pada PLC.

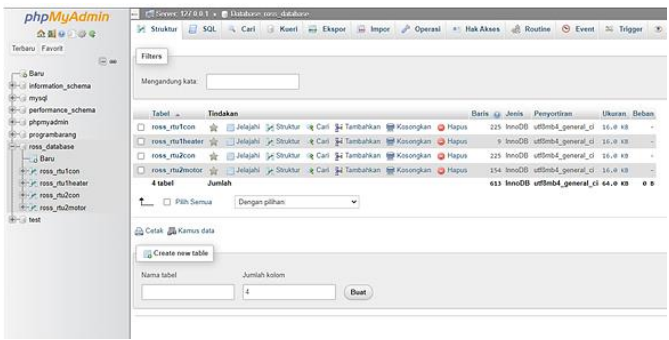
D. PROTOKOL KOMUNIKASI MQTT

Tabel II menunjukkan variabel dan topoik yang dipertukarkan antara aplikasi ROSS dan RTU. MQTT merupakan protokol yang dirancang untuk aplikasi IIoT [19], yang memungkinkan implementasi pada berbagai skenario, baik dalam konfigurasi perangkat maupun layanan yang disediakan. Protokol ini dapat diimplementasikan pada kondisi terbatas, baik dari sisi perangkat maupun keterbatasan jaringan. Pada penelitian ini, komunikasi antara aplikasi ROSS dan kedua RTU menggunakan protokol MQTT. Aplikasi ROSS dan RTU dapat saling terhubung karena menggunakan topik yang sama untuk setiap variabel pada *broker* MQTT. Topik pada Tabel II kemudian diintegrasikan ke dalam kode program aplikasi ROSS pada komputer MTU serta pada HMI di masing-masing RTU. Dengan menggunakan alamat topik yang identik, kedua lapisan sistem dapat terhubung melalui *broker* MQTT.

E. BASIS DATA MYSQL

Dalam penelitian ini, basis data MySQL dikembangkan menggunakan aplikasi berbasis web phpMyAdmin. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8, digunakan empat tabel dengan fungsi yang berbeda untuk masing-masing tabel. MySQL bekerja dengan memungkinkan pengguna untuk membuat basis data dan tabel, menyimpan data di dalamnya, serta mengambil informasi dari basis data melalui perintah tertentu [20].

Sementara itu, untuk menjamin aspek keamanan jaringan dan perlindungan data dari ancaman serta serangan siber, sesuai dengan prinsip *confidentiality, integrity, and availability* (Triad CIA), MQTT mendukung autentikasi berbasis *username/password*. Selain itu, komunikasi dapat diamankan menggunakan enkripsi TLS/SSL. Akses ke MTU dan basis



Gambar 8. Empat tabel basis data untuk aplikasi ROSS.

data MySQL dapat dilindungi dengan *firewall* serta autentikasi dua faktor. Untuk implementasi di dunia nyata, protokol keamanan industri (misalnya, IEC 62443) dapat diintegrasikan.

Server merupakan komputer yang menyimpan perangkat lunak MySQL beserta basis datanya, yang dalam penelitian ini direpresentasikan oleh perangkat keras MTU tempat aplikasi SCADA dijalankan. Tabel bernama *ross_rtulheater* dan *ross_rtu2motor* berfungsi untuk menyimpan setiap perubahan data. Dengan kata lain, tabel tersebut menyimpan nilai terbaru berdasarkan alamat variabel RTU. Selanjutnya, tabel bernama *ross_rtulcon* dan *ross_rtu2con* berfungsi untuk menyimpan data dengan interval setiap 10 s. Tabel ini diperbarui setiap 10 s dan dikirim oleh aplikasi ROSS berdasarkan alamat RTU dari data tersebut, yang ditujukan untuk keperluan analisis.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

