Jurnal Teknologi Industri (JTI)
Vol. 13, No. 2, Agustus 2024, hal. 59 – 68
ISSN: 2302-2191 (Print) 3030-9964 (Online)
https://doi.org/10.35968/jti.v13i2.2259

JTI Open Access

Perancangan Sistem Monitoring Wind Tunnel Berbasis Internet Of Things (IoT)

Muhammad Erri Achkar[1,*], Nurwijayanti KN[2], Effendi Dodi Arisandi[3]
[1,2,3]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Dirgantara dan Industri, Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma, Jakarta, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 17 July 2026
Direvisi: 14 Oktober 2026
Diterima: 29 November 2026

Kata kunci:
Internet of Thing
Monitoring sensor
Wind Tunnel
Human Machine Interface

ABSTRAK

Wind tunnel merupakan instrumen penting dalam kajian aerodinamika yang selama ini pengukurannya di laboratorium pendidikan masih banyak dilakukan secara manual, sehingga kurang efisien dan tidak dapat menyajikan data secara real-time. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun sistem monitoring wind tunnel berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan programmable logic controller (PLC) dan human machine interface (HMI), guna menampilkan data kecepatan angin secara jarak jauh dan meninjau kinerjanya dari aspek response time, kecepatan transfer data, dan akurasi. Metode penelitian meliputi studi literatur, analisis kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi, pengujian, hingga pengambilan dan analisis data kecepatan angin pada berbagai variasi kecepatan blower. Hasil pengujian menunjukkan sistem memiliki waktu tunda rata-rata 0,835 detik dari sepuluh percobaan, kecepatan transfer data rata-rata 1.243,6 Byte/s dari lima percobaan, serta tingkat akurasi rata-rata 98,51% dengan error 1,49% dibandingkan alat ukur referensi pada lima titik uji. Dapat disimpulkan bahwa sistem yang dirancang responsif, andal, dan akurat sehingga layak digunakan sebagai media pemantauan wind tunnel yang efektif menggantikan metode manual konvensional. Penelitian lanjutan disarankan menambahkan sensor suhu dan tekanan, integrasi cloud, data logging otomatis, serta kendali sudut wing berbasis motor servo.

Keywords:
Internet of Thing
Monitoring sensor
Wind Tunnel
Human Machine Interface

Penulis Korespondensi:
Muhammad Erri Achkar
Email:
muhammaderri17@gmail.com

A wind tunnel is an essential instrument in aerodynamic studies, yet measurement practices in educational laboratories still largely rely on manual methods, resulting in low efficiency and the inability to present data in real-time. This study aims to design and develop an Internet of Things (IoT)-based wind tunnel monitoring system integrated with a programmable logic controller (PLC) and human machine interface (HMI) to display wind speed data remotely while evaluating its performance in terms of response time, data transfer rate, and accuracy. The research method encompasses literature review, system requirement analysis, hardware and software design, implementation, testing, and data collection and analysis of wind speed across various blower speed variations. Test results indicate an average delay of 0.835 seconds across ten trials, an average data transfer rate of 1,243.6 Bytes/s across five trials, and an average accuracy of 98.51% with a 1.49% error rate compared to reference measurement instruments across five test points. It is concluded that the designed system is responsive, reliable, and accurate, making it suitable as an effective wind tunnel monitoring medium that can replace conventional manual methods. Further research is recommended to incorporate temperature and pressure sensors, cloud integration, automatic data logging, and servo motor-based wing angle control.

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Wind tunnel merupakan instrumen krusial dalam kajian aerodinamika yang berfungsi menghasilkan aliran udara terkendali guna menganalisis interaksi antara fluida udara dengan objek uji, seperti sayap pesawat, bodi kendaraan, maupun struktur lain yang memerlukan evaluasi gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*) [1]. Melalui pengujian di dalam *test section*, parameter penting seperti kecepatan angin dapat diamati secara terkontrol sehingga perilaku aliran udara terhadap suatu objek dapat dipahami secara komprehensif [2]. Ketepatan hasil pengujian sangat bergantung pada kualitas desain komponen *wind tunnel*, termasuk bagian *contraction* dan *diffuser* yang berperan mengendalikan kecepatan serta meminimalkan turbulensi aliran udara sebelum dan sesudah melewati ruang uji [3].

