

Pengembangan Sistem Kontrol Redundansi *Chiller* pada MRI Berbasis *Internet-of-Things*

Santo Wijaya^{1*}, Nita Winda Sari², Dwiky Firnanda Dewa³

¹Program Studi Teknik Industri, Politeknik Meta Industri Cikarang, Indonesia

^{2,3}Program Studi Teknologi Rekayasa Perangkat Lunak, Politeknik Meta Industri Cikarang, Indonesia

Email: ¹santo.wijaya@politeknikmeta.ac.id, ²nita@politeknikmeta.ac.id,

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Naskah masuk, 23 September 2019

Direvisi, 23 September 2019

Diterima, 23 September 2019

Kata Kunci:

Magnetic Resonance Imaging;
Chiller;
Sistem kontrol;
Redundancy;
Programmable Logic Controller;
Internet-of-Things

ABSTRAK

Abstract- Modern hospitals utilize technologies such as Magnetic Resonance Imaging (MRI) for medical diagnostics; however, challenges persist in the cooling system for superconducting magnets due to manual and limited-access chiller controls. These issues can lead to operational delays, cooling system failures, and even permanent damage to MRI equipment—resulting in postponed diagnostics and negatively impacting patient care. This study develops an automated control system based on a Programmable Logic Controller (PLC), integrated with a Virtual Human Machine Interface (HMI) and Mobile HMI for efficient, real-time monitoring and user-friendly operation. Testing using Black-box and White-box methods demonstrated 100% validation, while a user satisfaction survey showed a high acceptance rate of 96.36%. The system is also plug-and-play, allowing easy deployment to other MRI units with minimal electrical adjustments. The implementation significantly improves the reliability and efficiency of MRI cooling operations, accelerates technician response to failures, and reduces the risk of equipment downtime. Ultimately, the system contributes to uninterrupted medical imaging services, minimizes patient waiting times, and enhances diagnostic reliability in hospital environments.

Abstrak- Rumah sakit modern memanfaatkan teknologi seperti MRI untuk diagnosis medis, namun masih ditemukan kendala pada sistem pendinginan magnet superkonduktor akibat kontrol chiller yang manual dan terbatas. Masalah ini dapat menyebabkan keterlambatan operasi, kegagalan sistem pendingin, hingga risiko kerusakan permanen pada perangkat MRI yang berdampak pada penundaan diagnosis pasien. Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol otomatis berbasis PLC yang dilengkapi dengan *Virtual* HMI dan *Mobile* HMI untuk pemantauan *real-time* yang efisien dan mudah digunakan. Hasil pengujian dengan metode *Black-box* dan *White-box* menunjukkan validasi 100%, sementara survei kepuasan pengguna mencatat tingkat kepuasan sebesar 96,36%. Sistem ini juga bersifat *plug and play*, sehingga dapat diterapkan pada unit MRI lain dengan penyesuaian minimal. Implementasi sistem terbukti meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional pendinginan, mempercepat respons teknis terhadap kegagalan sistem, serta mengurangi risiko downtime MRI. Dampak nyatanya adalah meningkatnya kontinuitas layanan pencitraan medis di rumah sakit, meminimalkan waktu tunggu pasien, serta menjaga kualitas diagnosis secara berkelanjutan.

Copyright © 2025 LPPM - STMIK IKMI Cirebon
This is an open access article under the CC-BY license

Penulis Korespondensi:

Santo Wijaya

Program Studi Teknik Industri,

Politeknik Meta Industri Cikarang

Jl. Inti I No.7 Blok C1, Cibatu, Cikarang Sel., Kabupaten Bekasi, Jawa Barat

Email: santo.wijaya@politeknikmeta.ac.id

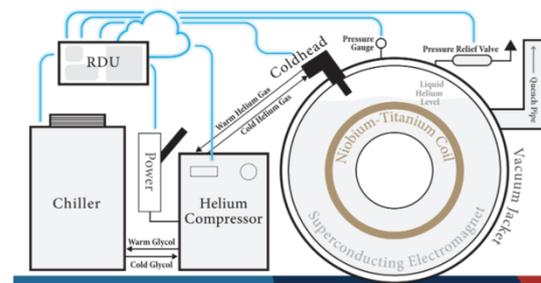
1. Pendahuluan

Dalam dunia medis, MRI adalah teknik pencitraan non-invasif yang menghasilkan gambar penampang tubuh dengan memanfaatkan medan magnet kuat dan gelombang radio. Prinsip kerja MRI bergantung pada resonansi inti atom hidrogen dalam tubuh manusia. Ketika tubuh ditempatkan dalam medan magnet tinggi, inti hidrogen akan sejajar mengikuti medan tersebut. Kemudian, gelombang radio dikirim untuk mengganggu kesejajaran tersebut, dan saat inti kembali ke posisi semula, energi yang dilepaskan ditangkap oleh sistem dan dikonversi menjadi gambar detail jaringan lunak tubuh. Keunggulan metode ini adalah akurasi tinggi tanpa paparan radiasi ionisasi seperti pada CT Scan, sehingga aman untuk berbagai diagnosis penyakit dalam [1]–[3].