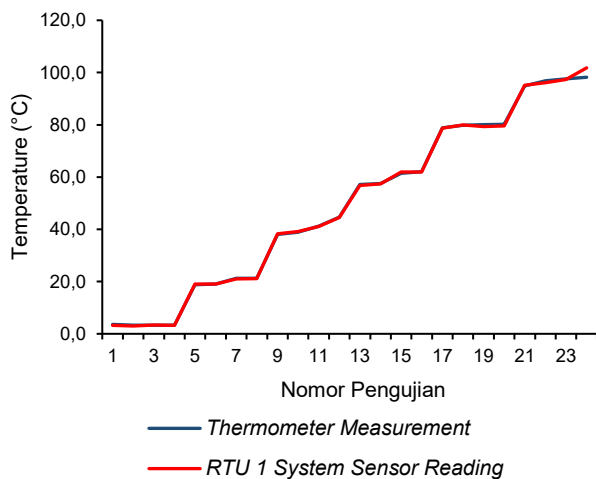
A. PENGUJIAN AKURASI DATA PADA INSTRUMEN DAN SISTEM PENGUKURAN

1) RTU 1 – SISTEM PEMANAS AIR

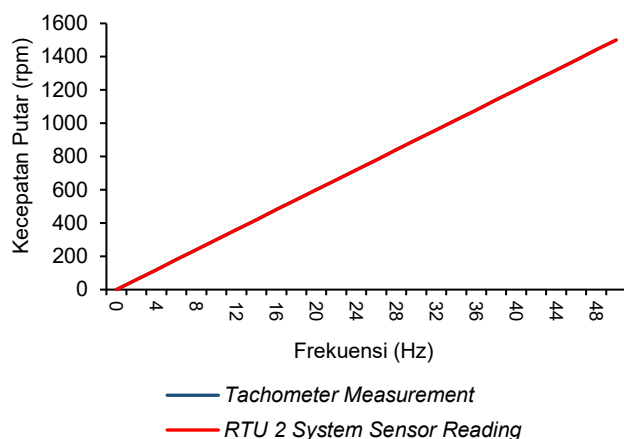
Pengukuran ini dilakukan pada suhu ruang dengan rentang setiap 20±5 °C dari 0 °C hingga 100 °C. Berdasarkan hasil pengujian, data yang diperoleh menunjukkan kestabilan meskipun tidak sepenuhnya linear. Nilai kesalahan terbesar tercatat sebesar 3,6 °C, tetapi hanya muncul ketika suhu mendekati 10 °C. Rata-rata kesalahan dari 24 kali pengujian adalah sebesar 0,4 °C. Persentase rata-rata kesalahan untuk setiap pengujian adalah 1,4%, sehingga tingkat akurasi pembacaan sensor mencapai 98,6%. Nilai akurasi ini tergolong tinggi, sehingga sistem dapat diandalkan. Distribusi data hasil pengukuran temperatur dari RTU 1 dapat dilihat pada Gambar 9. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kesalahan terbesar terjadi pada pengujian terakhir, ketika suhu mendekati 100 °C. Hal ini disebabkan oleh batas maksimum pembacaan sensor pada sistem RTU 1 yang berada pada 100 °C, sehingga akurasi sensor menurun ketika suhu mendekati batas tersebut. Meskipun demikian, sensor pada sistem ini tetap menunjukkan kinerja yang stabil karena masih mampu mengikuti perubahan suhu ketika sistem pemanas air (*planta*) mengalami variasi temperatur.

2) RTU 2 – KENDALI KECEPATAN

Pengukuran dilakukan pada rentang 0 hingga 1.500 rpm, dengan interval 60 rpm atau 2 Hz (sebagaimana ditunjukkan pada (7)), sehingga diperoleh total 26 data selama pengujian sensor kecepatan putar pada RTU 2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil pengukuran bersifat stabil dan linear, yang mengindikasikan bahwa nilai kesalahan pembacaan sensor antara sistem RTU 2 dan takometer pada seluruh pengujian adalah 0 rpm, sehingga persentase kesalahan sebesar 0%. Dengan demikian, rata-rata persentase kesalahan dari 26



Gambar 9. Perbandingan pengujian sensor RTU 1.



Gambar 10. Perbandingan pengujian sensor RTU 2.

pengujian yang dilakukan adalah 0%, dengan tingkat akurasi mencapai 100%. Distribusi data hasil pengukuran kecepatan putar dari RTU 2 dapat dilihat pada Gambar 10.