Meskipun demikian, praktik pengukuran pada *wind tunnel* di lingkungan laboratorium pendidikan umumnya masih mengandalkan metode manual, yakni pencatatan data dilakukan secara langsung oleh operator menggunakan alat ukur konvensional. Pendekatan tersebut menimbulkan sejumlah kendala signifikan, antara lain rendahnya efisiensi waktu pengambilan data, potensi kesalahan pencatatan akibat keterbatasan ketelitian manusia, serta ketidakmampuan sistem untuk menyajikan data secara *real-time* dari lokasi yang berjauhan dengan objek uji. Kondisi ini pada gilirannya berdampak pada menurunnya tingkat akurasi dan efektivitas proses penelitian maupun pembelajaran aerodinamika secara keseluruhan.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) menghadirkan solusi atas keterbatasan tersebut dengan memungkinkan berbagai perangkat fisik saling terhubung dan bertukar data secara otomatis tanpa memerlukan intervensi manusia secara langsung melalui jaringan internet [3]. Penerapan IoT pada sistem pemantauan telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi, keandalan, serta keamanan pada berbagai sektor, mulai dari rumah tangga hingga industri, sebagaimana ditunjukkan pada implementasi sistem kompor gas otomatis berbasis sensor yang mampu mengirimkan data kondisi perangkat secara nirkabel kepada pengguna [4]. Kemampuan serupa turut relevan diterapkan pada pengelolaan sistem energi dan monitoring berbasis data guna mengoptimalkan efisiensi operasional pada skala yang lebih luas [5]. Prinsip integrasi sensor, unit pengendali berupa *programmable logic controller* (PLC), dan *human machine interface* (HMI) yang terhubung dengan jaringan internet berpotensi diadaptasi untuk membangun sistem pemantauan *wind tunnel* yang responsif dan dapat diakses secara jarak jauh, sehingga proses pengujian aerodinamika dapat berlangsung lebih efisien serta minim kesalahan pencatatan manual [6].

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, permasalahan penelitian ini dirumuskan ke dalam empat pertanyaan utama, yaitu bagaimana merancang sistem monitoring *wind tunnel* yang responsif dengan waktu tunda (*delay*) rendah dalam menampilkan data sensor pada *HMI*; bagaimana kecepatan transfer data dapat merepresentasikan kemampuan sistem dalam mengirimkan data sensor dari perangkat kontrol menuju *HMI*; sejauh mana tingkat akurasi data sensor yang ditampilkan pada *HMI* apabila dibandingkan dengan data hasil pengukuran alat referensi; serta bagaimana kinerja keseluruhan sistem monitoring *wind tunnel* ditinjau dari aspek *response time*, kecepatan transfer data, dan akurasi, sehingga sistem tersebut layak difungsikan sebagai media pemantauan yang efektif.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem *wind tunnel* berbasis *Internet of Things* yang terintegrasi dengan unit kendali PLC; memasang sensor kecepatan angin sebagai instrumen pengukuran parameter udara pada *wind tunnel*; serta mengembangkan sistem pengawasan berbasis jaringan internet yang mampu menampilkan data hasil pengukuran secara *real-time* melalui platform IoT, sekaligus mengevaluasi kinerjanya dari aspek waktu respons, kecepatan transfer data, dan tingkat akurasi pembacaan sensor.

Secara teoretis, penelitian ini diharapkan memperkaya khazanah keilmuan di bidang integrasi teknologi IoT dengan sistem instrumentasi aerodinamika, khususnya dalam konteks otomasi pemantauan *wind tunnel* menggunakan kombinasi PLC, sensor kecepatan angin, dan HMI. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi institusi pendidikan maupun laboratorium riset dalam mengembangkan media pembelajaran dan pengujian aerodinamika yang lebih efisien, akurat, dan dapat diakses secara jarak jauh, sehingga turut mendukung peningkatan kualitas proses penelitian serta pengambilan keputusan berbasis data secara *real-time* pada bidang rekayasa kedirgantaraan dan teknik terkait.

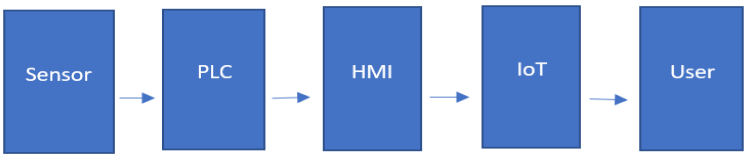
II. METODE PENELITIAN

2.1 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Aerodinamika dengan menerapkan tahapan yang sistematis dan terstruktur guna memastikan sistem monitoring yang dirancang dapat berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Tahap awal penelitian diawali dengan studi literatur, yaitu proses pengumpulan referensi dari buku, jurnal, dan sumber ilmiah terkait konsep *wind tunnel*, *Internet of Things* (IoT), *programmable logic controller* (PLC), *human machine interface* (HMI), serta prinsip kerja sensor kecepatan angin. Tahap ini bertujuan membangun landasan teoretis yang memadai sebelum memasuki proses perancangan, mengingat pemahaman mendalam terhadap karakteristik aliran udara dan performa instrumen ukur menjadi prasyarat penting dalam pengembangan sistem pemantauan berbasis sensor [7].

Tahap berikutnya adalah analisis kebutuhan sistem, yang bertujuan menentukan spesifikasi teknis yang diperlukan dalam pembangunan sistem, mencakup penentuan parameter yang akan diukur berupa kecepatan angin, jenis sensor yang digunakan, unit kendali berbasis PLC sebagai pengendali utama, HMI sebagai media pemantauan lokal, serta integrasi platform IoT untuk pemantauan jarak jauh. Hasil analisis kebutuhan tersebut selanjutnya diimplementasikan pada tahap perancangan sistem, yang terdiri atas tiga bagian utama, yaitu perancangan diagram blok, perancangan perangkat keras, dan perancangan perangkat lunak.

