

Kalibrasi dan Analisis Ketidakpastian Pengukuran Sensor Temperatur DHT22 Menggunakan Termometer Digital Terkalibrasi sebagai Alat Referensi

Viki Sandia Yudha^{1,*}, Fajri Mardawati, Ramadhani¹, Yusuf Rizky Ferdiansyah¹, Rafli Fatah Al Munawar¹,
Januar Ghani M¹, Toto Supriyono¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, Bandung 40153

*Email: sandiayudhaviki@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.23969/ksjme.v1i2.39427>

Abstract

The DHT22 digital temperature sensor is widely used in environmental monitoring, building automation, and Internet of Things (IoT) applications due to its low cost and ease of integration. However, its measurement accuracy and precision are limited by manufacturing variability, environmental conditions, and component ageing, which can lead to systematic errors. Therefore, calibration accompanied by measurement uncertainty analysis is required to ensure reliable temperature data. In this study, a DHT22 temperature sensor was calibrated using a calibrated digital thermometer as a reference instrument through a direct comparison method at several temperature points within the sensor's operating range. Linear regression was applied to derive a correction equation, while measurement error and Type A and Type B uncertainties were evaluated to determine the combined measurement uncertainty. The results show that, before calibration, the DHT22 sensor exhibited a temperature-dependent bias, with errors exceeding 1 °C at medium to high temperatures. The application of the regression-based correction significantly reduced measurement errors and improved agreement with the reference values, as indicated by a high coefficient of determination ($R^2 = 0.998$). The combined measurement uncertainty was found to lie within a moderate accuracy range and to increase with temperature, with dominant contributions from measurement repeatability and reference instrument uncertainty. Consequently, the calibrated DHT22 sensor can be more reliably employed in environmental temperature measurement applications requiring moderate accuracy.

Keywords: Calibration; temperature sensor; DHT22; measurement uncertainty; linear regression

Abstrak

Sensor temperatur digital DHT22 banyak digunakan pada sistem pemantauan lingkungan, otomasi bangunan, dan aplikasi Internet of Things (IoT) karena biaya yang relatif rendah dan kemudahan integrasi. Namun demikian, akurasi dan presisi pengukurannya dibatasi oleh variasi manufaktur, kondisi lingkungan, dan penuaan komponen, sehingga berpotensi menimbulkan galat pengukuran yang bersifat sistematis. Oleh karena itu, proses kalibrasi yang disertai dengan analisis ketidakpastian pengukuran diperlukan untuk menjamin keandalan data temperatur yang dihasilkan. Pada penelitian ini, sensor temperatur DHT22 dikalibrasi menggunakan termometer digital terkalibrasi sebagai instrumen referensi melalui metode perbandingan langsung pada beberapa titik temperatur dalam rentang kerja sensor. Analisis regresi linier diterapkan untuk memperoleh persamaan koreksi, sedangkan galat pengukuran serta ketidakpastian tipe A dan tipe B dievaluasi untuk menentukan ketidakpastian pengukuran gabungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelum dilakukan kalibrasi, sensor DHT22 menunjukkan bias pengukuran yang bergantung pada temperatur, dengan galat yang melebihi 1 °C pada rentang temperatur menengah hingga tinggi. Penerapan koreksi berbasis regresi linier terbukti secara signifikan menurunkan galat pengukuran dan meningkatkan kesesuaian hasil pembacaan sensor terhadap nilai referensi, yang ditunjukkan oleh nilai koefisien determinasi yang tinggi ($R^2 = 0,998$). Ketidakpastian pengukuran gabungan berada pada kisaran akurasi menengah dan cenderung meningkat seiring dengan kenaikan temperatur, dengan kontribusi dominan berasal dari keterulangan pengukuran dan ketidakpastian instrumen referensi. Dengan demikian, sensor DHT22 yang telah dikalibrasi dapat digunakan secara lebih andal pada aplikasi pengukuran temperatur lingkungan yang memerlukan tingkat akurasi menengah.

Kata kunci: Kalibrasi; sensor temperatur; DHT22; ketidakpastian pengukuran; regresi linier

PENDAHULUAN

Pengukuran temperatur merupakan parameter fundamental yang digunakan secara luas dalam berbagai bidang, antara lain meteorologi, industri manufaktur, kesehatan, pertanian, serta sistem kendali otomatis. Data temperatur yang akurat dan andal sangat menentukan kualitas pengambilan keputusan, khususnya pada sistem pemantauan dan pengendalian yang bekerja secara otomatis dan berkelanjutan [1–5]. Ketidakakuratan pengukuran temperatur dapat menyebabkan kesalahan evaluasi kondisi lingkungan, penurunan kualitas proses, hingga kegagalan sistem kendali [6–8].

Perkembangan teknologi digital telah mendorong pemanfaatan sensor temperatur berbasis elektronik karena kemudahan integrasi dengan sistem mikrokontroler dan komputer, biaya yang relatif rendah, serta kemampuannya untuk diimplementasikan pada sistem berbasis Internet of Things (IoT) [9–11]. Salah satu sensor yang banyak digunakan adalah DHT22, yaitu sensor temperatur dan kelembapan digital yang mengintegrasikan elemen sensor, rangkaian pengkondisi sinyal, dan antarmuka digital dalam satu modul [12–14]. Sensor ini banyak diaplikasikan pada sistem pemantauan lingkungan, stasiun cuaca mini, serta sistem monitoring berbasis mikrokontroler karena konsumsi daya yang rendah dan kemudahan penggunaannya [3,15,16].