Sistem ini menunjukkan kesalahan sebesar 0 rpm dan persentase kesalahan 0% pada setiap pengujian yang merepresentasikan nilai antara 0 hingga 50 Hz, sehingga pembacaan sensor pada sistem ini sangat stabil, linear, dan andal untuk digunakan. Berdasarkan perhitungan menggunakan (5), sensor kecepatan putar pada RTU 2 memiliki resolusi (akurasi) sebesar 10 rpm. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor tidak dapat memberikan pembacaan yang akurat apabila kecepatan aktual bukan merupakan kelipatan 10 rpm. Namun demikian, berdasarkan (7), kecepatan motor hanya dapat diatur dalam kelipatan 30 rpm dan karena 30 merupakan kelipatan dari 10, akurasi pembacaan sensor pada RTU 2 dinilai memadai dan tidak memerlukan peningkatan. Dengan kata lain, motor pada sistem RTU 2 tidak dapat diatur pada kecepatan putar di luar kelipatan 30 rpm secara presisi serta tidak dapat dibaca di luar kelipatan 10 rpm. Namun, untuk penelitian selanjutnya, apabila motor tiga fase dapat dioperasikan pada kecepatan dengan resolusi di bawah 10 rpm, sensor pada RTU 2 perlu ditingkatkan, misalnya dengan menambah jumlah piringan pada enkoder serta memodifikasi metode perhitungan pembacaan.

B. PENGUJIAN KOMUNIKASI DATA RTU DAN MTU

Pada pengujian komunikasi data antara RTU dan MTU, dilakukan pengujian komunikasi menggunakan protokol

MQTT antara RTU dan MTU serta antara aplikasi ROSS dan basis data pada MTU, dengan variasi jenis jaringan dan waktu pengujian yang berbeda. Seluruh data yang dikomunikasikan tidak mengalami kehilangan, sehingga tingkat keberhasilan pengiriman dan penerimaan data mencapai 100%.

Skalabilitas arsitektur sistem berbasis *broker* MQTT memungkinkan tingkat skalabilitas yang tinggi karena protokol MQTT mendukung penambahan RTU/PLC baru hanya dengan menambahkan topik komunikasi yang relevan. Sistem dapat diperluas dari dua RTU menjadi puluhan RTU tanpa memerlukan perubahan signifikan pada desain MTU maupun aplikasi ROSS. Sistem SCADA, khususnya yang menggunakan platform *distributed control system* (DCS) untuk aplikasi berskala besar dan kompleks serta PLC dengan spesifikasi tinggi seperti seri ControlLogix dari Rockwell Automation, menyediakan modularitas dan kemampuan pemrosesan yang diperlukan.

C. PENGUJIAN DURASI WAKTU NYATA KOMUNIKASI DATA

Pengujian durasi komunikasi data dilakukan untuk mengevaluasi sistem yang telah dibangun, mampu beroperasi dengan baik dalam kondisi waktu nyata atau tidak.

1) RTU 1 – SISTEM PEMANAS AIR

Variabel *Temp PV* digunakan untuk merepresentasikan data yang dikirim oleh RTU 1 ke MTU pada aplikasi SCADA. Berdasarkan 15 kali pengujian, rata-rata durasi komunikasi dari RTU 1 ke MTU adalah sebesar 0,390 s, dengan simpangan baku sebesar 0,287 s. Variasi kecepatan jaringan Wi-Fi dapat menyebabkan perbedaan yang signifikan antara waktu pengiriman tercepat dan terlambat. Gambar 11 menunjukkan distribusi data serta simpangan baku dari pengujian tersebut.

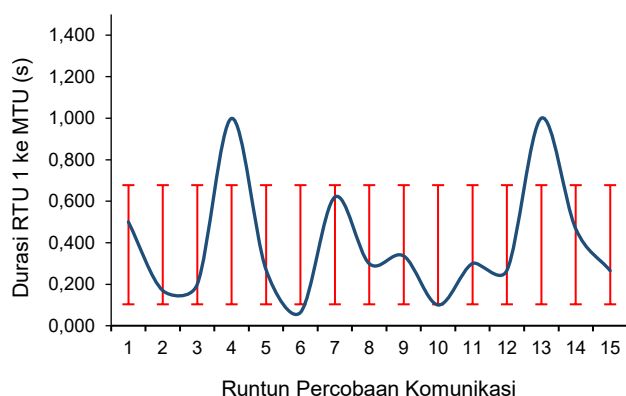
Variabel yang merepresentasikan data yang dikirim oleh MTU pada aplikasi SCADA ke RTU 1 adalah *Temp SV*. Pengujian terhadap 15 data menunjukkan bahwa durasi komunikasi dari MTU ke RTU 1 memiliki rata-rata sebesar 0,307 s, dengan simpangan baku yang relatif rendah, yaitu 0,121 s. Distribusi data dan simpangan baku pada pengujian rata-rata ditunjukkan pada Gambar 12. Berdasarkan hasil tersebut, durasi komunikasi data antara MTU dan RTU 1, baik dari MTU ke RTU 1 maupun sebaliknya, tergolong sangat cepat dan andal karena mampu beroperasi secara waktu nyata.