Perancangan diagram blok menggambarkan hubungan fungsional antarkomponen sistem secara menyeluruh, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1. Perancangan perangkat keras meliputi penggunaan *PLC AT16S0R* sebagai unit kendali utama, sensor kecepatan angin *Renatta* dengan keluaran *RS485*, *HMI* berukuran 7 *inch* sebagai antarmuka tampilan, serta *blower* sebagai sumber aliran udara. Adapun perancangan perangkat lunak mencakup pemrograman PLC menggunakan *ladder diagram*, konfigurasi tampilan pada HMI, dan proses integrasi sistem dengan platform IoT, yang selaras dengan pendekatan integrasi PLC–HMI pada sistem kendali otomatis industri



Gambar 1 Diagram Blok Perancangan Sistem

Tabel 1 Spesifikasi Perangkat pada Sistem Monitoring *Wind Tunnel*

No.	Komponen	Fungsi dalam Sistem
1	*PLC AT16S0R*	Unit kendali utama pemrosesan data sensor
2	Sensor Kecepatan Angin *Renatta RS485*	Mengukur kecepatan aliran udara
3	*HMI 7 Inch Renatta IoT Cloud B Series*	Menampilkan data secara lokal dan *real-time*
4	Platform *IoT*	Media pemantauan data jarak jauh melalui jaringan internet
5	*Blower*	Sumber aliran udara pada ruang uji

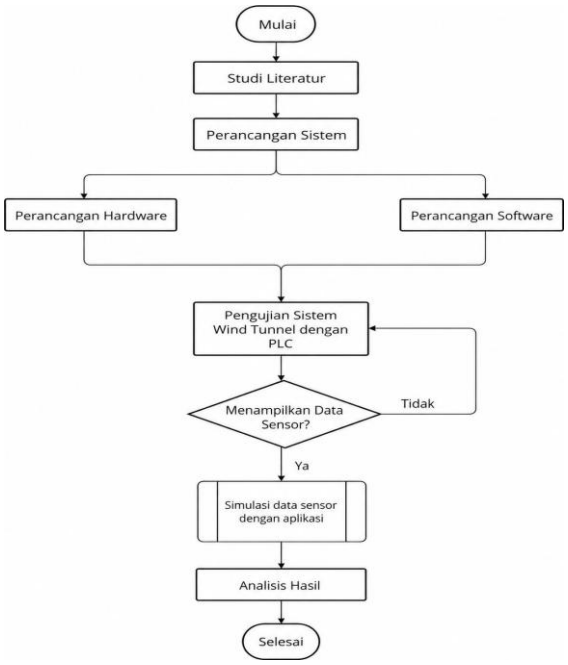
Tabel 1 menyajikan komponen utama perangkat keras yang digunakan dalam perancangan sistem, meliputi unit kendali, sensor pengukuran, media tampilan, serta sumber aliran udara yang saling terintegrasi untuk membentuk satu kesatuan sistem pemantauan.

Setelah tahap perancangan selesai, penelitian dilanjutkan dengan implementasi sistem yang meliputi perakitan seluruh komponen, sambungan sistem, unggah program ke PLC, serta konfigurasi komunikasi antara PLC, HMI, dan platform IoT. Konfigurasi komunikasi antar perangkat tersebut merujuk pada prinsip integrasi human *machine interface* pada sistem kendali panel otomatis yang telah diterapkan pada berbagai konteks industri [8]. Selanjutnya, dilakukan pengujian sistem yang mencakup uji fungsi sensor, uji komunikasi antara PLC dan HMI, uji konektivitas sistem IoT, serta uji kinerja keseluruhan sistem *wind tunnel* untuk memastikan seluruh subsistem bekerja secara terintegrasi, sebagaimana prinsip pengujian sistem berbasis sensor dan pengendali otomatis pada penerapan IoT industri lainnya [9].

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini berupa nilai kecepatan angin yang diperoleh pada beberapa variasi kecepatan blower. Data tersebut selanjutnya dianalisis untuk mengetahui mekanisme kerja sistem secara keseluruhan, membandingkan hasil pengukuran dengan kajian teoretis yang relevan, serta menentukan tingkat akurasi sistem *monitoring* yang dikembangkan.

2.2 Diagram Alir Penelitian

Guna memvisualisasikan tahapan, titik keputusan, serta urutan proses penelitian secara sistematis, disusun diagram alir (*flowchart*) penelitian sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Diagram tersebut menggambarkan alur penelitian mulai dari studi literatur, analisis kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, implementasi, pengujian, hingga tahap analisis data dan penarikan kesimpulan.