Meskipun demikian, sensor DHT22 termasuk dalam kategori sensor berbiaya rendah yang memiliki keterbatasan akurasi intrinsik. Spesifikasi pabrikan menyebutkan adanya toleransi kesalahan pengukuran yang dapat bervariasi antar unit sensor [17]. Beberapa penelitian melaporkan bahwa sensor DHT22 dapat mengalami deviasi pengukuran berupa offset tetap maupun kesalahan yang bergantung pada temperatur, terutama pada rentang temperatur tertentu dan dalam penggunaan jangka panjang [18]. Variasi ini dapat dipengaruhi oleh proses manufaktur, kondisi penyimpanan, penuaan komponen, serta pengaruh lingkungan operasional seperti kelembapan dan fluktuasi temperatur [7,19].

Kalibrasi merupakan proses pembandingan antara nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur dengan nilai standar yang memiliki ketertelusuran terhadap standar nasional atau internasional [20,21]. Melalui proses kalibrasi, hubungan antara keluaran sensor dan nilai temperatur sebenarnya dapat diketahui, sehingga galat sistematis dapat diidentifikasi dan faktor koreksi dapat ditentukan. Dalam konteks sensor temperatur digital, kalibrasi menjadi langkah

penting untuk meningkatkan keandalan data pengukuran, khususnya pada aplikasi yang membutuhkan konsistensi dan validitas data dalam jangka panjang [15,22].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membahas karakteristik dan kinerja sensor temperatur digital berbiaya rendah, termasuk DHT22. Namun, sebagian besar studi hanya berfokus pada evaluasi akurasi tanpa menyajikan model koreksi yang terdefinisi dengan jelas atau tanpa melibatkan analisis ketidakpastian pengukuran secara sistematis [1,22]. Selain itu, masih terbatas penelitian yang secara khusus membahas kalibrasi DHT22 menggunakan termometer digital sebagai standar pembandingan yang mudah diakses dan relevan untuk aplikasi praktis di laboratorium pendidikan maupun sistem monitoring lapangan.

Berdasarkan celah penelitian tersebut (research gap), penelitian ini difokuskan pada proses kalibrasi sensor temperatur DHT22 menggunakan metode perbandingan langsung dengan termometer digital sebagai standar pembandingan. Tujuan penelitian ini adalah untuk (1) mengevaluasi karakteristik galat pengukuran sensor DHT22, (2) menentukan hubungan matematis antara pembacaan sensor dan standar melalui analisis regresi, serta (3) mengevaluasi ketidakpastian pengukuran hasil kalibrasi.

Penelitian ini penting karena memberikan pendekatan kalibrasi yang aplikatif dan mudah direplikasi, khususnya untuk penggunaan sensor DHT22 pada sistem pemantauan temperatur berbasis mikrokontroler dan IoT. Kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada penyajian kalibrasi DHT22 yang terintegrasi antara analisis galat, model koreksi berbasis regresi linier, dan evaluasi ketidakpastian pengukuran dengan menggunakan termometer digital sebagai standar pembandingan yang praktis. Kontribusi penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan teknis dalam penggunaan dan kalibrasi sensor DHT22, serta memberikan implikasi langsung terhadap peningkatan keandalan data temperatur pada aplikasi ilmiah dan teknis.

METODA PENELITIAN

Material dan Peralatan

Material dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas sensor temperatur digital DHT22 sebagai objek kalibrasi, modul mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan dan

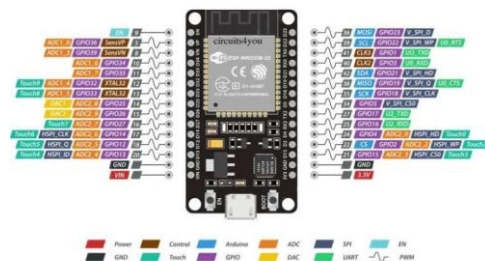
akuisisi data, serta thermometer digital Fluke 52 sebagai alat ukur temperatur referensi (kalibrator). Sensor DHT22 digunakan karena karakteristiknya yang umum diaplikasikan pada sistem pemantauan lingkungan berbasis mikrokontroler. Modul ESP32 dipilih sebagai pengendali utama karena memiliki kemampuan pemrosesan yang memadai, antarmuka digital yang kompatibel dengan sensor DHT22, serta kemudahan dalam pencatatan dan pengiriman data hasil pengukuran. Termometer digital digunakan sebagai standar pembanding dalam proses kalibrasi karena alat ini mampu memberikan pengukuran temperatur udara yang relatif stabil dan telah digunakan secara luas dalam praktik pengukuran meteorologi. Termometer digital yang digunakan memiliki dua sensor termokopel dan telah dikalibrasi oleh pabrikannya. Selain peralatan utama tersebut, digunakan pula sumber catu daya yang stabil untuk sistem ESP32, media pencatat data, serta ruang pengujian dengan sirkulasi udara yang terkendali. Penggunaan ruang pengujian bertujuan untuk mengurangi pengaruh fluktuasi

lingkungan yang tidak diinginkan selama proses pengambilan data kalibrasi.

