

Evaluasi Kesesuaian Pengukuran Sistem Monitoring Suhu Berbasis ESP32 dan Firebase pada Cold Storage Industri

Faizin Adi Nugorho^{1*)}, Mohammad Rizki Febrian², Yaser Krisnafi³, Onie Meiyanto⁴, Citra Zaskia Pratiwi⁵, Izhary Siregar⁶

^{1,2,3,4,5,6}Program Studi Mekanisasi Perikanan, Politeknik Kelautan dan Perikanan Sidoarjo, Sedati, Kabupaten Sidoarjo, Indonesia, 61253

*Penulis Korespondensi, Email : faiznugroho2025@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi kesesuaian pembacaan suhu pada prototipe monitoring berbasis Internet of Things (IoT) yang menggunakan sensor DS18B20, ESP32, dan Firebase Realtime Database pada cold storage industri. Evaluasi kuantitatif difokuskan pada data yang tersedia, yaitu 300 observasi suhu dan komparasi terhadap Eliwell ID Plus 974 menggunakan analisis Bland-Altman. Rata-rata suhu yang tercatat sebesar $-17,260\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan standar deviasi temporal $0,176\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan deviasi rata-rata $0,147\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ringkasan tekstual melaporkan bias $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan standar deviasi selisih $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang menghasilkan 95% limits of agreement sekitar $-0,30$ hingga $0,40\text{ }^{\circ}\text{C}$; namun legend grafik Bland-Altman menampilkan nilai LoA yang berbeda sehingga angka agreement perlu diverifikasi ulang dari raw paired data. Status kalibrasi dan ketidakpastian sistem Eliwell juga tidak tersedia. Fungsi pengiriman dan penyimpanan data ke Firebase teramati secara operasional, tetapi end-to-end latency, packet/data loss, uptime, dan recovery setelah gangguan jaringan atau daya belum diukur. Dengan bukti saat ini, prototipe diposisikan sebagai sistem monitoring tambahan dan pencatatan jarak jauh yang masih memerlukan validasi metrologi, telemetry, dan uji ketahanan jangka panjang sebelum deployment industri dapat dinyatakan.

Kata Kunci: cold storage, DS18B20, ESP32, Firebase Realtime Database, Bland-Altman, Internet of Things.

ABSTRACT

This study evaluates the measurement agreement of an Internet of Things (IoT)-based temperature monitoring prototype using a DS18B20 sensor, an ESP32, and Firebase Realtime Database in an industrial cold-storage environment. The available evidence comprises 300 temperature observations and a Bland-Altman comparison against an Eliwell ID Plus 974. The recorded mean temperature was $-17.260\text{ }^{\circ}\text{C}$, with a temporal standard deviation of $0.176\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a reported average deviation of $0.147\text{ }^{\circ}\text{C}$. The textual summary reports a bias of $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a difference standard deviation of $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$, yielding calculated 95% limits of agreement of approximately -0.30 to $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$; however, the Bland-Altman plot legend shows different limits, so the agreement statistics require verification from the raw paired data. The calibration status and uncertainty of the installed Eliwell system were also unavailable. Data transmission and storage to Firebase were functionally observed, whereas end-to-end latency, packet/data loss, uptime, and recovery after network or power interruptions were not measured. The prototype is therefore positioned as a supplementary remote monitoring and data-logging system that still requires metrological, telemetry, and long-duration robustness validation before industrial deployment can be claimed.

Keywords: cold storage, DS18B20, ESP32, Firebase Realtime Database, Bland-Altman, Internet of Things.

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



1. PENDAHULUAN

Cold storage merupakan bagian penting dari rantai dingin karena riwayat suhu selama penyimpanan dan distribusi berkaitan langsung dengan mutu serta keterlacakan produk. Studi pada rantai pasok pangan menunjukkan bahwa pemantauan suhu tidak cukup hanya mengandalkan pemeriksaan kondisi sesaat; pencatatan kontinu dan pertukaran data diperlukan untuk mengidentifikasi temperature excursion dan titik lemah proses [1]. Sistem IoT telah digunakan untuk memperluas pemantauan kondisi cold chain melalui sensor, jaringan komunikasi, penyimpanan cloud, dan antarmuka jarak jauh [2].