Gambar 2 Diagram Alir (Flowchart) Penelitian

2.3 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini disusun secara bertahap melalui delapan tahapan utama, yang secara ringkas disajikan pada Tabel 2. Penelitian ini dilaksanakan secara berurutan mulai dari tahap kajian teori hingga penyusunan laporan akhir, dengan penekanan pada validasi teknis sistem melalui pengujian bertahap sebelum data hasil pengukuran dianalisis secara menyeluruh.

Tabel 2 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

No.	Tahapan	Deskripsi Singkat
1	Studi Literatur	Pengumpulan referensi teori pendukung
2	Analisis Kebutuhan Sistem	Penentuan parameter dan komponen sistem
3	Perancangan Sistem	Diagram blok, perangkat keras, perangkat lunak
4	Implementasi Sistem	Perakitan, pengkabelan, pemrograman
5	Pengujian Sistem	Uji sensor, komunikasi, dan sistem IoT
6	Pengambilan Data	Pengukuran kecepatan angin pada berbagai variasi
7	Analisis Data	Perbandingan hasil dengan teori dan akurasi sistem
8	Penyusunan Laporan	Dokumentasi hasil penelitian

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Hasil Pengujian Delay Response Time

Pengujian *delay response time* dilakukan untuk mengetahui rentang waktu yang dibutuhkan sistem sejak sensor kecepatan angin mendeteksi perubahan nilai hingga data tersebut berhasil ditampilkan pada layar *HMI*. Pengukuran dilakukan sebanyak sepuluh kali percobaan menggunakan

stopwatch sebagai instrumen pencatat waktu, sesuai dengan prosedur pengujian yang telah ditetapkan pada tahap perancangan sistem.

Tabel 3 Hasil Pengujian *Delay Response Time*

No.	Waktu Mulai (s)	Waktu Tampil HMI (s)	*Delay* (s)
1	0,00	0,85	0,85
2	0,00	0,82	0,82
3	0,00	0,88	0,88
4	0,00	0,81	0,81
5	0,00	0,84	0,84
6	0,00	0,83	0,83
7	0,00	0,86	0,86
8	0,00	0,80	0,80
9	0,00	0,82	0,82
10	0,00	0,84	0,84

Tabel 3 menyajikan hasil sepuluh kali pengujian *delay response time* pada sistem monitoring *wind tunnel*. Berdasarkan hasil perhitungan nilai rata-rata dari kesepuluh data tersebut, diperoleh waktu tunda (*delay*) rata-rata sebesar 0,835 detik. Nilai tersebut menunjukkan bahwa keseluruhan proses, mulai dari pembacaan sensor hingga tampilan data pada *HMI*, berlangsung dalam rentang waktu kurang dari satu detik pada setiap pengujian.

3.2 Hasil Pengujian Kecepatan Transfer Data

Pengujian kecepatan transfer data dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengirimkan data sensor kecepatan angin dari *PLC AT16S0R* menuju *HMI Renatta IoT Cloud B Series*. Kecepatan transfer dihitung berdasarkan perbandingan antara jumlah data yang dikirim dengan waktu yang dibutuhkan untuk proses pengiriman tersebut.

Tabel 4 Hasil Pengujian Kecepatan Transfer Data

No.	Data (Byte)	Waktu (s)	*Transfer Rate* (Byte/s)
1	1000	0,80	1250
2	1000	0,79	1265
3	1000	0,81	1234
4	1000	0,82	1219
5	1000	0,80	1250

Tabel 4 memperlihatkan hasil lima kali pengujian kecepatan transfer data antara unit kendali dan unit tampilan. Dari kelima percobaan tersebut, diperoleh nilai kecepatan transfer data rata-rata sebesar 1.243,6 *Byte*/s, dengan variasi nilai berkisar antara 1.219 hingga 1.265 *Byte*/s pada setiap pengujian.

3.3 Hasil Pengujian Akurasi dan Efisiensi Sistem Monitoring

Pengujian akurasi dilakukan dengan membandingkan data kecepatan angin yang ditampilkan pada *HMI*/*LCD* dengan data hasil pengukuran alat ukur referensi pada lima titik kecepatan angin yang berbeda. Tampilan hasil pengukuran pada layar *LCD* sistem monitoring dapat dilihat pada Gambar 3.