Gambar 1 menunjukkan material dan peralatan utama yang digunakan dalam penelitian kalibrasi sensor temperatur. Sensor temperatur digital DHT22 pada bagian (a) digunakan sebagai objek kalibrasi yang berfungsi mengukur temperatur lingkungan. Modul ESP32 pada bagian (b) dimanfaatkan sebagai sistem pengendali dan akuisisi data, yang bertugas membaca, memproses, dan merekam data temperatur dari sensor DHT22 secara digital. Termometer digital pada bagian (c) digunakan sebagai instrumen referensi atau kalibrator untuk memperoleh nilai temperatur acuan, khususnya melalui pembacaan termometer bola kering sesuai prosedur standar. Sementara itu, power supply pada bagian (d) berfungsi sebagai sumber catu daya yang stabil untuk memastikan sistem pengukuran berbasis ESP32 dan sensor DHT22 dapat beroperasi secara konsisten selama proses kalibrasi berlangsung.



(a) DHT22



(b) ESP32



(c) Termometer digital Fluke 52



(d) Power supply

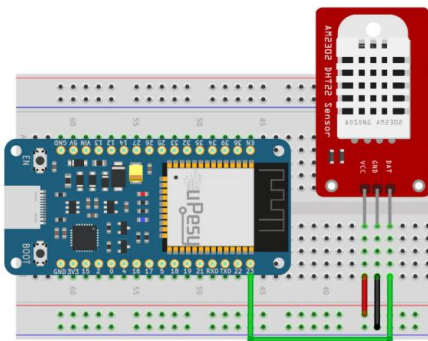
Gambar 1. Material dan Peralatan

Gambar 2 memperlihatkan diagram pengkabelan (wiring diagram) antara sensor temperatur digital DHT22 dan modul mikrokontroler ESP32 yang digunakan dalam sistem akuisisi data. Sensor DHT22 dihubungkan ke ESP32 melalui tiga jalur utama, yaitu jalur catu daya, jalur data, dan jalur ground, yang masing-masing berfungsi untuk menyuplai tegangan kerja sensor, mengirimkan sinyal data digital hasil pengukuran temperatur,

serta sebagai referensi potensial bersama. Koneksi dilakukan menggunakan breadboard dan kabel jumper untuk memudahkan perakitan dan pengujian rangkaian. Konfigurasi pengkabelan ini memastikan komunikasi data antara DHT22 dan ESP32 dapat berlangsung secara stabil, sehingga pembacaan temperatur dapat dilakukan secara periodik dan akurat selama proses kalibrasi dan pengujian sistem.

Prosedur Kalibrasi

Prosedur kalibrasi sensor temperatur digital DHT22 dilakukan dengan metode perbandingan langsung terhadap alat ukur referensi berupa thermometer digital. Seluruh tahapan kalibrasi disusun mengacu pada prinsip-prinsip dasar standar ISO/IEC 17025, khususnya terkait ketertelusuran pengukuran, pengendalian kondisi lingkungan, dan konsistensi prosedur pengujian.



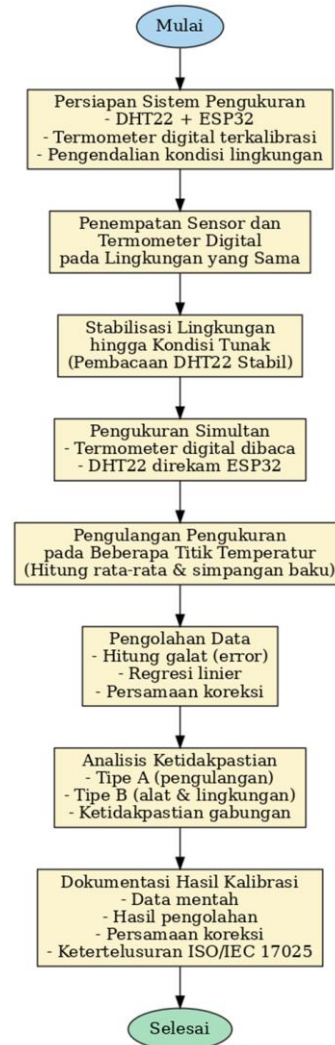
Gambar 2. Wiring Diagram

Tahap awal kalibrasi diawali dengan persiapan sistem pengukuran. Sensor DHT22 dihubungkan dengan modul mikrokontroler ESP32 yang telah diprogram untuk melakukan pembacaan temperatur secara periodik dan menyimpan data hasil pengukuran. Termometer digital dipastikan berada dalam kondisi baik dan bersih, serta digunakan sesuai dengan petunjuk operasional pabrikan dan terkalibrasi. Seluruh peralatan diletakkan di dalam ruang pengujian dengan sirkulasi udara yang relatif stabil dan terhindar dari paparan langsung sumber panas maupun pendinginan lokal.