Perkembangan sistem monitoring IoT pada cold storage menunjukkan dua kecenderungan utama. Pertama, penelitian berfokus pada integrasi sensor dan dashboard agar data dapat diakses jarak jauh. Kedua, studi yang lebih kuat mulai melaporkan metrik evaluasi, seperti selisih terhadap alat pembanding dan delay transmisi. Pada ruang cold storage, Alfarizi dan Abidin melaporkan pengujian pembacaan terhadap termometer digital sekaligus delay pengiriman data [10], sedangkan Pamungkas dkk. mengevaluasi kestabilan sistem mini cold storage dan selisih pengukuran terhadap perangkat referensi [11]. Pada arsitektur ESP32–Firebase di aplikasi lain, latency juga diukur secara eksplisit sebagai bagian dari klaim real-time [12].

Dengan demikian, penggunaan ESP32, DS18B20, atau Firebase Realtime Database bukan merupakan kebaruan dengan sendirinya. Research gap pada artikel ini ditempatkan pada evaluasi kesesuaian pembacaan suhu prototipe terhadap pengontrol yang digunakan di lokasi operasional, sekaligus pemisahan yang tegas antara performa metrologi dan performa telemetri. Literatur edge-to-cloud menunjukkan bahwa latency, packet-delivery ratio, dan sinkronisasi waktu perlu diukur secara terpisah agar istilah real-time dan reliabilitas memiliki dasar kuantitatif [13].

Sistem yang dievaluasi menggunakan DS18B20 sebagai sensor suhu, ESP32 sebagai pengendali dan penghubung jaringan, serta Firebase Realtime Database sebagai media penyimpanan cloud. Eliwell ID Plus 974 yang telah digunakan pada cold storage dipakai sebagai pembanding operasional. Karena status kalibrasi, jenis probe terpasang, dan ketidakpastian gabungan sistem Eliwell tidak tersedia pada dokumentasi penelitian, perangkat tersebut tidak diperlakukan sebagai standar metrologi tertelusur, melainkan sebagai instrumen pembanding di lokasi.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengkuantifikasi agreement pembacaan suhu DS18B20 terhadap Eliwell melalui bias dan 95% limits of agreement; (2) mendeskripsikan variasi temporal data suhu selama pengujian; (3) memverifikasi secara fungsional alur pengiriman dan penyimpanan data ke Firebase; serta (4) mengidentifikasi metrik telemetri dan reliabilitas yang belum tersedia. Dengan formulasi ini, klaim kelayakan dibatasi pada fungsi prototipe yang teramati dan tidak disamakan dengan kesiapan industrial deployment.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif untuk mengevaluasi agreement pengukuran suhu dan fungsi telemetri prototipe pada cold storage industri.

2.1. Lokasi Penelitian

Pengujian dilaksanakan di ruang cold storage PT SukaJaya yang digunakan untuk penyimpanan produk ikan beku. Sistem eksisting menggunakan Eliwell ID Plus 974 sebagai pengontrol lokal. Konteks lokasi ini memberi kondisi operasional nyata untuk evaluasi awal, tetapi pengujian pada satu instalasi tidak digunakan sebagai bukti generalisasi ke seluruh sistem cold storage industri.



2.2. Alat dan Bahan

Perangkat utama terdiri atas ESP32 DevKit, sensor DS18B20, Firebase Realtime Database, laptop/dashboard, jaringan internet, serta Eliwell ID Plus 974 sebagai pembanding operasional. DS18B20 memiliki resolusi yang dapat diprogram 9–12 bit dan spesifikasi akurasi $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hanya pada rentang -10 hingga $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ menurut datasheet [3]. Karena rata-rata suhu pengujian berada di sekitar $-17,26\text{ }^{\circ}\text{C}$, spesifikasi $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tersebut tidak digunakan sebagai bukti akurasi pada kondisi eksperimen. ESP32 digunakan sebagai unit akuisisi dan komunikasi [4].