Agar proses pencitraan dapat berjalan optimal, MRI menggunakan magnet superkonduktor yang harus dijaga pada suhu sangat rendah (sekitar 4–6 °C). Magnet superkonduktor ini didinginkan menggunakan helium cair, dan untuk menjaga helium tetap dalam bentuk cair, sistem membutuhkan pendingin tambahan, yaitu *chiller*. Fungsi utama *chiller* adalah membuang panas berlebih dari *cold head* yang mengondensasi kembali helium ke bentuk cair. Apabila proses pendinginan terganggu, helium dapat menguap, menyebabkan *quench* dan berpotensi merusak magnet MRI secara permanen. Selain mahal, proses pengisian ulang helium juga memerlukan waktu dan biaya yang besar, serta menyebabkan penundaan layanan terhadap pasien [4]–[6]. Sistem *chiller* MRI yang masih dikendalikan secara manual menimbulkan berbagai kendala seperti keterlambatan dalam pergantian unit *chiller* cadangan, keterbatasan kontrol hanya dari panel lokal, serta minimnya notifikasi *real-time*. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol otomatis yang dapat diakses secara lokal maupun jarak jauh (*online*), agar proses pendinginan berjalan stabil dan efisien, memungkinkan pemantauan kondisi secara *real-time*, serta mendukung pelaksanaan pemeliharaan preventif dengan lebih baik [7], [8]. Arsitektur MRI seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Rieger *et al.* mengembangkan sistem pendingin suhu terkontrol untuk pemindaian MRI *post-mortem* yang akurat, terutama pada jaringan yang belum difiksasi. Masalah utama dalam pemindaian *post-mortem* adalah naiknya suhu jaringan akibat energi dari pemindaian, yang mengubah nilai parameter MRI seperti T1, T2, dan ADC, sehingga hasil menjadi bias. Sistem yang dikembangkan menggunakan pendingin air dan cooling pad yang membungkus sampel untuk menjaga suhu stabil selama pemindaian hingga 7

jam. Uji coba menunjukkan bahwa tanpa pendingin suhu jaringan naik >13°C, sedangkan dengan pendingin hanya naik ~2°C [9]. Liao mengusulkan metode kontrol prediktif hibrida untuk sistem *chiller* guna mengurangi switching yang tidak perlu dan meningkatkan efisiensi energi. Dengan menggabungkan prediksi beban pendingin berbasis model ARX, sistem dapat mengevaluasi ulang kebutuhan nyala/ mati *chiller* secara lebih cermat. Hasil simulasi menunjukkan pengurangan jumlah switching hingga 31,9% dan penghematan biaya operasional hingga 4,25% tanpa mengorbankan kenyamanan termal. Metode ini sederhana dan praktis untuk diterapkan dalam sistem HVAC nyata [10].



Gambar 1. Arsitektur sistem MRI [12]

Beberapa penelitian terkait MRI yang menggunakan teknologi Internet-of-Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi operasional dan deteksi awal kegagalan sistem. Diantaranya seperti yang diusulkan oleh Guissi *et al.* yang mengembangkan sistem prediktif berbasis IoT untuk pemeliharaan preventif peralatan medis kritis, khususnya pompa pendingin sistem MRI. Sistem ini menggunakan sensor getaran (ADXL345) yang terhubung ke Raspberry Pi untuk memantau kondisi pompa cold head pada MRI secara *real-time*. Data getaran dianalisis menggunakan algoritma machine learning, termasuk *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Convolutional Neural Network* (CNN). Tujuan utamanya adalah mendeteksi dini potensi kerusakan dan mencegah kegagalan mendadak, sehingga meningkatkan efisiensi, mengurangi downtime, dan menurunkan biaya perawatan. Hasil pengujian di klinik menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kondisi pompa dengan akurasi >98%, terutama dengan model CNN [11]. Elallam mengembangkan alat monitoring jarak jauh berbasis Arduino untuk mendeteksi kerusakan sistem pendingin mesin MRI. Alat ini mudah dipasang, murah, dan efisien, hanya membutuhkan satu koneksi ke kompresor helium melalui port DB-25. Dengan bantuan sensor suhu dan kelembaban, sistem bisa mendeteksi potensi kejadian *quench* (penguapan helium cair) dan mengirim notifikasi

SMS dan email otomatis ke tim teknisi. Hasil pengujian menunjukkan sistem ini berhasil mendeteksi berbagai skenario kerusakan dan quench [12].

Penelitian ini dilakukan di salah satu Rumah Sakit (RS) internasional XYZ yang berlokasi di Bali. RS XYZ juga menggunakan sistem *chiller redundant* dikarenakan selama proses MRI berlangsung *chiller* tidak boleh berhenti. Sistem *redundant chiller* MRI yang ada saat ini masih menggunakan kontrol manual, sehingga pengoperasiannya kurang optimal. Beberapa kelemahan yang ditemukan antara lain: (1) Terjadi delay saat perpindahan dari *chiller 1* ke *chiller 2*, (2) Akses kontrol terbatas karena hanya bisa dilakukan dari panel lokal, (3) Kegagalan salah satu grup *chiller* tidak langsung teratasi, (4) Tidak adanya tampilan status dan *alarm* secara *real-time*.

Kondisi ini sangat berisiko karena kegagalan pendinginan akan menyebabkan penguapan helium cair dalam MRI, yang harus segera diisi ulang. Mengingat satu unit MRI memerlukan empat tabung helium, dan harga per tabung sangat mahal, maka kegagalan sistem akan menimbulkan kerugian besar dan waktu penggantian yang lama. Untuk mengatasi masalah tersebut, penulis mengusulkan pengembangan sistem kontrol otomatis berbasis *Internet-of-Things* (IoT) yang dilengkapi dengan fitur *mobile control* serta *virtual Human Machine Interface* (HMI) yang mampu menampilkan status dan *alarm* secara *real-time*. Pendekatan ini bertujuan meningkatkan keandalan sistem *chiller* MRI serta efisiensi operasional dan pemantauan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem berbasis IoT dan PLC untuk merancang sistem kontrol redundan *chiller* MRI. Pemilihan metode ini diawali dengan identifikasi permasalahan di RS XYZ Bali yang masih menggunakan kontrol manual pada sistem *chiller*, sehingga rawan keterlambatan, sulit dimonitor secara *real-time*, dan minim notifikasi kegagalan.