Sensor DHT22 dan thermometer digital ditempatkan pada posisi yang berdekatan dengan jarak yang cukup dekat sehingga keduanya mengalami kondisi lingkungan yang sama. Setelah penempatan, sistem dibiarkan selama periode stabilisasi untuk memastikan temperatur lingkungan mencapai kondisi tunak. Stabilisasi dilakukan selama beberapa menit hingga pembacaan temperatur sensor DHT22 menunjukkan nilai yang relatif konstan.

Pengukuran temperatur referensi dilakukan menggunakan thermometer digital sesuai prosedur standar pengukuran. Setelah proses pemutaran selesai, nilai temperatur dibaca dan dicatat sebagai temperatur referensi. Pada saat yang bersamaan, nilai temperatur yang ditunjukkan oleh sensor DHT22 direkam oleh sistem ESP32. Proses

pencatatan dilakukan secara simultan untuk meminimalkan perbedaan waktu pengukuran antara sensor dan alat referensi.



Gambar 3. Prosedur kalibrasi

Pengambilan data dilakukan pada beberapa titik temperatur yang mencakup rentang kerja sensor DHT22. Variasi temperatur dicapai secara alami melalui perubahan kondisi lingkungan atau dengan pengaturan sumber panas dan pendinginan secara terkendali. Pada setiap titik temperatur, pengukuran dilakukan secara berulang untuk memperoleh data yang representatif dan memungkinkan analisis statistik. Jumlah pengulangan ditetapkan agar cukup untuk menghitung nilai rata-rata dan simpangan baku pengukuran.

Data hasil pengukuran selanjutnya diolah dengan menghitung selisih antara nilai temperatur yang ditunjukkan oleh sensor DHT22 dan nilai temperatur referensi dari thermometer digital.

Selisih tersebut dinyatakan sebagai galat (error) pengukuran. Berdasarkan data galat pada seluruh titik temperatur, dilakukan analisis regresi linier untuk memperoleh persamaan koreksi sensor. Persamaan koreksi ini digunakan untuk menyesuaikan hasil pembacaan sensor DHT22 agar mendekati nilai temperatur sebenarnya.

Sebagai bagian dari evaluasi hasil kalibrasi, dilakukan pula perhitungan ketidakpastian pengukuran yang meliputi ketidakpastian tipe A dan

tipe B. Ketidakpastian tipe A diperoleh dari variasi hasil pengukuran berulang, sedangkan ketidakpastian tipe B diperoleh dari spesifikasi alat referensi, resolusi sensor, dan faktor lingkungan. Ketidakpastian gabungan dihitung untuk menggambarkan tingkat keandalan hasil pengukuran setelah kalibrasi. Persamaan (1) dapat digunakan untuk menentukan ketidakpastian tipe A, u_A yaitu ditentukan dengan statistic dari pengukuran berulang [4,5].

$$u_A = t_{0.95,v} \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Di mana t adalah nilai distribusi t ditentukan berdasarkan level kepercayaan 95% dan derajat kebebasan $v = n - 1$. Persamaan (2) digunakan untuk menghitung ketidakpastian tipe B, u_B , yaitu ketidakpastian dari akurasi alat ukur yang digunakan (ΔT) [23].

$$u_B = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Seluruh hasil kalibrasi didokumentasikan secara sistematis, mencakup kondisi pengujian, data pengukuran mentah, hasil pengolahan data, serta persamaan koreksi yang diperoleh. Dokumentasi ini bertujuan untuk menjamin keterulangan prosedur dan ketertelusuran hasil pengukuran sesuai dengan ketentuan standar ISO/IEC 17025 [24,25].

Pengolahan Data

Data hasil pengukuran dianalisis dengan menghitung selisih antara nilai yang ditunjukkan oleh sensor DHT22 dan nilai referensi. Selisih ini dinyatakan sebagai galat pengukuran. Selanjutnya,

dilakukan analisis regresi linier untuk memperoleh hubungan matematis antara pembacaan sensor dan nilai referensi. Persamaan regresi yang diperoleh digunakan sebagai persamaan koreksi sensor. Selain itu, dilakukan perhitungan ketidakpastian pengukuran yang mencakup ketidakpastian tipe A dan tipe B. Ketidakpastian tipe A diperoleh dari analisis statistik data pengukuran berulang, sedangkan ketidakpastian tipe B berasal dari akurasi alat referensi dan resolusi sensor. Ketidakpastian gabungan (u_C) kemudian dihitung untuk mengevaluasi tingkat keandalan hasil pengukuran setelah kalibrasi [23,26].

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + (t_{0.95,v} u_B)^2} \quad (3)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sebelum dilakukan kalibrasi, sensor DHT22 memiliki galat pengukuran yang bervariasi pada setiap titik temperatur. Galat tersebut cenderung meningkat pada temperatur tertentu, yang menunjukkan adanya kesalahan sistematis pada sensor. Nilai galat rata-rata yang diperoleh masih berada dalam batas toleransi spesifikasi pabrikan, namun kurang

memadai untuk aplikasi yang membutuhkan akurasi lebih tinggi.

