

Kalibrasi dan Analisis Ketidakpastian Termokopel Tipe K Menggunakan Metode Perbandingan

Toto Supriyono, Hery Sonawan, Fachrul Sidik Riantono, Mi'raj Novahardi, M. R. Sumartono

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Pasundan, Bandung
Email: supriyono.toto@unpas.ac.id

Abstrak. Kalibrasi alat ukur temperatur merupakan langkah penting untuk memastikan akurasi dan keandalan pengukuran. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kalibrasi dan analisis ketidakpastian termokopel tipe K menggunakan metode perbandingan sesuai standar ASTM E220. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan temperatur dari sembilan termokopel tipe K terhadap termometer kaca sebagai acuan dalam sistem pemanas air pada rentang temperatur 25 °C hingga 100 °C. Data temperatur direkam menggunakan data logger dengan interval 30 detik, sedangkan pembacaan termometer kaca dilakukan melalui perekaman video untuk meningkatkan ketelitian observasi. Pengukuran dilakukan secara berulang sebanyak sembilan kali untuk memperoleh data yang representatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai ketidakpastian pengukuran termokopel berada pada rentang 0,3 °C hingga 0,6 °C, yang mendekati nilai acuan standar ASTM sebesar $\pm 0,5$ °C. Nilai akurasi termokopel diperoleh dalam kisaran 0,53% hingga 1,10%. Selain itu, nilai error rata-rata termokopel terhadap termometer kaca berada pada rentang 1,9% hingga 2,1% untuk pembandingan pertama dan 2,4% hingga 3,2% untuk pembandingan kedua. Hasil ini juga menunjukkan bahwa metode perbandingan mampu memberikan kinerja kalibrasi yang baik dan dapat digunakan sebagai pendekatan praktis dalam analisis ketidakpastian pengukuran temperatur, khususnya pada aplikasi sistem termal seperti manajemen termal modul fotovoltaik.

Kata kunci, Kalibrasi, termokopel tipe K, termometer kaca, ketidakpastian, ketelitian

1 Pendahuluan

Pengukuran temperatur merupakan parameter penting dalam berbagai aplikasi teknik dan sains, khususnya pada sistem termal, proses industri, serta pengembangan teknologi energi terbarukan [1–4]. Akurasi pengukuran temperatur sangat berpengaruh terhadap kualitas analisis, efisiensi sistem, serta keandalan hasil penelitian [2,5]. Oleh karena itu, instrumen pengukuran temperatur harus memiliki

sensitivitas yang baik serta melalui proses kalibrasi yang tepat untuk memastikan validitas data pengukuran. Salah satu sensor temperatur yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi adalah termokopel tipe K karena memiliki rentang pengukuran yang luas, ketahanan terhadap kondisi lingkungan ekstrem, serta biaya yang relatif ekonomis.

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, termokopel tipe K tetap memiliki keterbatasan dalam hal akurasi dan stabilitas pengukuran. Karakteristik respon sensor dapat dipengaruhi oleh faktor degradasi material, variasi manufaktur, serta kondisi lingkungan operasi [6,7]. Oleh karena itu, proses kalibrasi diperlukan untuk memastikan bahwa nilai temperatur yang diukur mendekati nilai sebenarnya. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran instrumen dengan standar acuan yang memiliki tingkat ketelitian lebih tinggi [4,8].

Berbagai metode kalibrasi temperatur telah dikembangkan, di antaranya metode titik tetap (*fixed-point calibration*) dan metode perbandingan (*comparison method*). Metode titik tetap memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi karena menggunakan referensi temperatur yang terdefinisi secara internasional, namun membutuhkan peralatan khusus dan biaya yang relatif tinggi. Sebaliknya, metode perbandingan menawarkan pendekatan yang lebih sederhana dan fleksibel dengan membandingkan sensor uji terhadap instrumen referensi dalam kondisi lingkungan yang sama, sehingga lebih praktis untuk penelitian laboratorium dan aplikasi teknik [2,9,10].

Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan bahwa metode perbandingan mampu menghasilkan akurasi pengukuran yang baik apabila dilakukan dengan prosedur yang tepat. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut hanya menitikberatkan pada nilai deviasi atau error pengukuran tanpa disertai analisis ketidakpastian secara komprehensif. Dalam metrologi modern, analisis ketidakpastian merupakan komponen penting karena memberikan informasi kuantitatif mengenai tingkat kepercayaan terhadap hasil pengukuran. Pendekatan ini umumnya mengacu pada pedoman *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)* yang mengklasifikasikan ketidakpastian menjadi tipe A dan tipe B [11,12].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan kalibrasi serta analisis ketidakpastian pengukuran termokopel tipe K menggunakan metode perbandingan pada sistem pemanas air. Sebanyak sembilan termokopel dikalibrasi secara simultan terhadap termometer kaca sebagai instrumen referensi pada rentang temperatur 25 °C hingga 100 °C. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan evaluasi terhadap tingkat akurasi, error, serta ketidakpastian pengukuran termokopel dalam kondisi eksperimen yang representatif serta memberikan pendekatan kalibrasi yang praktis untuk aplikasi sistem termal.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan sembilan sensor termokopel tipe K sebagai sensor uji untuk mengukur temperatur. Sebagai instrumen referensi digunakan dua termometer kaca yang berfungsi sebagai pembanding dalam proses kalibrasi. Sistem akuisisi data menggunakan data logger temperatur yang mampu merekam data pengukuran secara kontinu. Media kalibrasi yang digunakan adalah air yang dipanaskan menggunakan ketel pemanas air untuk menghasilkan variasi temperatur secara bertahap. Selain itu, smartphone digunakan sebagai perangkat perekam untuk mendokumentasikan pembacaan temperatur pada termometer kaca sehingga dapat meningkatkan ketelitian observasi selama proses eksperimen.

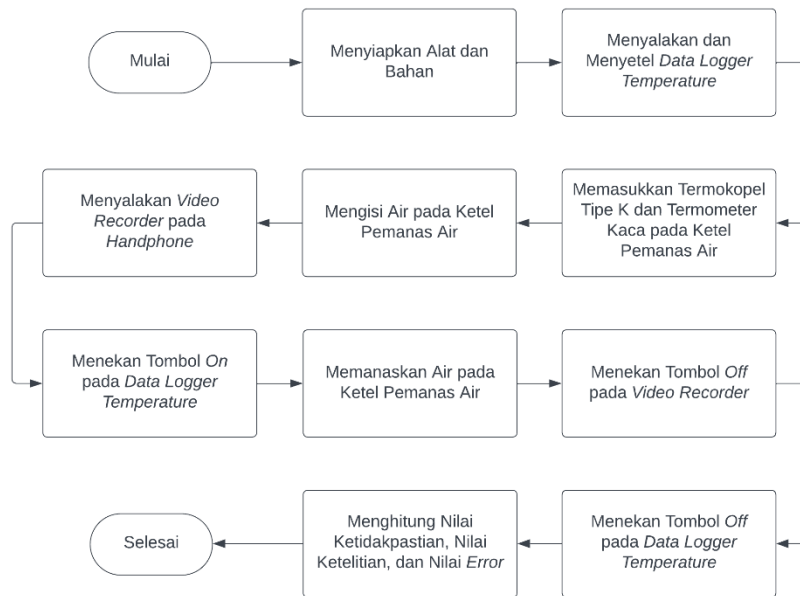
2.2. Metode

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kalibrasi perbandingan (comparison method), yaitu dengan membandingkan hasil pengukuran termokopel tipe K terhadap instrumen referensi pada kondisi lingkungan yang sama. Seluruh sensor temperatur, yaitu sembilan termokopel tipe K dan dua termometer kaca, ditempatkan di dalam media air pada ketel pemanas dengan posisi yang relatif seragam untuk memastikan kondisi termal yang identik.

Proses eksperimen dimulai dengan menyalakan sistem akuisisi data pada data logger untuk merekam temperatur dari masing-masing termokopel dengan interval pencatatan 30 detik. Selanjutnya, ketel pemanas diaktifkan sehingga temperatur air meningkat secara bertahap dari temperatur awal sekitar 25 °C hingga mendekati 100 °C. Selama proses pemanasan berlangsung, pembacaan temperatur referensi pada termometer kaca direkam menggunakan smartphone untuk meminimalkan kesalahan pembacaan visual.

Pengujian dilakukan secara berulang sebanyak sembilan kali untuk memperoleh data yang lebih representatif. Data temperatur yang dianalisis diambil pada beberapa titik temperatur acuan, yaitu 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, dan 70 °C.