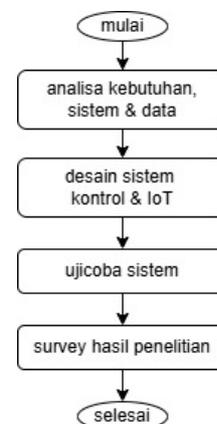
Pemilihan PLC dan IoT didasarkan pada beberapa keunggulan dibanding pendekatan alternatif lainnya seperti mikrokontroler konvensional (Arduino), SCADA tradisional, atau sistem berbasis PC *standalone*, yaitu reliabilitas dan daya tahan, kemudahan integrasi dengan sistem eksisting, keunggulan IoT dalam pemantauan dan kontrol jarak jauh. Selain itu, pemilihan ini juga merupakan salah satu dari permintaan yang diajukan oleh pihak RS XYZ Bali.

Sistematika metode penelitian yang dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Penelitian diawali dengan perumusan masalah yang dihadapi pada sistem *chiller* MRI yang masih menggunakan

kontrol manual di RS XYZ yang berlokasi di Bali, serta tujuan untuk mengembangkan sistem kontrol otomatis dengan antarmuka modern dan portable berbasis IoT. Tahap analisa kebutuhan, sistem & data mencakup identifikasi lokasi sistem MRI dan *chiller* nya yang terpasang serta pengumpulan data teknis sistem eksisting. Dilakukan studi terhadap sistem kelistrikan, skema kontrol eksisting, serta kondisi aktual operasional *chiller* dan tantangan teknis yang dihadapi. Analisis ini penting untuk memahami kebutuhan pengembangan sistem otomatis yang sesuai dengan kondisi lapangan.

Tahap desain sistem kontrol & IoT dimulai berdasarkan analisa kebutuhan, dilakukan desain sistem kontrol otomatis menggunakan PLC Haiwell dengan fitur IoT dan *virtual* HMI. Desain juga mencakup pembuatan wiring diagram baru, pemrograman sekuensial sistem kontrol otomatis, perancangan *dashboard monitoring real-time*, serta penyusunan sistem alarm dan indikator berbasis *cloud* dan *mobile*. Tahap ujicoba sistem melibatkan dua jenis pengujian fungsional melalui: (1) Black-box testing untuk menguji output berdasarkan input tanpa melihat struktur kode ataupun sekuensial sistem kontrol, (2) White-box testing untuk menguji alur logika dan program sekuensial sistem kontrol di dalam PLC. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh fungsi kontrol bekerja sesuai skenario [13]–[15].

Tahap survei hasil penelitian dilakukan untuk evaluasi hasil penelitian dari sisi pengguna dengan menyebarkan kuesioner kepuasan pengguna kepada tim terkait di RS XYZ Bali dan pihak rekanan. Survei ini menilai aspek efektivitas sistem, kemudahan penggunaan, kecepatan akses, dan peningkatan efisiensi kerja secara keseluruhan. Nilai kepuasan pengguna digunakan sebagai indikator keberhasilan implementasi sistem. Setelah seluruh tahapan dilalui, penelitian ditutup dengan dokumentasi hasil, penyerahan sistem, serta pelatihan penggunaan sistem.



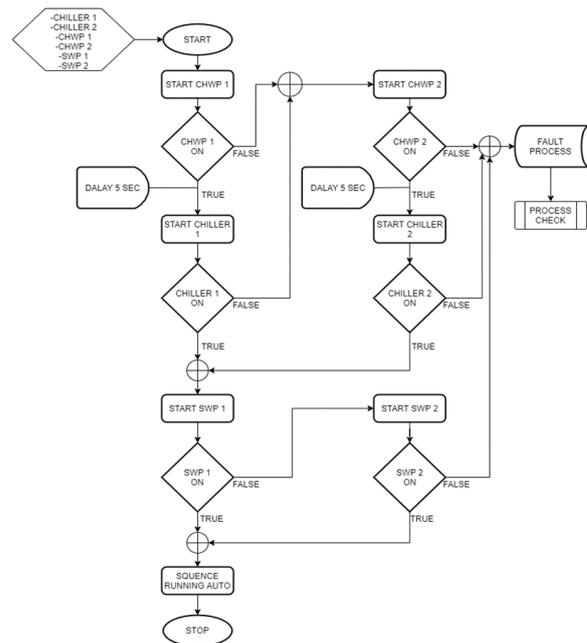
Gambar 2. Sistematika metode penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