2) RTU 2 – KENDALI KECEPATAN

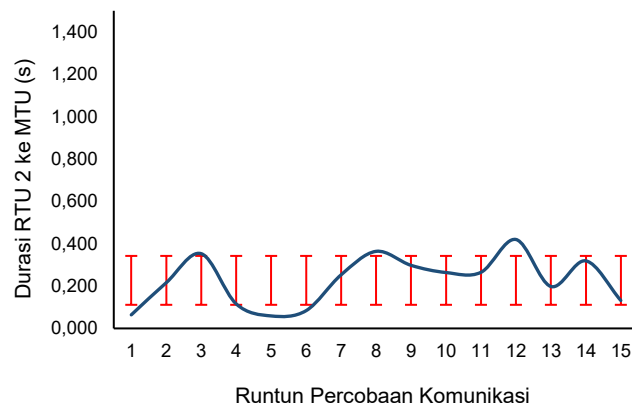
Variabel *Speed PV* digunakan untuk merepresentasikan pengiriman data dari RTU 2 ke MTU pada aplikasi SCADA. Dalam 15 kali pengujian durasi komunikasi dari RTU 2 ke MTU, diperoleh rata-rata durasi sebesar 0,227 s dengan simpangan baku sebesar 0,115 s. Distribusi data dan simpangan bakunya terhadap rata-rata durasi ditunjukkan pada Gambar 13.

Distribusi data dan simpangan baku dari pengujian rata-rata ini juga ditampilkan pada Gambar 14. Salah satu variabel yang dikirim dari MTU pada aplikasi SCADA ke RTU 2 adalah *Speed SV*. Berdasarkan 15 data hasil pengujian durasi komunikasi dari MTU ke RTU 2, diperoleh rata-rata durasi sebesar 0,373 s dengan simpangan baku yang relatif rendah, yaitu 0,141 s. Berdasarkan hasil tersebut, durasi komunikasi data antara MTU dan RTU 2, baik dari MTU ke RTU 2 maupun sebaliknya, tergolong sangat cepat dan andal karena mampu beroperasi secara waktu nyata.

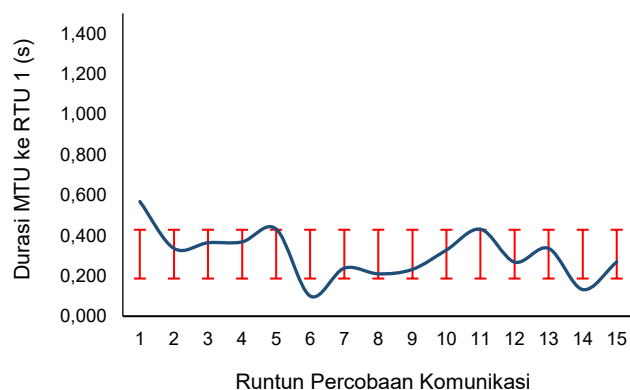
Secara keseluruhan, sistem SCADA modern yang memanfaatkan jaringan kabel (*wired network*) dan protokol komunikasi yang efisien umumnya memerlukan waktu



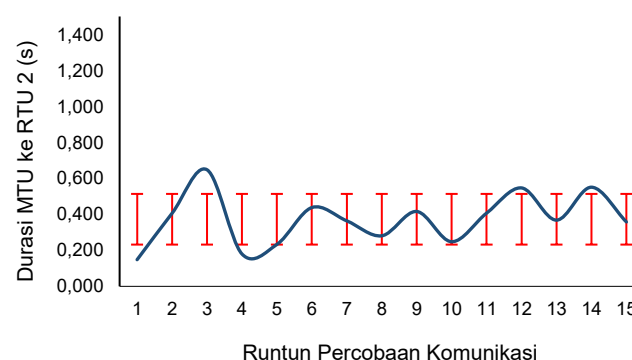
Gambar 11. Durasi komunikasi RTU 1 ke MTU.