TABEL I : ALAT DAN BAHAN

No	Alat atau bahan	Fungsi
1	ESP32 DevKit	Unit akuisisi, pemrosesan, dan komunikasi data
2	Sensor DS18B20	Mengukur suhu pada cold storage
3	Expansion Board	Mempermudah Integrasi komponen
4	Firebase Realtime Database	Menyimpan data monitoring berbasis cloud
5	Laptop	Menampilkan dashboard Monitoring
6	Eliwell ID Plus 974	Pembanding operasional pembacaan suhu
7	Box Pelindung	Melindungi Rangkaian Perangkat
8	Jaringan Internet	Media Transmisi Data

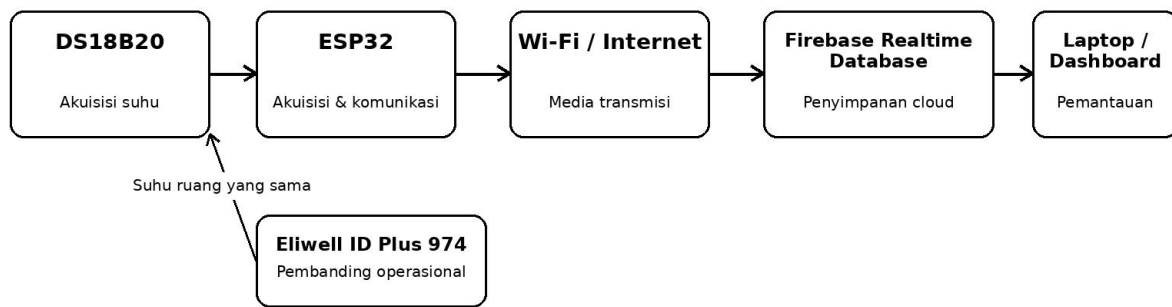


Gambar 1. Alat monitoring suhu Berbasis IoT

2.3. Arsitektur Sistem dan Alur Data

Eliwell ID Plus 974 membaca lingkungan cold storage secara independen sebagai pembanding operasional. Versi library, struktur node Firebase, mekanisme timestamp, buffer lokal, retry saat koneksi terputus, dan strategi sinkronisasi waktu tidak tercantum dalam dokumentasi, sehingga parameter tersebut dinyatakan sebagai informasi yang belum tersedia.





Gambar 2: Arsitektur dan alur data sistem monitoring suhu serta posisi pembanding operasional

2.4. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian mencakup observasi sistem eksisting, perancangan dan perakitan prototipe, pengujian pembacaan suhu, verifikasi fungsi pengiriman data, serta analisis agreement. Tahapan ini tidak mencakup uji gangguan terstruktur atau uji ketahanan jangka panjang karena data tersebut tidak tersedia.

TABEL II : TAHAPAN PENELITIAN

Tahapan	Kegiatan
Observasi	Mengidentifikasi sistem monitoring suhu yang digunakan perusahaan
Perancangan Sistem	Merancang perangkat keras dan perangkat lunak
Perakitan Sistem	Mengintegrasikan seluruh komponen
Pengujian Sistem	Mengambil data suhu dan memverifikasi fungsi pengiriman ke cloud
Analisis data	Mengolah hasil pengujian sistem
Kesimpulan	Menetapkan kesimpulan sesuai bukti dan batas pengujian yang tersedia

2.5. Variabel Penelitian

Definisi operasional diperlukan agar istilah performa, kestabilan, real-time, reliabilitas, dan kelayakan tidak digunakan secara umum. Tabel 3 memisahkan metrik yang benar-benar memiliki data dari metrik yang belum diuji.

TABEL III : DEFINISI OPERASIONAL METRIK DAN KETERSEDIAAN DATA

Metrik	Data tersedia	Interpretasi
Agreement suhu (bias & 95% LoA)	Bias 0,05 °C; SD selisih 0,18 °C; LoA tekstual sekitar -0,30 hingga 0,40 °C	Menilai kesesuaian dua sistem pengukuran, bukan akurasi absolut.
Variasi temporal (SD)	SD 0,176 °C; deviasi rata-rata 0,147 °C	Menjelaskan sebaran data selama operasi; bukan repeatability pada suhu konstan.