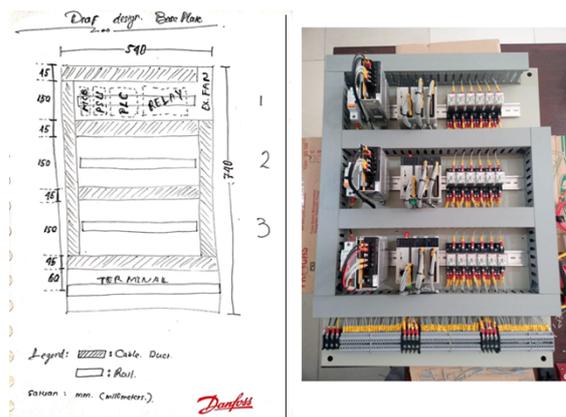
Identifikasi lokasi penelitian dan sistem dilakukan pada Juni 2023. Di RS XYZ Bali terdapat 2 unit sistem MRI dan 4 unit *chiller redundant* terpasang. Unit eksisting terpasang kurang lebih 5 tahun. RS XYZ juga menggunakan sistem *chiller redundant* dikarenakan selama proses MRI berlangsung *chiller* tidak boleh berhenti. Sistem *redundant chiller* MRI yang ada saat ini masih menggunakan kontrol manual, sehingga pengoperasiannya kurang optimal. Beberapa kelemahan yang ditemukan antara lain: (1) Terjadi *delay* saat perpindahan dari *chiller* 1 ke *chiller* 2, (2) Akses kontrol terbatas karena hanya bisa dilakukan dari panel lokal, (3) Kegagalan salah satu grup *chiller* tidak langsung teratasi, (4) Tidak adanya tampilan status dan *alarm* secara *real-time*.

Desain sistem kontrol otomatis dibuat untuk menghilangkan operasi perpindahan antar *chiller* secara manual. Diagram alur sekuensial sistem kontrol otomatis ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem kontrol otomatis *chiller* MRI bekerja secara berurutan dan *redundant* untuk memastikan pendinginan berjalan stabil dan aman. Proses diawali dengan pemilihan grup *chiller* (CHILLER, CHWP, dan SWP) yang akan diaktifkan. Sistem kemudian menghidupkan pompa air dingin (CHWP), dan setelah verifikasi berhasil, dilanjutkan dengan aktivasi unit *chiller*. Jika *chiller* menyala dengan sukses, pompa distribusi (SWP) dinyalakan untuk mengalirkan air dingin ke unit MRI. Setiap tahap dilengkapi dengan logika verifikasi status menyala (*feedback*); apabila suatu perangkat gagal menyala dalam waktu yang ditentukan, sistem langsung masuk ke proses *fault* dan mencoba mengalihkan operasi ke grup cadangan secara otomatis. Dengan urutan logika ini, sistem menjamin operasi pendinginan MRI tetap berjalan tanpa gangguan meskipun terjadi kerusakan pada salah satu unit.

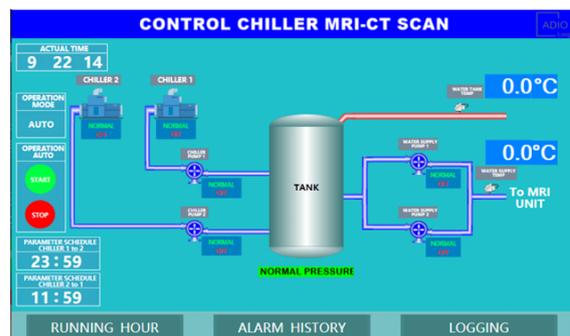
Semua proses dikontrol oleh PLC dan dimonitor melalui *virtual HMI* serta *Mobile UI* secara *real-time*, termasuk *alarm* dan notifikasi jika terjadi kegagalan. Panel kontrol dan sistem kelistrikan yang menghubungkan PLC dengan perangkat sensor serta aktuator di lapangan seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Tampilan *virtual HMI* sistem kontrol *chiller* MRI seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Tampilan ini berfungsi sebagai pusat kendali digital sistem *chiller* MRI, memungkinkan teknisi untuk memantau status setiap komponen, suhu, tekanan, serta merespons *alarm* secara cepat. *Interface* ini mendukung sistem *redundant* dan meningkatkan efisiensi serta keamanan operasional unit MRI secara *real-time*.



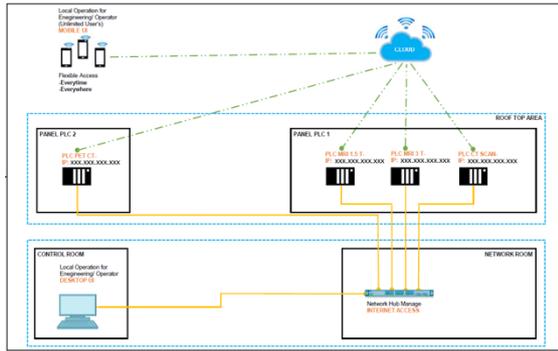
Gambar 3. Diagram alur sistem kontrol otomatis



Gambar 4. (kiri) Desain panel kontrol; (kanan) Aktual sistem panel kontrol terpasang