Tabel 1 menunjukkan hasil perbandingan antara pembacaan sensor temperatur digital DHT22 dan termometer digital sebagai standar acuan pada rentang temperatur sekitar 24.0 °C hingga 44.0 °C. Secara umum, nilai temperatur yang ditunjukkan oleh sensor DHT22 memiliki kecenderungan lebih tinggi dibandingkan nilai yang dibaca oleh termometer digital, khususnya pada temperatur

menengah hingga tinggi. Perbedaan antara kedua alat ukur relatif kecil dan meningkat secara bertahap seiring dengan kenaikan temperatur, yang mengindikasikan adanya penyimpangan sistematis yang bersifat hampir linier. Kondisi ini menunjukkan bahwa sensor DHT22 memiliki konsistensi respons terhadap perubahan temperatur, namun tetap memerlukan proses kalibrasi dan penerapan faktor koreksi agar hasil pengukuran lebih mendekati nilai temperatur sebenarnya.

Analisis regresi linier menghasilkan persamaan koreksi yang menunjukkan hubungan linier yang kuat antara pembacaan sensor DHT22 dan temperatur referensi. Koefisien determinasi yang tinggi menunjukkan bahwa model regresi yang digunakan mampu merepresentasikan karakteristik sensor dengan baik. Dengan menerapkan persamaan koreksi tersebut, nilai galat pengukuran setelah kalibrasi mengalami penurunan yang signifikan.

Tabel 1. Data hasil kalibrasi

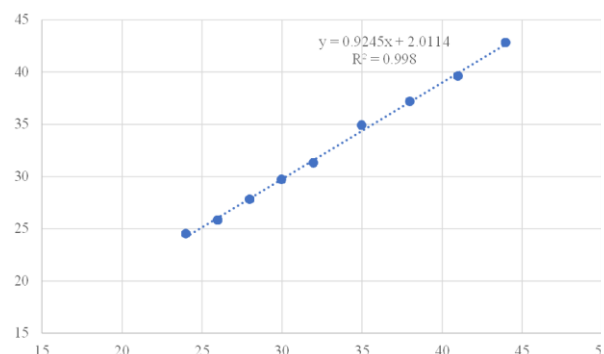
No.	Sensor DHT22	Termometer digital
1	24.0	24.5
2	26.0	25.8
3	28.0	27.8
4	30.0	29.7
5	32.0	31.3
6	35.0	34.9
7	38.0	37.2
8	41.0	39.6
9	44.0	42.8

Perhitungan ketidakpastian pengukuran menunjukkan bahwa ketidakpastian gabungan setelah kalibrasi lebih kecil dibandingkan sebelum kalibrasi. Hal ini menandakan bahwa proses kalibrasi tidak hanya memperbaiki akurasi, tetapi juga meningkatkan konsistensi hasil pengukuran. Dengan demikian, sensor DHT22 yang telah dikalibrasi dapat digunakan dengan tingkat kepercayaan yang lebih tinggi.

Pembahasan lebih lanjut menunjukkan bahwa meskipun sensor DHT22 merupakan sensor berbiaya rendah, performanya dapat ditingkatkan secara signifikan melalui proses kalibrasi yang tepat. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa faktor lingkungan seperti kelembapan dan aliran udara juga dapat mempengaruhi hasil pengukuran temperatur. Oleh karena itu, kalibrasi sebaiknya dilakukan secara berkala, terutama apabila sensor digunakan dalam jangka waktu yang lama atau pada kondisi lingkungan yang ekstrem.

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara pembacaan temperatur sensor DHT22 pada sumbu horizontal dan nilai temperatur yang diukur oleh termometer digital referensi pada sumbu vertikal. Data hasil pengukuran diplot dalam bentuk titik-titik yang kemudian didekati dengan garis regresi linier, yang menghasilkan persamaan: $y = 0.9245x + 2.0114$, dengan koefisien determinasi $R^2 = 0.998$, yang sangat mendekati satu menunjukkan adanya hubungan linier yang sangat kuat antara hasil

pengukuran sensor DHT22 dan alat ukur referensi. Persamaan regresi tersebut merepresentasikan persamaan koreksi yang dapat digunakan untuk menyesuaikan pembacaan sensor DHT22 agar lebih mendekati nilai temperatur acuan, sehingga akurasi pengukuran sensor dapat ditingkatkan setelah proses kalibrasi.



Gambar 3. Hasil temperatur digital dan DHT22

Tabel 2 memperlihatkan hasil analisis ketidakpastiannya. Terlihat adanya perbedaan sistematis antara pembacaan sensor temperatur DHT22 dan termometer digital sebagai standar pembandingan pada seluruh rentang temperatur pengujian. Pada temperatur rendah hingga menengah, selisih pembacaan relatif kecil, namun seiring dengan peningkatan temperatur, perbedaan

tersebut cenderung meningkat. Pola ini mengindikasikan bahwa sensor DHT22 mengalami bias pengukuran yang bergantung pada temperatur, dengan kecenderungan membaca lebih tinggi (overestimate) pada temperatur menengah hingga tinggi.

Variasi hasil pengukuran yang ditunjukkan oleh nilai deviasi standar menggambarkan kestabilan

pembacaan sensor pada setiap titik temperatur. Deviasi standar yang kecil pada temperatur rendah menunjukkan repeatability sensor yang relatif baik, sedangkan peningkatan deviasi standar pada temperatur yang lebih tinggi mengindikasikan meningkatnya fluktuasi pembacaan sensor. Kondisi ini mencerminkan keterbatasan sensor digital berbiaya rendah dalam mempertahankan kestabilan pengukuran pada temperatur yang lebih tinggi.