Gambar 13. Durasi komunikasi RTU 1 ke MTU.



Gambar 12. Durasi komunikasi MTU ke RTU 1.



Gambar 14. Durasi komunikasi MTU ke RTU 2.

komunikasi kurang dari 1 s. Sementara itu, sistem yang menggunakan jaringan nirkabel atau satelit dapat membutuhkan waktu komunikasi hingga beberapa detik, bahkan melebihi 5 s. Rata-rata durasi komunikasi yang diperoleh dalam penelitian ini adalah sebesar 0,324 s.

D. PENGUJIAN SISTEM KENDALI

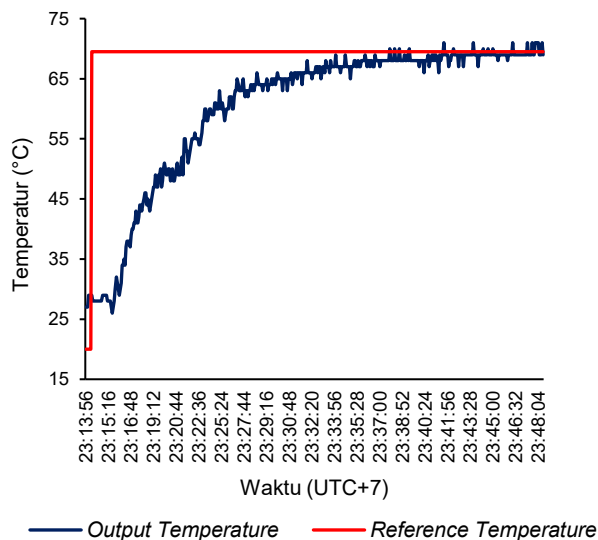
Setiap RTU memiliki sistem kendali yang dikendalikan oleh PLC berdasarkan masukan dari nilai referensi serta keluaran dari pembacaan sensor. Sistem kendali pada RTU 1, yaitu sistem pemanas air, beroperasi menggunakan kendali *proportional integral* (PI). Sistem ini diatur sedemikian rupa sehingga ketika perbedaan antara suhu referensi dan suhu aktual cukup besar, aktuator bekerja secara optimal. Sebaliknya, ketika nilai referensi mendekati nilai keluaran, aktuator bekerja dengan memanfaatkan penyalaklaran SSR. Pendekatan ini memastikan pengaturan suhu yang efisien serta penggunaan energi yang optimal, sehingga memungkinkan respons yang cepat terhadap perubahan kondisi. Selain itu, desain sistem ini meningkatkan keandalan serta meminimalkan keausan pada komponen aktuator, sehingga memperpanjang umur operasionalnya. Gambar 8 menunjukkan bahwa air yang awalnya berada pada suhu sekitar 27 °C pada pukul 23:13:56 UTC+7 mencapai suhu sekitar 70 °C pada pukul 23:40:24 UTC+7. Dapat diamati bahwa ketika suhu masih jauh dari nilai referensi, peningkatan suhu terjadi secara cepat. Namun, ketika selisih antara referensi dan keluaran makin kecil, peningkatan suhu tidak lagi signifikan. Perilaku ini menunjukkan efisiensi sistem dalam mencapai suhu target sekaligus mempertahankan kestabilan. Karakteristik tersebut sangat penting pada aplikasi yang memerlukan pengendalian suhu secara presisi untuk

menjamin kinerja optimal dan keselamatan. Pada rentang waktu 23:40:24 UTC+7 hingga 23:48:24 UTC+7, sistem mampu mempertahankan suhu keluaran agar tetap sesuai dengan suhu referensi. Hal ini dicapai melalui mekanisme penyalaklaran SSR yang secara bergantian mengaktifkan dan menonaktifkan pemanas.