Gambar 5. Tampilan *dashboard* HMI sistem kontrol *chiller* MRI



Gambar 6. Arsitektur sistem IoT

Arsitektur sistem IoT yang diimplementasikan pada penelitian ini untuk konektivitas data dari PLC ke *mobile UI* dan instruksi kontrol dari *mobile UI* ke PLC seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Arsitektur sistem kontrol redundansi chiller MRI berbasis Internet of Things (IoT) ini dirancang untuk memastikan kestabilan pendinginan magnet superkonduktor pada perangkat MRI yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Sistem ini terdiri dari dua panel PLC Haiwell yang masing-masing mengontrol unit chiller utama dan cadangan, dengan konektivitas ke *cloud* yang disediakan oleh vendor Haiwell. Setiap panel PLC mengirimkan data suhu, status operasi, dan alarm ke sistem *cloud* secara *real-time* melalui jaringan internet, memungkinkan pemantauan jarak jauh oleh operator menggunakan perangkat *mobile* maupun *desktop*. Di sisi lokal, jaringan internal menghubungkan kedua panel ke sebuah Network Hub Manager yang berada di ruang jaringan, yang selanjutnya terhubung ke ruang kontrol tempat operator dapat mengakses data dan melakukan kontrol sistem secara langsung. Integrasi ini memungkinkan otomatisasi dalam pergantian unit *chiller* saat terjadi kegagalan, meningkatkan keandalan sistem pendingin, serta mendukung kegiatan pemeliharaan preventif melalui notifikasi dan data historis yang tersedia secara daring dan lokal. Arsitektur ini memadukan kontrol lokal dan *remote* berbasis *cloud* untuk menciptakan sistem yang responsif, efisien, dan siap menghadapi kegagalan operasional secara otomatis.

Untuk sistem notifikasi *alarm* seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar antarmuka sistem menunjukkan tampilan *Alarm History* berbasis HMI yang berfungsi mencatat dan menampilkan riwayat *alarm* secara *real-time* pada sistem kontrol *chiller* MRI. Dalam tampilan ini, ditunjukkan adanya alarm dengan pesan “fault” bertipe “alert” yang berasal dari variabel A8_PLC.Chiller_1 Trip, dengan waktu konfirmasi tercatat pada 21 Februari 2025 pukul 00:46:35. Antarmuka ini terdiri dari beberapa tab navigasi seperti *Real Time*, *Unconfirm*, *Confirmed*, dan *History*, yang memudahkan operator dalam

memfilter dan melacak status alarm sesuai kategorinya. Selain itu, terdapat tombol navigasi tambahan di bagian bawah seperti *GRAPH PLANT*, *RUNNING HOUR*, dan *LOGGING* yang memungkinkan integrasi pemantauan data historis, jam operasi mesin, serta pencatatan aktivitas sistem, mendukung pelaksanaan pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*). Tampilan ini merupakan bagian integral dari sistem IoT yang dikembangkan untuk meningkatkan visibilitas operasional dan respons terhadap kondisi kritis chiller MRI.

ALARM HISTORY			
Real Time	Unconfirm	Confirmed	History
Message	Type	Variable	Confirm Time
fault	alert	A8_PLC.Chiller_1_Trip	2025-02-21 00:46:35

Gambar 7. Sistem notifikasi alarm

Selanjutnya dilakukan pengujian *black-box* dengan teknik *equivalence partitioning technique* dengan membagi data input menjadi dua bagian, yaitu nilai *valid* atau *invalid*, dan dilakukan pengujian secara terpisah. Kedua bagian tersebut harus menunjukkan perilaku yang sama untuk dinyatakan pengujian berhasil. Jika nilai *valid* maka pengujian berhasil, dan sebaliknya. Pengujian dilakukan pada beberapa variabel *Input/ Output (I/O)* yang penting di dalam sistem kontrol. *Input* disini dapat diartikan sebagai instruksi perintah pada *logic* sistem yang telah dibuat. Sedangkan *output* dapat diartikan sebagai hasil atau efek dari perintah yang diharapkan. Sehingga akan dilakukan proses validasi proses apakah *output* yang terjadi sesuai dengan perintah *input* yang diberikan pada sistem ini. Hasil pengujian *black-box* seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Dari total 11 variabel I/O yang ada semua mendapatkan hasil yang *valid*, sehingga dapat disimpulkan pengujian sistem ini sudah sesuai dengan apa yang diharapkan ketika menggunakan metode ini.

BLACK BOX TESTING					
No.	VARIABLE			RESULT	
	INPUT	PROCESS	OUTPUT	VALID	INVALID
1	Real Time Temperature Supply	EXECUTABLE BY PROGRAM LOGIC	Visual Display for Engineer Monitoring View	√	
2	Real Time Temperature Return		Visual Display for Engineer Monitoring View	√	
3	Manual Start Chiller 1 Button		Chiller 1 ON	√	
4	Manual Start Chiller 2 Button		Chiller 2 ON	√	
5	Manual Start CHWP 1 Button		CHWP 1 ON	√	
6	Manual Start CHWP 2 Button		CHWP 2 ON	√	
7	Manual Start SWP 1 Button		SWP 1 ON	√	
8	Manual Start SWP 2 Button		SWP 2 ON	√	
9	Auto Sequence Start Button		Auto Sequence RUN	√	
10	Auto Sequence Stop Button		Auto Sequence STOP	√	
11	Button Switch Mode		Switch Mode Operation	√	