Latency end-to-end	Tidak tersedia	Istilah real-time tidak dapat dikuantifikasi.
Keberhasilan transmisi	Tidak tersedia	Packet/data loss dan success rate belum dapat dihitung.
Uptime & recovery	Tidak tersedia	Reliabilitas ESP32, jaringan, dan recovery belum tervalidasi.
Kelayakan industri	Agreement dan fungsi cloud tersedia; metrik telemetri/ketahanan belum tersedia	Evaluasi dibatasi pada fungsi awal di lingkungan industri, bukan industrial readiness.

2.6. Analisis Data

Agreement suhu dianalisis dengan Bland–Altman menggunakan bias (mean difference) dan 95% limits of agreement (bias $\pm$ 1,96 SD selisih) [6], [7]. Pendekatan ini dipilih karena korelasi tidak menilai kesepakatan dua metode pengukuran. Interpretasi ketidakpastian mengikuti prinsip bahwa hasil pembandingan juga memiliki kontribusi ketidakpastian [8], [9]. Dokumen produk IDPlus 974 menyatakan resolusi tampilan 1 atau 0,1 °C dan akurasi pengontrol lebih baik dari 0,5% full scale + 1 digit [5]; namun jenis probe terpasang dan status kalibrasinya tidak terdokumentasi. Oleh sebab itu, Eliwell digunakan sebagai comparator operasional, bukan reference standard tertelusur.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil disajikan mengikuti tiga sasaran evaluasi: karakteristik data suhu, agreement terhadap Eliwell, dan fungsi telemetri/cloud. Reliabilitas operasional dibahas terpisah agar keberhasilan pembacaan sensor tidak disamakan dengan reliabilitas Wi-Fi, ESP32, atau Firebase.

3.1. Karakteristik Data Suhu Selama Pengujian

Sebanyak 300 observasi suhu DS18B20 dengan total akumulasi –5178,10 °C dan rata-rata –17,260 °C. Standar deviasi data sebesar 0,176 °C dan deviasi rata-rata yang dilaporkan sebesar 0,147 °C. Nilai tersebut menggambarkan sebaran temporal pembacaan pada kondisi cold storage yang diamati. Karena suhu ruang, siklus kompresor, beban, dan status pintu tidak dikendalikan atau dicatat, standar deviasi ini tidak diperlakukan sebagai repeatability sensor atau bukti kestabilan instrumen pada suhu konstan.

Ringkasan statistik disajikan pada Tabel 4. Interpretasi hasil dibatasi pada kondisi operasi yang terdokumentasi. Secara khusus, rata-rata –17,260 °C berada di bawah batas –10 °C tempat datasheet DS18B20 menjamin akurasi $\pm$ 0,5 °C [3]; karena itu spesifikasi datasheet tidak digunakan untuk menyimpulkan akurasi prototipe pada suhu pengujian.

TABEL IV: STATISTIK DESKRIPTIF PEMBACAAN SUHU DS18B20

Parameter	Nilai
Jumlah data	300
Pengukuran Total	–5178,10 °C
Rata – Rata	–17,260 °C
Standar deviasi	0,176 °C
Deviasi Rata-Rata	0,147 °C



3.2. Agreement Pengukuran terhadap Eliwell ID Plus 974

Agreement antara DS18B20 dan Eliwell dievaluasi menggunakan Bland–Altman [6], [7]. Analisis ini menilai distribusi selisih dua sistem pengukuran, sehingga lebih tepat untuk tujuan agreement dibandingkan hanya menggunakan korelasi. Dalam penelitian ini, hasil dilaporkan sebagai bias, standar deviasi selisih, dan limits of agreement.

Ringkasan pengolahan data memberikan bias sebesar 0,05 °C dan standar deviasi selisih sebesar 0,18 °C. Dengan rumus bias $\pm 1,96$ SD, batas kesepakatan dihitung sekitar –0,30 °C hingga 0,40 °C. Nilai ini harus dibaca sebagai rentang agreement antara DS18B20 dan sistem Eliwell yang terpasang, bukan sebagai ketidakpastian absolut sensor DS18B20.