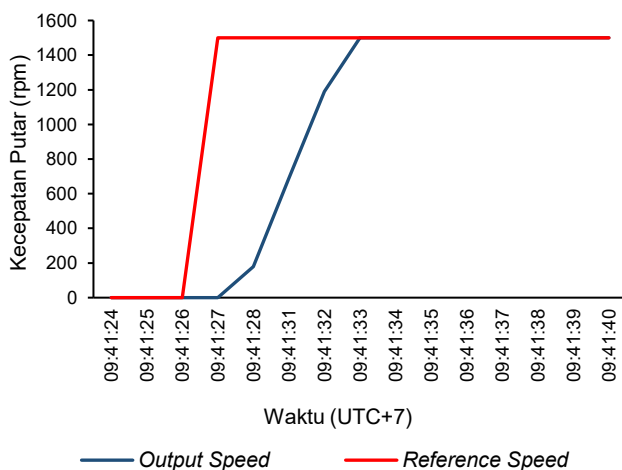
Sistem kendali pada RTU 2, yaitu pengendalian kecepatan motor, menggunakan metode *proportional integral derivative* (PID). Sistem ini diatur menggunakan VSD, sedangkan nilai kendalinya diatur oleh PLC. Berdasarkan Gambar 15 dan Gambar 16, VSD menggerakkan motor pada tahap awal dengan konsep *soft starter*, sehingga meningkatkan keandalan motor dan menghindari lonjakan daya awal (*overshoot*). Ketika motor mulai berputar, percepatan motor ditingkatkan oleh VSD, sehingga kecepatan motor meningkat secara signifikan. Namun, saat kecepatan motor mendekati nilai referensi, percepatan kembali dikurangi untuk mencegah terjadinya *overshoot*, sehingga kecepatan motor tetap berada dalam batas yang diinginkan.

E. ANALISIS BIAYA PENGEMBANGAN SISTEM

Sistem yang digunakan dalam penelitian ini memanfaatkan komponen dengan biaya paling efisien yang tersedia. Dengan memprioritaskan keterjangkauan tanpa mengorbankan kualitas, penelitian ini bertujuan untuk menyediakan solusi praktis bagi pengembangan sistem serupa di masa mendatang. Sistem SCADA yang dibangun tidak hanya berfungsi sebagai jaringan komunikasi SCADA seperti pada sistem SCADA konvensional, tetapi juga sebagai sistem kendali untuk setiap RTU dengan menggunakan komponen kelas PLC serta komponen standar industri lainnya. Pendekatan inovatif ini memungkinkan pemantauan dan pengendalian secara waktu nyata,



Gambar 15. Pengujian kendali RTU 1.



Gambar 16. Pengujian kendali RTU 2.

meningkatkan efisiensi operasional, sekaligus meminimalkan biaya. Selain itu, sistem ini memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam pengembangan dan integrasi dengan teknologi baru. Dibandingkan dengan SCADA konvensional, sistem ini memakan biaya sekitar 80% lebih rendah serta menawarkan fleksibilitas, yaitu mudah direplikasi dan dikonfigurasi ulang.

Sistem yang dikembangkan hampir siap untuk digunakan dan diimplementasikan pada lingkungan industri tanpa memerlukan perubahan signifikan. Tahap pengujian akhir sedang berlangsung dan umpan balik awal menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada pengalaman pengguna. Para pemangku kepentingan menunjukkan optimisme terhadap potensi peningkatan produktivitas dan efisiensi di berbagai sektor. Berdasarkan perhitungan biaya, sistem ini jauh lebih ekonomis dibandingkan sistem SCADA dengan fitur dan tingkat kustomisasi yang sebanding, yang dapat mencapai biaya hingga US\$5.000,00 [21], atau dengan efisiensi biaya sekitar 80,6%.

Untuk menjamin keandalan jangka panjang, penelitian ini menitikberatkan pada pengujian keandalan sistem SCADA yang telah dirancang, dikembangkan, dan diuji berulang kali dalam berbagai kondisi pengujian komunikasi tanpa mengalami *packet loss*. Namun demikian, untuk mencapai keandalan jangka panjang yang optimal, diperlukan penelitian

lanjutan berupa pengujian ketahanan dalam jangka waktu beberapa minggu hingga bulan guna mengamati degradasi sensor, stabilitas komunikasi MQTT, serta ketahanan perangkat PLC dan HMI.