Gambar 8. Hasil pengujian *black-box* terhadap variabel I/O yang ditentukan

WHITE BOX TESTING					
No.	VARIABLE			RESULT	
	INPUT	PROCESS	OUTPUT	VALID	INVALID
1	Temperature Supply	Analog Input Read Sensor Read Priset Value (PV) $PV \text{ Temp}(V10) = \frac{\text{Real} \rightarrow \text{Max Out} - \text{Min Out}}{\text{Max In} - \text{Min In}} \times (Pv \text{ Real}(A11) - \text{Min In})$	Real Time Visual Display for Engineer Monitoring View 0-100 Derajat Celsius	√	
2	Temperature Return	Analog Input Read Sensor Read Priset Value (PV) $PV \text{ Temp}(V5) = \frac{\text{Real} \rightarrow \text{Max Out} - \text{Min Out}}{\text{Max In} - \text{Min In}} \times (Pv \text{ Real}(A10) - \text{Min In})$	Real Time Visual Display for Engineer Monitoring View 0-100 Derajat Celsius	√	
3	Manual Start Chiller 1 Button	Manual Mode Active (M1500)->Chiller Not Trip (X1) OFF->Press Button Start Chiller 1 (M2)->Button Stop Not Press (M3) OFF-> Trigger to Chiller 1 RUN (M1050) ON	Chiller 1 ON	√	
4	Manual Start Chiller 2 Button	Manual Mode Active (M1500)->Chiller Not Trip (X3) OFF->Press Button Start Chiller 2 (M4)->Button Stop Not Press (M5) OFF-> Trigger to Chiller 2 RUN (M1051) ON	Chiller 2 ON	√	
5	Manual Start CHWP 1 Button	Manual Mode Active (M1500)->CHWP Not Trip (X5) OFF->Press Button Start CHWP 1 (M6)->Button Stop Not Press (M7) OFF-> Trigger to CHWP 1 RUN (M1052) ON	CHWP 1 ON	√	
6	Manual Start CHWP 2 Button	Manual Mode Active (M1500)->CHWP Not Trip (X7) OFF->Press Button Start CHWP 2 (M8)->Button Stop Not Press (M9) OFF-> Trigger to CHWP 2 RUN (M1053) ON	CHWP 2 ON	√	
7	Manual Start SWP 1 Button	Manual Mode Active (M1500)->SWP Not Trip (X9) OFF->Press Button Start SWP 1 (M10)->Button Stop Not Press (M11) OFF-> Trigger to SWP 1 RUN (M1054) ON	SWP 1 ON	√	
8	Manual Start SWP 2 Button	Manual Mode Active (M1500)->SWP Not Trip (X11) OFF->Press Button Start SWP 2 (M12)->Button Stop Not Press (M13) OFF-> Trigger to SWP 2 RUN (M1055) ON	SWP 2 ON	√	
9	Auto Sequence Start & Stop Button	*Pada Gambar 3. 3	Auto Sequence RUN	√	
10	Button Switch Mode	Button Switch Press = Internal Relay (M1500) -M1500 "ON" = AUTO -M1500 "OFF" = MANUAL	Switch Mode Operation	√	

Gambar 9. Hasil pengujian *white-box* terhadap variabel I/O yang ditentukan

Pengujian *white-box* menggunakan teknik *one path* yang akan dilakukan yaitu dengan melihat proses yang terjadi dalam program. Proses ini akan berjalan ketika mendapat perintah *input* dan akan selesai dengan hasil *output*. Ketiga hal ini saling berkaitan, tetapi dalam pengujiannya pada metode ini akan berfokus pada proses *sequence* yang berjalan. Sehingga akan dilakukan proses validasi proses yang berjalan mendapati atau ditemukannya *bug* atau *anomaly sequence*, serta *output* yang

terjadi sesuai dengan perintah *input* yang diberikan pada sistem ini. Hasil pengujian *white-box* seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Dari pengujian menggunakan metode *white-box* penelitian ini mendapatkan hasil yang sesuai yang diharapkan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan metode *white-box* pada pengujian variabel yang ada pada sistem *chiller* MRI ini berhasil.

Survei hasil penelitian dilakukan untuk mendapatkan tingkat kepuasan pengguna. Metode ini diterapkan untuk mengetahui tingkat perubahan atau kesesuaian kebutuhan pengguna terhadap sistem baru. Survei dilakukan terhadap 2 pihak instansi, yaitu: RS XYZ Bali dan rekanan instalasi hardware PT TRV. Tabel 1 menunjukkan pihak yang berhak memberikan jawaban merupakan orang atau badan instansi pengguna atau user dalam sistem *chiller* MRI ini. Terdapat 11 pertanyaan survei, diantaranya: (1) Apakah Anda telah berinteraksi dengan aplikasi pengendalian *chiller* MRI yang baru ini?; (2) Apakah Anda merasa bahwa aplikasi ini telah memudahkan Anda dalam memantau dan mengendalikan kinerja *chiller* MRI?; (3) Sejauh mana Anda merasa bahwa aplikasi ini telah meningkatkan efisiensi dan kinerja *chiller* MRI?; (4) Sejauh mana Anda merasa bahwa aplikasi ini telah meningkatkan efisiensi dan kinerja *chiller* MRI?; (5) Bagaimana kecepatan response dari aplikasi yang baru ini?; (6) Bagaimana Anda menilai antarmuka pengguna (UI) dari aplikasi ini, apakah mudah digunakan dan informatif?; (7) Apakah pemilihan dan penggunaan warna dalam User Interface sudah sesuai?; (8) Dari segi keamanan, apakah aplikasi ini sudah bisa memberikan fitur keamanan yang memadai?; (9) Apakah Anda merasa bahwa Anda telah menerima pelatihan yang memadai untuk menggunakan aplikasi ini?; (10) Bagaimana pendapat Anda tentang kualitas pendinginan yang dihasilkan oleh *chiller* MRI dengan penggunaan aplikasi ini dibandingkan dengan sebelumnya?; (11) Apakah Anda merasa bahwa penggunaan aplikasi ini telah meningkatkan keandalan dan keamanan operasi *chiller* MRI?. Masing-masing pertanyaan mempunyai 5 pilihan skor angka, dimana skor angka 1 = sangat buruk, 2 = buruk, 3 = normal, 4 = baik dan skor angka 5 = sangat baik.