Perhitungan Upper LoA

$$ULoA = \text{Bias} + 1,96 \times \text{SD selisih}$$

$$ULoA = 0,05 + (1,96 \times 0,18)$$

$$ULoA = 0,4028 \text{ °C} \approx 0,40 \text{ °C}$$

Perhitungan Lower LoA

$$LLoA = \text{Bias} - 1,96 \times \text{SD selisih}$$

$$LLoA = 0,05 - (1,96 \times 0,18)$$

$$LLoA = -0,3028 \text{ °C} \approx -0,30 \text{ °C}$$

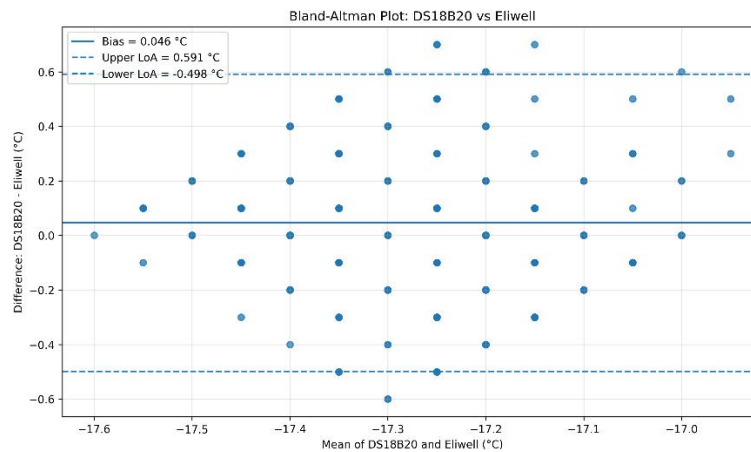
Limits of agreement sekitar –0,30 °C hingga 0,40 °C memberikan deskripsi kuantitatif tentang variasi perbedaan kedua sistem pada data yang dianalisis.

3.3. Interpretasi Bland–Altman

Pengujian menunjukkan bias 0,05 °C dengan LoA sekitar –0,30 hingga 0,40 °C. Namun, legend pada grafik Bland–Altman yang tersedia menampilkan nilai berbeda, yaitu bias sekitar 0,046 °C, upper LoA sekitar 0,591 °C, dan lower LoA sekitar –0,498 °C. Karena raw paired data tidak disertakan, perbedaan ini tidak dapat direkonsiliasi tanpa menghitung ulang dari data sumber.

Grafik tetap dipertahankan sebagai dokumentasi visual, tetapi tidak digunakan untuk menetapkan nilai LoA akhir sebelum inkonsistensi angka diselesaikan. Secara visual tidak tampak tren kuat difference-versus-mean; namun regresi formal tidak dilaporkan, sehingga proportional bias juga tidak dinyatakan tidak ada secara statistik.





Gambar 3: Grafik Bland–Altman

Berdasarkan Gambar 3, titik pengukuran tersebar di sekitar garis bias. Akan tetapi, karena nilai bias dan LoA pada legend berbeda dari nilai perhitungan pada teks dan raw paired data tidak tersedia, jumlah titik di luar batas serta proporsi 95% tidak dihitung ulang. Dengan demikian, grafik digunakan sebagai visualisasi pola selisih, bukan sebagai dasar numerik final.

Bias 0,05 °C menunjukkan selisih rata-rata DS18B20 terhadap Eliwell yang kecil pada dataset yang dilaporkan. Akan tetapi, signifikansi praktisnya harus dikaitkan dengan kriteria penerimaan yang ditetapkan untuk aplikasi dan ketidakpastian comparator. Oleh karena kriteria penerimaan dan sertifikat kalibrasi Eliwell tidak tersedia, hasil ini tidak digunakan untuk menyatakan kedua perangkat interchangeable.