Sebagai perbandingan, sistem SCADA konvensional yang tersedia di pasar telah melalui proses penelitian dan pengujian sistem yang ekstensif, sehingga memiliki tingkat kestabilan yang lebih tinggi. Dalam implementasi nyata penelitian ini, sistem yang diusulkan telah diterapkan pada laboratorium proyek percontohan di Departemen Teknik Elektro Universitas Tanjungpura dengan beban nyata berupa pemanas air dan motor AC tiga fase. Sistem tersebut dirancang untuk mereplikasi kondisi industri skala kecil. Saat ini, penerapan langsung pada industri masih berada pada tahap penawaran.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini berhasil dan memenuhi tujuan yang diharapkan, dengan tingkat akurasi antara instrumen pengukuran pada RTU 1 mencapai 98,6% dan pada RTU 2 mencapai 100%. Tidak terjadi *packet loss* selama proses komunikasi antara lapisan-lapisan SCADA, yang menunjukkan bahwa protokol MQTT berbasis teknologi IIoT yang digunakan dalam penelitian ini tidak mengalami kehilangan paket data. Pengujian waktu nyata dengan mengukur durasi komunikasi antara RTU dan MTU menunjukkan bahwa waktu transmisi bergantung pada jenis data dan kondisi jaringan, tetapi durasi pengiriman antara RTU 1 dan MTU serta RTU 2 dan MTU tergolong sangat kecil, yaitu sekitar 0,324 s. Sistem kendali pada kedua RTU dapat diandalkan karena keluaran yang dihasilkan mampu mengikuti nilai referensi pengguna serta menunjukkan kestabilan yang baik. Selain itu, efisiensi biaya dalam pembangunan sistem SCADA dibandingkan dengan sistem SCADA konvensional tergolong sangat signifikan, yaitu mencapai sekitar 80,6%. Sistem SCADA yang dikembangkan juga memiliki keunggulan dalam hal replikasi dan rekonfigurasi, sehingga fleksibel untuk diterapkan pada berbagai kebutuhan industri.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian maupun penyusunan makalah ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Hendro Priyatman, Supriono, dan Seno D. Panjaitan; metodologi, Seno D. Panjaitan; perangkat lunak, Hendro Priyatman; validasi, Seno D. Panjaitan; analisis formal, Supriono dan Muh. Revaldi Frizky; investigasi, Muh. Revaldi Frizky; penulisan—penyusunan draf awal, Muh. Revaldi Frizky; penulisan—tinjauan dan penyuntingan, Supriono; visualisasi, Muh. Revaldi Frizky; supervisi, Seno D. Panjaitan, Hendro Priyatman, Supriono, dan Muh. Revaldi Frizky.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Laboratorium Teknik Kendali, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura Pontianak, atas dukungan fasilitas dan peralatan yang diperlukan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] A.S. Marsudi dan Y. Widjaja, "Industri 4.0 dan dampaknya terhadap financial technology serta kesiapan tenaga kerja di Indonesia," *Ikra-lth Ekonomika*, Vol. 2 No. 2, hal. 1–10, Juli 2019.