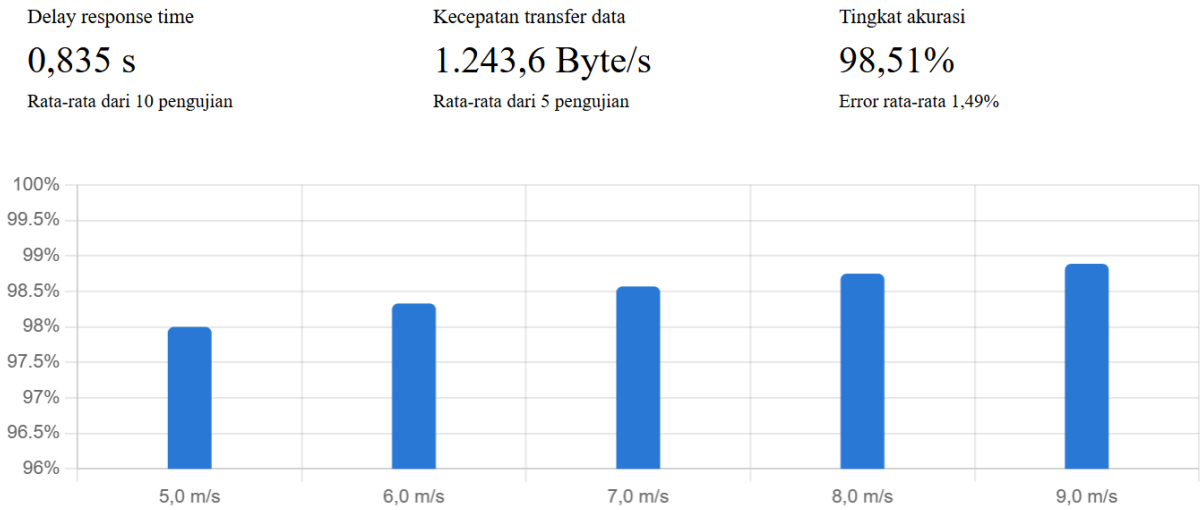
Gambar 3 Tampilan layar *LCD* yang menunjukkan hasil pembacaan kecepatan angin secara *real-time*

Tabel 5 Hasil Pengujian Akurasi dan Persentase Error

No.	Data Referensi (m/s)	Data HMI/LCD (m/s)	Error (%)	Akurasi (%)
1	5,0	4,9	2,00	98,00
2	6,0	5,9	1,67	98,33
3	7,0	6,9	1,43	98,57
4	8,0	7,9	1,25	98,75
5	9,0	8,9	1,11	98,89

Tabel 5 menyajikan hasil pengujian tingkat akurasi dan persentase *error* pembacaan kecepatan angin antara alat ukur standar dan tampilan layar *HMI* pada lima titik percobaan yang berbeda. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh rata-rata tingkat akurasi sistem sebesar 98,51% dengan rata-rata persentase *error* sebesar 1,49%.

Sebagai rangkuman keseluruhan hasil pengujian, ketiga aspek kinerja sistem *response time*, kecepatan transfer data, dan akurasi disajikan secara ringkas pada Gambar 4 untuk memperlihatkan perbandingan capaian kinerja sistem secara visual.



Gambar 4 Perbandingan tiga indikator kinerja utama sistem monitoring *wind tunnel*, yaitu *delay response time* (0,835 detik), kecepatan transfer data (1.243,6 *Byte*/s), dan tingkat akurasi (98,51%).

Selain data kuantitatif yang telah disajikan pada Tabel 3, 4, dan 5, dokumentasi visual terhadap perangkat keras dan tampilan sistem turut dikumpulkan untuk memperkuat validitas hasil pengujian. Konfigurasi perangkat keras yang digunakan selama proses pengujian *delay response time*, kecepatan transfer data, dan akurasi ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5: Konfigurasi PLC AT16S0R dan Sensor Kecepatan Angin Renatta RS485

Gambar 5 memperlihatkan susunan fisik unit kendali *PLC AT16S0R* yang terhubung dengan sensor kecepatan angin *Renatta RS485*, sebagaimana digunakan pada seluruh rangkaian pengujian sistem monitoring *wind tunnel*.

Selanjutnya, tampilan antarmuka *HMI 7 Inch Renatta IoT Cloud B Series* saat proses pengujian *delay response time* berlangsung ditunjukkan pada Gambar 6, guna memperjelas bagaimana data kecepatan angin disajikan secara visual kepada pengguna.



Gambar 6: Tampilan HMI 7 Inch Renatta IoT Cloud B Series saat Pengujian Delay Response Time

Gambar 6 menyajikan antarmuka *HMI* yang menampilkan nilai kecepatan angin secara *real-time* beserta indikator waktu pembacaan, yang menjadi acuan visual dalam pencatatan nilai *delay* pada Tabel 3. Kedua dokumentasi visual tersebut memperkuat bukti empiris bahwa integrasi perangkat keras dan antarmuka tampilan pada sistem yang dirancang berjalan sebagaimana mestinya, sejalan dengan data numerik yang telah dipaparkan sebelumnya.