Tabel 2. Ketidakpastian nilai temperature DHT22

Sensor DHT22	Termometer digital	Bias error		Deviasi standar	$t_{0.95,8}$	Uncertainty
24	24.5	-0.5	0.25	0.6987	1.8595	0.23 °C
26	25.8	0.2	0.04			0.17 °C
28	27.8	0.2	0.04			0.54 °C
30	29.7	0.3	0.09			
32	31.3	0.7	0.49			
35	34.9	0.1	0.01			
38	37.2	0.8	0.64			
41	39.6	1.4	1.96			
44	42.8	1.2	1.44			

Keberadaan faktor distribusi Student $t_{0.95,8}$ menunjukkan bahwa analisis statistik dilakukan dengan mempertimbangkan tingkat kepercayaan 95%, sehingga hasil ketidakpastian yang diperoleh memiliki dasar statistik yang memadai. Secara keseluruhan, tabel ini memperlihatkan bahwa baik bias maupun variasi pengukuran meningkat seiring kenaikan temperatur, sehingga penerapan koreksi dan evaluasi ketidakpastian menjadi sangat penting. Nilai bias error berkisar antara $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada titik pengukuran $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, sensor DHT22 menunjukkan bias negatif sebesar $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang menandakan pembacaan sensor lebih rendah dibandingkan termometer digital. Pada temperatur $26\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$, bias error relatif kecil, yaitu sekitar $0,2\text{--}0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Namun, pada temperatur yang lebih tinggi, bias error meningkat secara signifikan, mencapai $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada $32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan maksimum sebesar $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada $41\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nilai bias ini menegaskan adanya penyimpangan sistematis yang meningkat seiring dengan kenaikan temperatur. Nilai deviasi standar berada pada rentang $0,01$ hingga $1,96$. Deviasi standar yang sangat kecil, seperti $0,01\text{--}0,09$ pada temperatur $26\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$, menunjukkan variasi pengukuran yang rendah dan repeatability yang baik. Sebaliknya, pada temperatur $38\text{--}44\text{ }^{\circ}\text{C}$, deviasi standar meningkat hingga $0,64\text{--}1,96$, yang menandakan fluktuasi pengukuran yang lebih besar pada temperatur tinggi.

Nilai ketidakpastian yang ditunjukkan pada kolom u_A , u_B , dan u_C mencerminkan kontribusi gabungan dari variasi statistik pengukuran, spesifikasi alat referensi, resolusi sensor, dan faktor lingkungan. Ketidakpastian gabungan (u_C) berada pada kisaran sekitar $0,17$ hingga $0,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada temperatur rendah hingga menengah, dan meningkat pada temperatur yang lebih tinggi. Peningkatan ini konsisten dengan bertambahnya bias error dan deviasi standar, yang secara matematis memperbesar nilai ketidakpastian gabungan melalui metode akar jumlah kuadrat.

Gabungan analisis kualitatif dan kuantitatif menunjukkan bahwa kinerja sensor DHT22 dipengaruhi secara signifikan oleh temperatur operasional. Pada temperatur rendah hingga menengah, sensor menunjukkan performa yang relatif stabil dengan bias dan ketidakpastian yang kecil. Namun, pada temperatur tinggi, terjadi peningkatan bias dan variasi pengukuran yang berdampak langsung pada besarnya ketidakpastian. Temuan ini menegaskan bahwa kalibrasi berbasis regresi linier dan evaluasi ketidakpastian merupakan langkah esensial untuk meningkatkan keandalan penggunaan sensor DHT22, khususnya pada aplikasi pemantauan temperatur yang mencakup rentang temperatur menengah hingga tinggi.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil melakukan kalibrasi sensor temperatur digital DHT22 menggunakan termometer digital terkalibrasi sebagai alat referensi, serta mengevaluasi ketidakpastian pengukuran yang dihasilkan secara kuantitatif. Prosedur kalibrasi yang diterapkan melalui metode perbandingan langsung dan mengacu pada prinsip-prinsip dasar ISO/IEC 17025 terbukti mampu mengidentifikasi penyimpangan sistematis pada pembacaan sensor serta menghasilkan hubungan matematis yang konsisten antara pembacaan sensor DHT22 dan nilai temperatur acuan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebelum dilakukan kalibrasi, sensor DHT22 mengalami bias pengukuran yang bergantung pada temperatur, dengan nilai galat berkisar antara $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bias pengukuran relatif kecil pada temperatur rendah hingga menengah, namun meningkat secara signifikan pada temperatur menengah hingga tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penggunaan sensor DHT22 tanpa proses kalibrasi berpotensi menghasilkan data temperatur yang kurang akurat, khususnya pada aplikasi dengan rentang temperatur yang luas. Namun demikian, hubungan linier yang sangat kuat antara pembacaan sensor dan alat referensi, yang ditunjukkan oleh koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,998$, menunjukkan bahwa galat sistematis tersebut dapat dimodelkan dan dikompensasi secara efektif melalui penerapan persamaan koreksi berbasis regresi linier.