Tabel 1. Daftar Responden dan Jabatan

Total Responden	Jabatan	Instansi
1 orang	Marketing	PT TRV
1 orang	Engineering	PT TRV
1 orang	Engineering	RS XYZ
1 orang	Electrical Staff	RS XYZ

Hasil perhitungan survei seperti ditampilkan pada Tabel 2. Peneliti menghitung hasil kuesioner dengan rumus: $p = (f / N) \times 100\%$, dimana p

adalah persentase nilai yang dievaluasi, **f** adalah total nilai aktual dari seluruh pengguna, **N** adalah skor maksimum yang mungkin dari seluruh pengguna. Hasil dari **p** menunjukkan persentase nilai penilaian pada setiap pertanyaan, dimana kategori **0% – 20%** : Sangat Buruk; **20.01% – 40%** : Buruk; **40.01% – 60%** : Cukup; **60.01% – 80%** : Baik; dan **80.01% – 100%** : Sangat Baik. Dari perhitungan tersebut mendapatkan hasil Sangat Baik dengan perolehan persentase 96.36% dari rata-rata hasil 11 pertanyaan. Hasil ini dapat mengartikan bahwa kepuasan pengguna terhadap sistem yang dibuat.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Akhir Survei

Pertanyaan	Total Skor	Persentase	Kategori
1	20	100.00%	Sangat Baik
2	18	90.00%	Sangat Baik
3	19	95.00%	Sangat Baik
4	19	95.00%	Sangat Baik
5	20	100.00%	Sangat Baik
6	18	90.00%	Sangat Baik
7	19	95.00%	Sangat Baik
8	19	95.00%	Sangat Baik
9	20	100.00%	Sangat Baik
10	20	100.00%	Sangat Baik
11	20	100.00%	Sangat Baik
Average		96.36%	Sangat Baik

Tabel 3. Hasil Evaluasi Teknis Akhir

Deskripsi	Sebelum	Sesudah
Delay perpindahan chiller	>10 menit	<10 menit
Mobilitas akses monitoring dan kontrol yang terbatas	Mengharuskan teknisi ke lokal kontrol	Bisa dilakukan dimanapun, kapanpun
<i>Fault/ chiller</i> yang tidak cepat teratasi	Hanya bisa teratasi secara manual oleh teknisi	Teratasi dengan auto kontrol
Indikasi alarm yang masih sangat terbatas	Indikasi hanya di lokal panel	Indikasi bisa dilihat di <i>virtual HMI</i> dan <i>mobile UI</i>

Berdasarkan hasil implementasi sistem yang telah dikembangkan, evaluasi teknis dilakukan dengan membandingkan kondisi sistem sebelum dan sesudah penerapan solusi yang ditawarkan dalam penelitian ini. Evaluasi ini difokuskan pada empat aspek utama yang menjadi persoalan pada sistem eksisting dan merepresentasikan kinerja serta keefektifan sistem *chiller* dalam mendukung operasi unit MRI, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3. Secara keseluruhan, evaluasi ini menunjukkan bahwa sistem hasil penelitian memberikan perbaikan signifikan dalam aspek kecepatan, fleksibilitas, kontinuitas operasional, dan kemudahan pemantauan sistem, yang secara

teknis meningkatkan keandalan dan efektivitas kontrol pendinginan unit MRI.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem kontrol otomatis berbasis IoT pada *chiller* MRI berhasil mengatasi berbagai kelemahan dari sistem eksisting, terutama dalam hal kecepatan pergantian unit *chiller*, fleksibilitas akses kontrol, serta penyediaan notifikasi dan alarm secara *real-time*. Sistem yang dikembangkan tidak hanya efisien secara teknis, tetapi juga mendapatkan penilaian sangat baik dari sisi pengguna dengan tingkat kepuasan mencapai 96,36%.

Lebih lanjut, jika dibandingkan dengan penelitian Guissi *et al.* [11], yang memanfaatkan sensor getaran dan algoritma *machine learning* (CNN) untuk deteksi dini kerusakan pada pompa *cold head* MRI, fokus utama penelitian tersebut adalah pada aspek prediksi dan pemeliharaan preventif. Sementara itu, penelitian ini lebih menitikberatkan pada peningkatan efisiensi dan kontinuitas operasional melalui sistem kontrol otomatis dan *auto redundancy*. Keduanya saling melengkapi—Guissi lebih menonjolkan sisi prediktif dan deteksi dini, sedangkan penelitian ini mengutamakan tanggapan otomatis saat terjadi gangguan untuk menjaga kelangsungan sistem pendinginan.

Penelitian oleh Elallam dan Hamlich [12] juga relevan karena mengembangkan sistem monitoring jarak jauh berbasis Arduino untuk deteksi kerusakan pada sistem pendingin MRI. Namun, penelitian tersebut menggunakan arsitektur yang lebih sederhana dan metode notifikasi berbasis SMS dan email, sedangkan sistem pada penelitian ini telah terintegrasi dalam satu ekosistem *dashboard* UI dan *virtual HMI*, yang memberikan kemudahan kontrol sekaligus monitoring secara bersamaan dalam satu platform.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi unik berupa sistem kontrol redundan berbasis IoT yang lengkap—meliputi *auto switching*, notifikasi *real-time*, dan kontrol *mobile*—yang sangat sesuai diterapkan dalam lingkungan medis yang memerlukan kestabilan operasional tinggi seperti MRI. Dibandingkan dengan penelitian sejenis lainnya, sistem yang dikembangkan tidak hanya fokus pada satu aspek (monitoring, prediksi, atau kontrol), tetapi mengintegrasikan keseluruhan elemen tersebut dalam satu solusi yang adaptif dan *scalable*.