Analisis ketidakpastian pengukuran dilakukan berdasarkan pedoman Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). Ketidakpastian tipe A dihitung dari variasi statistik data pengukuran berulang, sedangkan ketidakpastian tipe B diperoleh dari resolusi instrumen dan spesifikasi alat ukur. Kedua komponen tersebut kemudian digabungkan untuk memperoleh ketidakpastian gabungan, yang selanjutnya dikalikan dengan faktor cakupan $k = 2$ untuk mendapatkan ketidakpastian diperluas dengan tingkat kepercayaan sekitar 95%. Selain itu, dilakukan perhitungan error relatif antara hasil pengukuran termokopel dan temperatur referensi untuk mengevaluasi tingkat akurasi sensor.



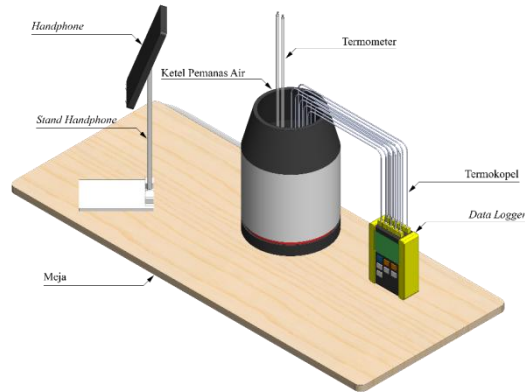
Gambar 1. Proses kalibrasi termokopel

2.3. Experimental Setup

Pengaturan eksperimen dirancang untuk melakukan kalibrasi beberapa sensor temperatur menggunakan sistem pemanasan berbasis media air. Penelitian ini menggunakan sembilan sensor termokopel tipe K sebagai sensor uji, sedangkan dua termometer kaca digunakan sebagai instrumen referensi. Seluruh termokopel dihubungkan dengan data logger temperatur yang berfungsi untuk merekam data pengukuran secara kontinu selama proses eksperimen berlangsung.

Media pemanasan yang digunakan adalah ketel pemanas air yang berfungsi untuk menghasilkan peningkatan temperatur secara bertahap dan terkendali. Seluruh sensor temperatur ditempatkan di dalam volume air yang sama untuk memastikan kondisi termal yang seragam serta meminimalkan pengaruh variasi lingkungan. Posisi termokopel dan termometer kaca diatur pada kedalaman dan jarak yang relatif sama di dalam ketel pemanas untuk mengurangi kemungkinan terjadinya bias pengukuran akibat gradien temperatur.

Untuk meningkatkan ketelitian pembacaan temperatur referensi, sebuah smartphone ditempatkan pada posisi tetap untuk merekam skala pembacaan pada termometer kaca selama eksperimen berlangsung. Metode perekaman ini memungkinkan proses verifikasi pembacaan temperatur referensi secara lebih akurat pada tahap analisis data.



Gambar 2. Setup proses kalibrasi

2.4. Prosedur Kalibrasi

Proses kalibrasi dilakukan menggunakan metode perbandingan (comparison method), yaitu dengan membandingkan hasil pengukuran temperatur dari termokopel terhadap instrumen referensi pada kondisi termal yang sama [2], [9], [10]. Eksperimen dimulai dengan mengaktifkan sistem akuisisi data pada data logger untuk merekam temperatur dari setiap termokopel dengan interval pencatatan 30 detik.

Selanjutnya, ketel pemanas diaktifkan sehingga temperatur air meningkat secara bertahap dari temperatur awal sekitar 25 °C hingga mendekati 100 °C. Selama proses pemanasan berlangsung, data temperatur dari termokopel secara otomatis tersimpan dalam data logger, sementara pembacaan temperatur referensi pada termometer kaca direkam menggunakan kamera smartphone.

Setiap percobaan dilakukan secara berulang sebanyak sembilan kali untuk memperoleh data yang lebih representatif secara statistik. Dalam proses analisis data, beberapa titik temperatur acuan dipilih, yaitu 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, dan 70 °C, yang mewakili rentang temperatur yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi termal.