3.4 Perancangan Sistem Monitoring yang Responsif dengan *Delay* Rendah

Merujuk pada hasil pengujian delay response time yang menunjukkan rata-rata waktu tunda sebesar 0,835 detik, dapat dinyatakan bahwa sistem monitoring wind tunnel yang dirancang telah berhasil menjawab rumusan masalah pertama, yaitu bagaimana membangun sistem yang responsif dalam menampilkan data sensor pada HMI. Rendahnya nilai delay tersebut merupakan hasil dari integrasi yang efisien antara sensor kecepatan angin, unit kendali PLC, dan media tampilan HMI, di mana proses akuisisi data hingga penyajian informasi berlangsung hampir seketika. Kemampuan sistem untuk merespons perubahan kondisi aliran udara dalam waktu kurang dari satu detik sejalan dengan prinsip konektivitas Internet of Things yang memungkinkan berbagai perangkat fisik saling bertukar data secara otomatis tanpa keterlibatan manusia secara langsung, sehingga proses pemantauan dapat berlangsung secara real-time [10]. Selain itu, tingkat responsivitas ini juga mencerminkan keandalan arsitektur sistem yang serupa dengan penerapan IoT pada sistem otomasi [11]. berbasis sensor lainnya, yang mampu mendeteksi dan menampilkan perubahan kondisi secara cepat guna mendukung pengambilan keputusan yang tepat waktu [12]. Dengan demikian, sistem yang dirancang telah memenuhi kriteria responsivitas yang diharapkan untuk aplikasi pemantauan wind tunnel secara real-time.

Apabila dibandingkan dengan penelitian sejenis, nilai delay rata-rata 0,835 detik yang diperoleh dalam penelitian ini tergolong kompetitif. Sebuah studi terbaru mengenai sistem pemantauan ketinggian muatan berbasis IoT yang mengintegrasikan PLC dan HMI melalui komunikasi cloud berbasis MQTT melaporkan rentang latensi antara 0,66 hingga 1,58 detik pada berbagai kondisi jaringan Nilai delay pada penelitian ini berada dalam rentang tersebut, bahkan cenderung berada pada sisi yang lebih responsif, sehingga dapat dikatakan bahwa arsitektur integrasi PLC–HMI yang diterapkan pada sistem monitoring wind tunnel ini telah mencapai tingkat responsivitas yang sebanding dengan implementasi IoT industri sejenis pada domain aplikasi yang berbeda. Kesesuaian ini juga mengindikasikan bahwa pendekatan komunikasi langsung antara PLC dan HMI tanpa lapisan protokol tambahan yang kompleks dapat menghasilkan waktu tanggap yang lebih ringkas dibandingkan sistem yang melibatkan lapisan middleware cloud tambahan.

3.5 Kecepatan Transfer Data sebagai Representasi Kemampuan Pengiriman Data Sensor

Hasil pengujian kecepatan transfer data yang menunjukkan nilai rata-rata sebesar 1.243,6 Byte/s menjawab rumusan masalah kedua terkait representasi kemampuan sistem dalam mengirimkan data sensor dari perangkat kontrol menuju HMI. Nilai transfer rate tersebut tergolong memadai mengingat ukuran data sensor kecepatan angin yang dikirimkan relatif kecil, sehingga tidak membutuhkan kapasitas bandwidth yang besar untuk mendukung proses pemantauan secara berkelanjutan. Kestabilan nilai transfer rate pada kelima pengujian, dengan variasi yang tidak signifikan antara 1.219 hingga 1.265 Byte/s, turut mengindikasikan bahwa jalur komunikasi antara PLC dan HMI berjalan secara konsisten tanpa hambatan berarti. Kondisi ini relevan dengan prinsip efisiensi komunikasi data pada sistem manajemen berbasis IoT, di mana kestabilan transfer data berperan penting dalam mendukung analisis dan pengambilan keputusan secara akurat pada sistem monitoring skala kecil hingga menengah [13]. Dengan kecepatan transfer yang stabil dan memadai tersebut, sistem monitoring wind tunnel mampu menyajikan data secara berkesinambungan tanpa mengalami keterlambatan signifikan yang dapat mengganggu proses pemantauan.

Stabilitas kecepatan transfer data yang diperoleh dalam penelitian ini turut didukung oleh prinsip perancangan arsitektur IoT-PLC yang efisien. Sebuah kajian mengenai pengembangan PLC berbasis kontainer untuk kebutuhan Industri 4.0 menegaskan bahwa arsitektur komunikasi data antara unit kendali dan platform IoT yang dirancang secara ringkas dan minim lapisan pemrosesan tambahan mampu menghasilkan pertukaran data yang lebih stabil dan efisien dibandingkan arsitektur konvensional yang lebih kompleks [14]. Prinsip tersebut relevan dengan capaian kecepatan transfer data pada penelitian ini, di mana proses pengiriman data dari PLC AT16S0R menuju HMI dilakukan secara langsung tanpa perantara sistem yang rumit, sehingga variasi kecepatan transfer antarpengujian tetap berada pada rentang yang sempit dan dapat diandalkan untuk mendukung pemantauan wind tunnel secara berkelanjutan.