- [2] A.W. Colombo dkk., "A 70-year industrial electronics society evolution through industrial revolutions: The rise and flourishing of information and communication technologies," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 15, no. 1, hal. 115–126, Mar. 2021, doi: 10.1109/MIE.2020.3028058.
- [3] M. Hermann, T. Pentek, dan B. Otto, "Design principles for industrie 4.0 scenarios," in *2016 49th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci. (HICSS)*, 2016, hal. 3928–3937, doi: 10.1109/HICSS.2016.488.
- [4] T. Thepmanee, S. Pongswatd, F. Asadi, dan P. Ukakimaparn, "Implementation of control and SCADA system: Case study of Allen Bradley PLC by using WirelessHART to temperature control and device diagnostic," *Energy Rep.*, vol. 8, hal. 934–941, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.163.
- [5] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, dan T. Watson, "The industrial Internet of things (IIoT): An analysis framework," *Comput. Ind.*, vol. 101, hal. 1–12, Okt. 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.04.015.
- [6] M. Alabadi, A. Habbal, dan X. Wei, "Industrial Internet of things: Requirements, architecture, challenges, and future research directions," *IEEE Access*, vol. 10, hal. 66374–66400, Jun. 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3185049.
- [7] E. Sisinni dkk., "Industrial Internet of things: Challenges, opportunities, and directions," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 14, no. 11, hal. 4724–4734, Nov. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2852491.
- [8] B.Chen dkk., "Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, hal. 6505–6519, Des. 2017, doi: 10.1109/access.2017.2783682.
- [9] R. Dugyala, N.H. Reddy, dan S. Kumar, "Implementation of SCADA through cloud based IoT devices – Initial design steps," dalam *2019 5th Int. Conf. Image Inf. Process. (ICIIP)*, 2019, hal. 367–372, doi: 10.1109/ICIIP47207.2019.8985966.
- [10] Hasan, I. Suharto, dan W. Heryawan, "Rancang bangun jaringan komunikasi PLC menggunakan sistem WLAN untuk memonitor proses kontrol berbasis human machine interface SCADA INFO U," *Vokasi*, vol. 14, no. 2, hal. 87–94, Des. 2019.
- [11] L.O. Aghenta dan M.T. Iqbal, "Low-cost, open source IoT-based SCADA system design using Thinger.IO and ESP32 thing," *Electronics*, vol. 8, no. 8, hal. 1–24, Agu. 2019, doi: 10.3390/electronics8080822.
- [12] I. Harjanto, "IoT gateway menggunakan protokol MQTT pada perangkat kendali berbasis modbus-RTU," *JITEK (J. Ilm. Teknosains)*, vol. 6, no. 1, hal. 12–19, Mei 2020, doi: 10.26877/jitek.v6i1.5957.
- [13] A. Supriyono, M.J. Afroni, dan O. Melfazen, "Penerapan SCADA berbasis IoT untuk simulator kontrol panel pada contoh kasus pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTM)," *JE-Unisla*, vol. 7, no. 2, hal. 119–126, Sep. 2022, doi: 10.30736/je-unisla.v7i2.889.
- [14] M. Endi, Y.Z. Elhalwagy, dan A. Hashad, "Three-layer PLC/SCADA system architecture in process automation and data monitoring," dalam *2010 2nd Int. Conf. Comput. Autom. Eng. (ICCAE)*, 2010, hal. 774–779, doi: 10.1109/ICCAE.2010.5451799.
- [15] K.-M. Lee, T. Gu, dan Y.-B. Bang, "Analysis of accuracy and measuring range of dual absolute encoder system," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 6, hal. 2997–3004, Mar. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2019.2955381.
- [16] A.W. Aditya, R.M. Utomo, N.R. Alham, dan Hilmansyah, "The industrial IoT control design of three phase induction motor using conventional VF method," *Elkha, J. Tek. Elekt.*, vol. 15, no. 1, hal. 67–72, Apr. 2023, doi: 10.26418/elkha.v15i1.63817.
- [17] Z. Anthony, "Pengaruh perubahan frekuensi dalam sistem pengendalian kecepatan motor induksi 3-fasa terhadap efisiensi dan arus kumparan motor," *J. Tek. Elekt.*, vol. 1, no. 1, hal. 25–29, Jan. 2018.
- [18] A. Spahiu, D. Bizhga, dan L. Dharmo, "Reduction of electricity consumption and water cost in pump application," dalam *2020 IEEE 3rd Int. Conf. Workshop Obuda Electr. Power Eng. (CANDO-EPE)*, 2020, hal. 000137–000142, doi: 10.1109/CANDO-EPE51100.2020.9337777.
- [19] R.A. Atmoko dan D. Yang, "Online monitoring & controlling industrial arm robot using MQTT protocol," dalam *2018 IEEE Int. Conf. Robot. Biomim. Intell. Comput. Syst. (Robionetics)*, 2018, hal. 12–16, doi: 10.1109/ROBIONETICS.2018.8674672.
- [20] G. Ongo dan G.P. Kusuma, "Hybrid database system of MySQL and MongoDB in web application development," dalam *2018 Int. Conf. Inf. Manag. Technol. (ICIMTech)*, 2018, hal. 256–260, doi: 10.1109/ICIMTech.2018.8528120.
- [21] DPS Telecom "Take control of your remote monitoring." Tanggal akses: 16-Sep-2014. [Online]. Tersedia: <https://www.dpstele.com/>