Keterbatasan dalam penelitian ini diantaranya, skalabilitas sistem tergantung vendor PLC, ketergantungan pada konektivitas internet, fokus hanya pada kontrol dan belum mengarah ke analisa data untuk prediksi kegagalan sistem.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan berhasil secara signifikan mengurangi delay dalam proses pergantian chiller saat terjadi gangguan, sehingga menjaga kelangsungan operasi dan mengurangi potensi lost time pada sistem pendinginan MRI. Sistem ini dilengkapi dengan dua antarmuka kontrol dan monitoring, yaitu *virtual HMI* untuk kontrol lokal dan *dashboard mobile* yang meningkatkan fleksibilitas serta mobilitas teknisi. Selain itu, penerapan kontrol *semi-redundant* dengan *auto sequence* memungkinkan sistem tetap berjalan meskipun terjadi gangguan non-fatal, sehingga mencegah kematian total pada sistem pendinginan, meningkatkan efisiensi energi, dan mengurangi risiko kerusakan serta biaya perawatan. Fitur notifikasi dan antarmuka pengguna *real-time* juga mendukung pengawasan dan kontrol jarak jauh secara praktis, efisien, dan responsif, memberikan kemudahan bagi teknisi dalam menjalankan tugasnya kapan pun dan di mana pun.

Daftar Pustaka

- [1] S. ARAWADE and J. PIECHOWICZ, "Acoustic characterization of the 1.5 Tesla MRI facility in Mobile Imaging Trailer," *Vib. Phys. Syst.*, vol. 34, no. 2, pp. 1–9, 2024, doi: 10.21008/j.0860-6897.2024.2.19.
- [2] R. Kueng *et al.*, "Towards MR-guided electron therapy: Measurement and simulation of clinical electron beams in magnetic fields," *Phys. medica*, vol. 78, pp. 83–92, 2020, doi: 10.1016/j.ejmp.2020.09.001.
- [3] S. Afat *et al.*, "Reducing energy consumption in musculoskeletal MRI using shorter scan protocols, optimized magnet cooling patterns, and deep learning sequences," *Eur. Radiol.*, vol. 35, no. 4, pp. 1993–2004, 2025, doi: 10.1007/s00330-024-11056-0.
- [4] Z. Jiang, M. J. Risbeck, S. C. Kulandai Samy, C. Zhang, S. Cyrus, and Y. M. Lee, "A timeseries supervised learning framework for fault prediction in chiller systems," *Energy Build.*, vol. 285, p. 112876, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112876>.
- [5] D. Zhang *et al.*, "Quench, normal zone propagation velocity, and the development of an active protection scheme for a conduction cooled, react-and-wind, MgB₂ MRI coil segment," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 12, p. 125003, 2019, doi: 10.1002/mrm.28874.
- [6] R. Zaaboul, M. H. E. Y. Alaoui, and S. El Hani, "Vibration monitoring of the MRI Scanner's cold head," in *2020 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICEIT48248.2020.9113192.
- [7] R. Noval and others, "Diagnosis Kegagalan Ganda Pada Chiller Sistem Pendingin Air," *JTTM J. Terap. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 9–16, 2021, doi: 10.37373/jttm.v2i1.83.
- [8] S. Wijaya, H. A. Sudrajat, and R. Arya, "Perancangan Aplikasi Terintegrasi Perangkat Internet of Things (IoT) untuk Pencetakan Label Otomatis," *J. ICT Inf. Commun. & Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 394–399, 2021, doi: 10.36054/jict-ikmi.v20i2.385.
- [9] S. W. Rieger *et al.*, "A temperature-controlled cooling system for accurate quantitative post-mortem MRI," *Magn. Reson. Med.*, vol. 90, no. 6, pp. 2643–2652, Dec. 2023, doi: 10.1002/MRM.29816.
- [10] Y. D. Liao, Z. B. Cai, and Z. S. Fang, "A robust chiller sequencing control method for enhancing cooling supply reliability and energy efficiency," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 609, no. 5, p. 52030, Sep. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/609/5/052030.
- [11] M. Guissi, M. H. E. Y. Alaoui, L. Belarbi, and A. Chaik, "IoT for predictive maintenance of critical medical equipment in a hospital structure," *Inform. Autom. Pomiary w Gospod. i Ochr. Środowiska*, vol. 14, no. 2, pp. 71–76, 2024, doi: 10.35784/iapgos.6057.
- [12] O. Elallam and M. Hamlich, "A new remote monitoring device to track magnetic resonance imaging machine cooling system failures," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 25, no. 1, pp. 298–306, 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v25.i1.pp298-306.
- [13] S. Wijaya, A. Andhika, and M. Ilyas, "Development of Sales Information System for SME with the Waterfall Method: A Grocery Store BSR Case," *J. Tek. Inform.*, vol. 3, no. 4, pp. 1043–1049, 2022, doi: 10.20884/1.jutif.2022.3.4.263.
- [14] O. Loyola-Gonzalez, "Black-box vs. white-box: Understanding their advantages and weaknesses from a practical point of view," *IEEE access*, vol. 7, pp. 154096–154113, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2949286.
- [15] R. Guidotti, A. Monreale, S. Ruggieri, F. Turini, F. Giannotti, and D. Pedreschi, "A survey of methods for explaining black box models," *ACM Comput. Surv.*, vol. 51, no. 5, pp. 1–42, 2018, doi: 10.1145/3236009.