3.6 Tingkat Akurasi Data Sensor pada HMI Dibandingkan dengan Alat Ukur Referensi

Untuk menjawab rumusan masalah ketiga terkait tingkat akurasi data sensor, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem monitoring memiliki rata-rata tingkat akurasi sebesar 98,51% dengan rata-rata *error* sebesar 1,49% apabila dibandingkan dengan data hasil pengukuran alat ukur referensi. Tingkat akurasi yang tinggi tersebut menunjukkan bahwa data yang ditampilkan pada *HMI* memiliki kesesuaian yang sangat baik dengan kondisi aliran udara yang sebenarnya di dalam *test section* wind tunnel. Capaian akurasi ini turut dipengaruhi oleh kualitas desain aliran udara pada sistem *wind tunnel*, di mana keseragaman aliran dan minimnya turbulensi menjadi faktor penentu ketepatan hasil pengukuran kecepatan angin [14]. Selain itu, desain komponen seperti *contraction* dan *diffuser* yang berfungsi menstabilkan aliran udara sebelum dan sesudah melewati ruang uji turut berkontribusi terhadap konsistensi pembacaan sensor pada berbagai titik kecepatan yang diuji [14]. Tingginya tingkat akurasi ini juga sejalan dengan prinsip penerapan *human machine interface* pada sistem kendali otomatis industri, di mana keandalan tampilan data pada HMI sangat bergantung pada ketepatan sinkronisasi antara sensor dan unit pemrosesan data [15]. Dengan tingkat *error* yang berada di bawah 2% pada seluruh titik pengujian, sistem monitoring yang dirancang dapat dikategorikan memiliki keandalan pengukuran yang tinggi untuk mendukung aktivitas penelitian aerodinamika.

Untuk memperkuat interpretasi terhadap capaian akurasi sistem, hasil penelitian ini turut dibandingkan dengan studi penerapan sistem monitoring berbasis PLC dan IoT pada domain pengukuran lingkungan. Sebuah penelitian mengenai sistem pemantauan kualitas air berbasis PLC dan IoT pada instalasi pengolahan air melaporkan margin *error* pengukuran yang sangat kecil, yaitu berkisar antara 0,1 hingga 0,2 pada berbagai parameter yang diukur, dengan memanfaatkan arsitektur kendali berbasis PLC yang serupa dengan pendekatan yang digunakan pada penelitian ini [15]. Kesesuaian pola tersebut memperkuat argumen bahwa penggunaan PLC sebagai unit pemrosesan utama dalam sistem monitoring berbasis sensor secara konsisten menghasilkan tingkat presisi pengukuran yang tinggi, sebagaimana juga tercermin pada rata-rata *error* sebesar 1,49% pada sistem monitoring *wind tunnel* yang dikembangkan dalam penelitian ini. Dengan demikian, tingkat akurasi yang diperoleh bukan merupakan capaian yang berdiri sendiri, melainkan konsisten dengan karakteristik umum sistem berbasis PLC yang telah terverifikasi pada berbagai domain penerapan IoT industri maupun lingkungan.

3.7 Kinerja Keseluruhan Sistem sebagai Media Pemantauan yang Efektif

Secara keseluruhan, hasil pengujian terhadap tiga aspek utama response time, kecepatan transfer data, dan akurasi menunjukkan bahwa sistem monitoring wind tunnel berbasis Internet of Things yang dikembangkan telah memenuhi kriteria kinerja yang diharapkan untuk berfungsi sebagai media pemantauan yang efektif, sekaligus menjawab rumusan masalah keempat. Kombinasi antara waktu tunda yang rendah (0,835 detik), kecepatan transfer data yang stabil (1.243,6 Byte/s), dan tingkat akurasi yang tinggi (98,51%) mengindikasikan bahwa sistem mampu menghadirkan pemantauan kondisi aliran udara secara real-time, andal, dan presisi. Ketiga indikator tersebut saling melengkapi dalam menentukan kelayakan suatu sistem monitoring berbasis sensor, sebagaimana ditegaskan dalam kajian mengenai peran krusial pengujian aerodinamika dalam mengevaluasi karakteristik aliran udara dan gaya yang bekerja pada objek uji [10]. Dengan demikian, sistem yang dirancang dalam penelitian ini tidak hanya berhasil menggantikan metode pengukuran manual yang selama ini digunakan pada wind tunnel konvensional, tetapi juga menghadirkan solusi pemantauan berbasis IoT yang lebih efisien, akurat, dan dapat diakses secara jarak jauh, sehingga berpotensi mendukung peningkatan kualitas proses penelitian dan pembelajaran di bidang aerodinamika secara berkelanjutan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang telah diuraikan, dapat disimpulkan bahwa sistem monitoring wind tunnel berbasis Internet of Things (IoT) yang dirancang berhasil menjawab keempat rumusan masalah penelitian secara komprehensif. Sistem terbukti responsif dengan waktu tunda (delay) rata-rata sebesar 0,835 detik dalam menampilkan data sensor pada HMI, mampu mengirimkan data sensor dari PLC menuju HMI dengan kecepatan transfer rata-rata 1.243,6 Byte/s yang stabil dan memadai untuk kebutuhan pemantauan berkelanjutan, serta memiliki tingkat akurasi pembacaan yang tinggi sebesar 98,51% dengan rata-rata error hanya 1,49% dibandingkan alat ukur referensi. Kombinasi ketiga indikator kinerja tersebut menegaskan bahwa sistem layak difungsikan sebagai media pemantauan wind tunnel yang efektif, andal, dan mampu menggantikan metode pengukuran manual konvensional dengan solusi berbasis IoT yang lebih efisien serta dapat diakses secara jarak jauh. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan agar sistem dilengkapi dengan sensor tambahan seperti suhu, kelembapan, dan tekanan udara guna memperoleh parameter pengujian yang lebih lengkap; dikembangkan mekanisme penyimpanan berbasis cloud agar data pengujian dapat diakses secara jarak jauh dan tersimpan secara aman; ditambahkan fitur data logging otomatis untuk mempermudah proses analisis dan dokumentasi; dikembangkan sistem kendali sudut wing menggunakan motor servo agar pengujian aerodinamika dapat dilakukan secara lebih presisi dan otomatis; serta dilakukan pengujian pada rentang kecepatan angin dan kondisi operasional yang lebih luas untuk memperoleh gambaran kinerja sistem yang lebih menyeluruh dan representatif.