Analisis ketidakpastian pengukuran menunjukkan bahwa ketidakpastian gabungan (u_C) hasil kalibrasi berada pada kisaran sekitar $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $0,54\text{ }^{\circ}\text{C}$, dengan kecenderungan meningkat seiring dengan kenaikan temperatur. Ketidakpastian tipe B yang berasal dari alat referensi memberikan kontribusi signifikan, dengan nilai ketidakpastian alat referensi berada pada kisaran $\pm 0,23\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan ketidakpastian tipe A yang berasal dari variasi pengukuran berulang pada sensor DHT22 turut memberikan kontribusi dominan pada temperatur yang lebih tinggi. Kontribusi ketidakpastian resolusi sensor dan faktor

lingkungan relatif lebih kecil dibandingkan kedua komponen tersebut.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sensor DHT22 yang telah dikalibrasi dan dikoreksi mampu menghasilkan data temperatur dengan tingkat akurasi menengah dan ketidakpastian pengukuran yang terdefinisi secara metrologis. Dengan mempertimbangkan nilai galat dan ketidakpastian yang diperoleh, sensor DHT22 yang telah dikalibrasi layak digunakan pada aplikasi pemantauan temperatur lingkungan, sistem kendali non-kritis, serta aplikasi berbasis Internet of Things yang tidak menuntut akurasi tinggi. Pendekatan kalibrasi dan analisis ketidakpastian yang digunakan bersifat umum dan dapat direplikasi pada sensor temperatur digital sejenis, dengan memperhatikan karakteristik ketidakpastian peralatan dan kondisi pengujian yang digunakan.

KONTRIBUSI PENULIS

Viki Sandia Yudha berperan sebagai penulis utama yang bertanggung jawab atas perumusan konsep dan desain penelitian, pelaksanaan eksperimen kalibrasi sensor, analisis data, serta penyusunan dan revisi naskah artikel. Fajri Mardawan berkontribusi dalam pengembangan metodologi penelitian, pengolahan data hasil pengukuran, dan penelaahan kritis terhadap isi naskah. Ramadhani berperan dalam pelaksanaan eksperimen, pengambilan data, serta verifikasi hasil pengukuran. Yusuf Rizky Ferdiansyah memberikan kontribusi pada analisis regresi, perhitungan galat dan ketidakpastian pengukuran, serta penyusunan bagian hasil dan pembahasan. Rafli Fatah Al Munawar berkontribusi dalam perancangan sistem akuisisi data berbasis mikrokontroler dan dokumentasi prosedur eksperimen. Januar Ghani M berperan dalam penelaahan literatur, penyelarasan naskah dengan standar penulisan ilmiah, serta penyuntingan bahasa. Toto Supriyono berkontribusi sebagai pembimbing akademik dengan memberikan arahan konseptual, evaluasi metodologi, serta validasi keseluruhan isi artikel. Seluruh penulis telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah yang diajukan untuk publikasi.

REFERENSI

- [1] A. Setiawan, M.A. Hariyono, A.F. Habibi, R. Rizkiansyah, and Z. 'Izzatun Nisa, Rancang Bangun Alat Kalibrasi Thermogun Berbasis Arduino Uno, *JEMPOL: Jurnal Elektronik Mahasiswa Polanka*, (2024). <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:281045707>.
- [2] R. Pratama, Pengembangan Sistem Akuisisi Data Arus, Tegangan, Daya Dan Temperatur Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya, *Jurnal Edukasi Elektro*, Vol.3, (2020) pp.55–62. <https://doi.org/10.21831/jee.v3i2.29812>.