Prinsip evaluasi pengukuran menekankan bahwa ketidakpastian tidak hanya berasal dari sensor yang diuji, tetapi juga dari alat pembanding dan kondisi pemasangan [8], [9]. Hal ini penting pada penelitian ini karena spesifikasi produk IDPlus 974 tidak sama dengan bukti kalibrasi unit yang terpasang. Dengan demikian, hasil Bland–Altman paling tepat dilaporkan sebagai agreement operasional antara dua sistem pembacaan pada lokasi pengujian.

3.4. Performa Transmisi dan Penyimpanan Data

Sistem dilaporkan mampu mengirimkan dan menyimpan data ke Firebase Realtime Database sehingga fungsi telemetry path dapat dinyatakan berjalan secara fungsional. Namun, tidak tersedia timestamp di sisi sensor dan database untuk menghitung latency end-to-end, serta tidak tersedia jumlah pesan yang seharusnya dikirim dan yang benar-benar tersimpan. Studi sejenis pada cold storage melaporkan delay 5–6 s [10], sedangkan implementasi ESP32–Firebase pada aplikasi lain melaporkan 0,24–0,36 s [12]; variasi tersebut menunjukkan bahwa latency harus diukur pada konfigurasi aktual, bukan diasumsikan dari platform yang digunakan.

3.5. Reliabilitas Subsistem dan Kesiapan Operasional

Reliabilitas dipisahkan menjadi reliabilitas pengukuran, mikrokontroler, jaringan, dan layanan database. Literatur telemetry ESP32 menunjukkan bahwa latency dan packet-delivery ratio perlu diinstrumentasi pada tingkat paket untuk mengidentifikasi bottleneck secara benar [13].



TABEL V : STATUS BUKTI RELIABILITAS TIAP SUBSISTEM

Subsistem	Bukti yang tersedia	Metrik yang belum tersedia	Kesimpulan yang diperbolehkan
DS18B20 vs Eliwell	Bias dan LoA	Kalibrasi tertelusur; repeatability pada suhu konstan	Agreement operasional dapat dinilai
ESP32	Beroperasi selama akuisisi yang dilaporkan	Uptime; restart; watchdog/recovery	Fungsi prototipe teramati
Wi-Fi / Internet	Data mencapai Firebase	Packet loss; RSSI; reconnect time	Keberhasilan komunikasi hanya bersifat fungsional
Firebase	Data tersimpan dan dapat dipantau	Latency end-to-end; missing records; outage/retry	Fungsi penyimpanan cloud teramati
Power, alarm, keamanan	Tidak dilaporkan	Recovery power loss; fail-safe; alarm; autentikasi/akses	Industrial readiness belum dievaluasi

3.6. Keterbatasan dan Implikasi Praktis

Belum adanya uji komunikasi dan ketahanan jangka panjang. Terdapat pula inkonsistensi antara nilai bias/LoA yang dihitung pada teks dan nilai pada legend grafik Bland–Altman, sehingga grafik perlu diregenerasi dari dataset sumber. Kondisi pintu, siklus kompresor, beban produk, posisi sensor, dan durasi pengamatan juga tidak terdokumentasi. Untuk deployment industri, pengujian berikutnya perlu memasukkan timestamp tersinkronisasi, latency end-to-end, packet/data loss, uptime, disconnect/reconnect Wi-Fi, recovery setelah kehilangan daya, local buffering, alarm, autentikasi, keamanan data, dan fail-safe. Dengan bukti saat ini, posisi sistem yang paling defensible adalah sebagai monitoring tambahan dan data logger jarak jauh, bukan pengganti pengontrol eksisting.

4. KESIMPULAN

Prototipe monitoring suhu berbasis DS18B20, ESP32, dan Firebase Realtime Database berhasil direalisasikan dan digunakan pada lingkungan cold storage industri. Berdasarkan 300 observasi yang dilaporkan, rata-rata suhu DS18B20 sebesar $-17,260^{\circ}\text{C}$ dengan standar deviasi temporal $0,176^{\circ}\text{C}$ dan deviasi rata-rata $0,147^{\circ}\text{C}$. Sebaran tersebut menggambarkan variasi data selama kondisi operasi yang diamati dan tidak diperlakukan sebagai repeatability sensor pada suhu konstan.