DAFTAR PUSTAKA

[[1] Aditya, V., Alchalil, A., Asnawi, A., & Rahman, A. (2023). Analisa Indikator Kinerja Terowongan Angin Rangkaian Terbuka (Open Circuit Wind Tunnel) Tipe Subsonic. *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology*, *7*(2), 120–127.

[2] Akbar, A. A., Stefanie, A., & Wahyudi, N. (2022). Implementasi Human Machine Interface Untuk Panel Motor Control Center Perusahaan Kelapa Sawit Di Pt. Solusi Indosistem Otomat. *Jurnal TEKTRIKA*, *7*(7), 42–49.

[3] Aliero, M. S., Qureshi, K. N., Pasha, M. F., & Jeon, G. (2021). Smart Home Energy Management Systems in Internet of Things networks for green cities demands and services. *Environmental Technology & Innovation*, *22*, 101443.

[4] Barlow, J. B., & Rae, W. H. (2020). Low-speed wind tunnel testing. *John Wiley & Sons*.

[5] Bell, J. H., & Mehta, R. D. (2020). Wind tunnel design and flow quality. *Progress in Aerospace Sciences*.

[6] Forhad, H. M., Uddin, M. R., Chakrovorty, R. S., Ruhul, A. M., Faruk, H. M., Kamruzzaman, S., Sharmin, N., Jamal, A. S. I. M., Haque, M. M. U., & Morshed, A. M. (2024). IoT based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs). *Heliyon*, *10*(23), e40746. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40746

[7] Hafidz, F. S., Al-ghifari, M. M., & Noor, R. A. M. (2025). DESIGN AND DEVELOPMENT MEDIA MINI WIND TUNNEL. *MOTOR: Journal of Automotive Engineering*, *3*(1).

[8] Hendrawati, D., Hakim, E. A., Dionova, B. W., Sulistyo, A. K., & Abdullah, M. I. (2025). IoT enabled real time load height monitoring and control system using PLC and HMI for smart industrial. *Journal of Applied Engineering and Technological Science (JAETS)*, *6*(2), 1085–1100.

[9] Hugeng, H., Sulaiman, S., & Nurwijayanti, K. N. (2020). Implementation of an automatic secured gas stove using internet-of-things technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1007*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/1007/1/012195

[10] Katz, J., & Plotkin, A. (2022). Low-speed aerodynamics. *Cambridge University Press*.

[11] Khodwe, A. R., Mahindre, Y. A., & Kumbharkhane, S. D. (2021). Mini wind tunnel testing. *International Journal of Advance Scientific Research and Engineering Trends*.

[12] Mehta, R. D., & Bradshaw, P. (2021). Design rules for small low-speed wind tunnels. *The Aeronautical Journal*.

[13] Mellado, J., & Núñez, F. (2022). Design of an IoT-PLC: A containerized programmable logical controller for the industry 4.0. *Journal of Industrial Information Integration*, *25*, 100250.

[14] Nurwijayanti, K. N., Asnawi, R., Rosadi, I., & Jati, H. (2025). Low Carbon Electricity Energy Management Analysis and KWH Usage Using Six Sigma Method. *2025 International Conference on Converging Technology in Electrical and Information Engineering (ICCTEIE)*, 7–11.

[15] Pradipta, I. P. W., & Sutrisna, I. P. O. (2025). Penerapan Sistem Integrated On-Off Hp Compressor 4 Berbasis PLC-HMI Untuk Efisiensi Energi. *Jurnal Penelitian Ilmiah Multidisipliner*, *2*(01), 2029–2038. https://ojs.ruangpublikasi.com/index.php/jpim/article/view/1079