- [3] R. Kusumah, H.I. Islam, and S. Sobur, Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Berbasis Internet of Things (IoT) Pada Ruang Data Center, *Journal of Applied Informatics and Computing*, Vol.7, (2023) pp.82–88. <https://doi.org/10.30871/jaic.v7i1.5199>.
- [4] T. Supriyono, G. Omar, N. Tamaldin, B. Ariantera, M. Yamin, M.R. Sumartono, and D.A.R. Wati, Investigation of Operating Temperature as a Key Factor in Determining Photovoltaic Module Cooling Specifications Investigation of Operating Temperature as a Key Factor in Determining Photovoltaic Module Cooling Specifications, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.2972 (2025, (2025) pp.012–019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2972/1/012019>.
- [5] T. Supriyono, G. Omar, N. Tamaldin, P. Soetikno, M.R. Sumartono, A. Romano, and M. Yamin, Performance comparison of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules before testing with a cooling system, *Cogent Engineering*, Vol.11, (2024). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2430426>.
- [6] Noname, Ketidakpastian pengukuran, 2020.
- [7] S. herayanti, lisna, basri arsy, rafika rahmatia, ridwan, Dasar pengukuran dan ketidakpastian, *Dasar Pengukuran Dan Ketidakpastian Pengukuran*, (2014) pp.1–8.
- [8] P. Pandiangan, Ketidakpastian dan Pengukuran, *Praktikum IPA*, (2018) pp.1–35. <http://repository.ut.ac.id/4772/1/PEPA4203-M1.pdf>.
- [9] M.F.A. Razak, M.Z. Hasan, J.A.M. Jobran, and S.A.S. Jamalli, Monitoring and Controlling Solar Photovoltaic (PV) Performance with Active Cooling System using IoT, *Journal of Physics: Conference Series*, (2021). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2107/1/012001>.
- [10] L. Chen, L. Liu, S. Liu, Z. Shi, and C. Shi, Internet of Things (IoT) Sensors for Water Quality Monitoring in Aquaculture Systems: A Systematic Review and Bibliometric Analysis, *ACS ES and T Water*, Vol.17, (2025) pp.1–25. <https://doi.org/10.3390/rs17040667>.
- [11] M. Uzair, S. Al-Kafrawi, K. Al-Janadi, and I. Al-Bulushi, A Low-Cost, Real-Time Rooftop IoT-Based Photovoltaic (PV) System for Energy Management and Home Automation, *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, Vol.119, (2022) pp.83–101. <https://doi.org/10.32604/EE.2022.016411>.
- [12] Bisaioti, Esp32 dan DHT11, *Bisaioti*, (2025) pp.1. <https://bisaioti.com/dht11-esp32-temperature-humidity/>.
- [13] I. Suwandi, Perancangan Sistem Pengukuran Suhu Dan Kelembaban Otomatis Dengan Md_Parola Dan Sensor Dht22, *Journal Of Power Electric And Renewable Energy*, Vol.1, (2024) pp.30–37. <https://doi.org/10.59811/jper.v1i2.88>.
- [14] S.A. Putri, A.T. Agus Salim, R.M. Bisono, B. Indarto, and R.T. Nurdiansyah, Rancang Bangun Alat Ukur Temperatur dan Kelembapan Sistem Pengkondisi Udara pada Kereta Rel Diesel Elektrik, *TELKA - Telekomunikasi Elektronika Komputasi Dan Kontrol*, Vol.8, (2022) pp.126–137. <https://doi.org/10.15575/telka.v8n2.126-137>.
- [15] A. iriawan pratama Aji, Sistem Monitoring Dan Otomatisasi Kelembaban Tanah Udara Dan Suhu Pada Bayam Berbasis Android, *Computer Based Information System Journal*, Vol.9, (2021) pp.26–34. <https://doi.org/10.33884/cbis.v9i2.4448>.
- [16] J.K. Khairina, Sistem Monitoring Pembersihan Kotoran Dan Pengaturan Suhu Kandang Kelinci Berbasis Raspberry Pi, *Journal of Artificial Intelligence and Software Engineering (J-AISE)*, Vol.2, (2022) pp.1–5. <https://doi.org/10.30811/jaise.v2i1.3085>.
- [17] Y.A. Kurnia Utama, Perbandingan Kualitas Antar Sensor Suhu dengan Menggunakan Arduino Pro Mini, *E-NARODROID*, Vol.2, (2016). <https://doi.org/10.31090/narodroid.v2i2.210>.
- [18] F. Outferdine, K. Cherifi, D. Belkhiri, B. Bouachrine, and M. Ajaamoum, Implementation of a low-cost intelligent street light system using internet of things, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, Vol.33, (2024) pp.1387. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i3.pp1387-1396>.

- [19] S. Sidopekso, H. Nasbey, and A. Wibowo, Pengukuran I-V dengan Menggunakan Sun Simulator Sederhana, Vol.2, (2011) pp.79–82. https://elektro.pnj.ac.id/upload/artikel/files/03_Edit&Layout_Satwiko_JEE-Sept2011_Pengukuran I-V.pdf.
- [20] E.Y. Yulianto, Kalibrasi transduser tekanan, laju aliran, suhu dan level air pada sistem instrumentasi proteksi reaktor, *Brin Repository*, (n.d.) pp.105–120. <https://karya.brin.go.id/id/eprint/8495>.
- [21] Kalibrasi, Mengenal Standar Kalibrasi yang Biasa Digunakan di Perusahaan, *Kalibrasi*, (2023). <https://news.kalibrasi.com/standar-kalibrasi/>.
- [22] N.T. Harjanto, Ketidakpastian Pengukuran Kekasaran Permukaan Kelongsong Bahan Bakar Nuklir dengan Roughness Tester Surtronic-25, *PIN Pengelolaan Instalasi Nuklir*, Vol.8, (201AD) pp.17–24. <http://jurnal.batan.go.id/index.php/pin/article/view/2487>.
- [23] A.K. Adeleke, D.J.P. Montero, K.A. Olu-lawal, and O.K. Olajiga, Statistical techniques in precision metrology, applications and best practices, *Engineering Science & Technology Journal*, Vol.5, (2024) pp.888–900. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.944>.
- [24] A. Grous, Applied Metrology for Manufacturing Engineering, 1st ed., Wiley, Hoboken, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118622551>.
- [25] Y. Hu, Y. Chu, Q. Wang, Z. Zhang, Y. Ming, A. Mei, Y. Rong, and H. Han, Standardizing Perovskite Solar Modules beyond Cells, *Joule*, Vol.3, (2019) pp.2076–2085. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.08.015>.
- [26] J.C.F.G.I. Metrology, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, *International Organization for Standardization Geneva ISBN*, Vol.50, (2008) pp.134. <http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>.