Komparasi terhadap Eliwell ID Plus 974 pada ringkasan tekstual menghasilkan bias $0,05^{\circ}\text{C}$ dan standar deviasi selisih $0,18^{\circ}\text{C}$, dengan 95% limits of agreement sekitar $-0,30$ hingga $0,40^{\circ}\text{C}$. Namun, legend grafik Bland–Altman menampilkan nilai LoA yang berbeda. Karena raw paired data dan status kalibrasi sistem Eliwell tidak tersedia, nilai agreement perlu dihitung ulang dari data sumber sebelum digunakan sebagai bukti akurasi absolut atau interchangeability.

Pengiriman dan penyimpanan data ke Firebase teramati berfungsi, tetapi latency end-to-end, packet/data loss, uptime, recovery jaringan/daya, serta ketahanan jangka panjang belum diukur. Karena itu, klaim real-time, reliabilitas, dan kelayakan skala industri dibatasi. Sistem saat ini layak diposisikan sebagai prototipe monitoring tambahan dan pencatatan jarak jauh; validasi telemetri, uji gangguan, keamanan, alarm, fail-safe, dan pengujian jangka panjang diperlukan sebelum deployment industri dapat disimpulkan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Waldhans, A. Albrecht, R. Ibal, D. Wollenweber, S.-J. Sy, and J. Kreyenschmidt, "Temperature Control and Data Exchange in Food Supply Chains: Current Situation and the Applicability of a Digitalized System of Time-Temperature-Indicators to Optimize Temperature Monitoring in Different Cold Chains," *Journal of Packaging Technology and Research*, vol. 8, pp. 79–93, 2024, doi: 10.1007/s41783-024-00165-2.
- [2] A. Y. Cil, D. Abdurahman, and I. Cil, "Internet of Things enabled real time cold chain monitoring in a container port," *Journal of Shipping and Trade*, vol. 7, art. 9, 2022, doi: 10.1186/s41072-022-00110-z.
- [3] Analog Devices, "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet," Rev. 6, 2019.
- [4] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," Espressif Systems, 2023.
- [5] Eliwell by Schneider Electric, "IDPlus 974—Product Specifications and Instruction Documentation," Eliwell Controls, accessed Oct. 25, 2026.
- [6] J. M. Bland and D. G. Altman, "Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement," *The Lancet*, vol. 327, no. 8476, pp. 307–310, 1986.
- [7] D. Giavarina, "Understanding Bland–Altman analysis," *Biochemia Medica*, vol. 25, no. 2, pp. 141–151, 2015, doi: 10.11613/BM.2015.015.
- [8] Joint Committee for Guides in Metrology, *Evaluation of Measurement Data—Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM 100:2008, 2008.
- [9] J. P. Bentley, *Principles of Measurement Systems*, 4th ed. Harlow, U.K.: Pearson Education, 2005.
- [10] H. Alfarizi and R. Z. Abidin, "Sistem Monitoring Suhu Berbasis IoT dengan Sensor Thermocouple dan Pelaporan Otomatis Menggunakan Google Sheets pada Ruang Cold Storage," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 9, no. 6, 2025, doi: 10.36040/jati.v9i6.15495.
- [11] K. B. Pamungkas, T. Haryanti, B. Khoerun, and I. Fatwasauri, "Evaluasi Kinerja dan Kestabilan Sistem Kontrol Suhu Mini Cold Storage Ikan Bandeng Berbasis Internet of Things," *Jurnal Rekayasa Energi*, vol. 4, no. 2, pp. 61–68, 2026.
- [12] F. Rahayu, A. Octa, and H. Hardiyanto, "IoT-Based Kitchen Monitoring System with ESP32 and Firebase Realtime," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 14, no. 1, p. 96, 2026, doi: 10.26760/elkomika.v14i1.96.
- [13] K. Smelcerz, "Characterization of Latency Sources in a MicroPython-Based ESP32 Edge–Cloud Sensor Network," *Sensors*, vol. 26, no. 17, art. 5555, 2026, doi: 10.3390/s26175555.