2.5. Analisis Ketidakpastian

Analisis ketidakpastian dilakukan mengacu pada pendekatan Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), yang mengklasifikasikan ketidakpastian menjadi dua komponen utama [13–16]:

a. Ketidakpastian Tipe A (Statistik)

Ketidakpastian tipe A dihitung berdasarkan variasi data hasil pengukuran berulang menggunakan standar deviasi:

$$u_A = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

di mana:

s = standar deviasi
n = jumlah data

b. Ketidakpastian Tipe B (Non-Statistik)

Ketidakpastian tipe B diperoleh dari spesifikasi alat dan resolusi instrumen, meliputi: Resolusi data logger, ketelitian termometer kaca, kesalahan pembacaan visual. Ketidakpastian tipe B dihitung sebagai:

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

di mana Δ adalah batas ketelitian alat.

c. Ketidakpastian Gabungan

Ketidakpastian gabungan dihitung dengan:

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

d. Ketidakpastian Diperluas

Ketidakpastian diperluas dihitung menggunakan faktor cakupan $k = 2$ (tingkat kepercayaan 95%):

$$u = k \cdot u_C \quad (4)$$

e. Perhitungan Error dan Akurasi

Error relatif dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$e = \frac{(T_{tc} - T_{ref})}{T_{ref}} \times 100\% \quad (5)$$

3 Hasil dan Pembahasan

Data pengukuran temperatur yang diperoleh dari termokopel tipe K dan termometer kaca dianalisis berdasarkan tiga variabel utama, yaitu nilai ketidakpastian, ketelitian, dan error. Temperatur yang digunakan dalam perhitungan meliputi lima titik acuan, yaitu 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, dan 70 °C. Tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan ketidakpastian temperatur rata-rata yang diperoleh menggunakan Persamaan (1) hingga Persamaan (5).

Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidakpastian pengukuran termokopel tipe K berada pada rentang 0,2 °C hingga 0,8 °C, dengan nilai rata-rata masing-masing sensor berkisar antara 0,3 °C hingga 0,6 °C. Secara umum, sebagian besar termokopel memiliki ketidakpastian rata-rata sekitar 0,4 °C–0,5 °C, yang menunjukkan konsistensi pengukuran yang cukup baik.

Termokopel 1 dan Termokopel 2 menunjukkan nilai ketidakpastian rata-rata tertinggi, yaitu sekitar 0,6 °C, dengan fluktuasi yang lebih besar pada beberapa titik temperatur, khususnya pada 50 °C dan 70 °C. Sebaliknya, Termokopel 4 menunjukkan performa paling stabil dengan ketidakpastian rata-rata terendah sebesar 0,3 °C serta variasi yang relatif kecil pada seluruh rentang temperatur pengujian.

Secara umum, tidak ditemukan peningkatan ketidakpastian yang signifikan seiring kenaikan temperatur, meskipun pada beberapa sensor terdapat kecenderungan peningkatan pada temperatur yang lebih tinggi. Hal ini kemungkinan dipengaruhi oleh gradien temperatur dalam fluida, respon dinamis sensor, serta distribusi panas yang tidak sepenuhnya homogen di dalam ketel pemanas.

Secara keseluruhan, nilai ketidakpastian yang diperoleh masih berada di sekitar batas yang direkomendasikan oleh standar ASTM ($\pm 0,5$ °C). Hal ini menunjukkan bahwa metode kalibrasi perbandingan yang digunakan dalam penelitian ini mampu memberikan hasil pengukuran yang cukup andal, meskipun tetap terdapat variasi performa antar sensor sehingga kalibrasi individual dan evaluasi ketidakpastian tetap diperlukan untuk menjamin keandalan pengukuran temperatur.

Tabel 1. Ketidakpastian temperatur rata-rata (°C)

Tempertaur Acuan	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	Rata-rata
Termokopel 1 (°C)	0.6	0.4	0.7	0.4	0.8	0.6
Termokopel 2 (°C)	0.3	0.6	0.7	0.4	0.6	0.6
Termokopel 3 (°C)	0.4	0.5	0.7	0.4	0.6	0.5
Termokopel 4 (°C)	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.3
Termokopel 5 (°C)	0.4	0.2	0.5	0.4	0.5	0.4
Termokopel 6 (°C)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.4
Termokopel 7 (°C)	0.2	0.4	0.4	0.5	0.6	0.5
Termokopel 8 (°C)	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.4
Termokopel 9 (°C)	0.2	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4

Tabel 2. Ketelitian temperatur rata-rata (%)

Temperatur Acuan	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	Rata-rata
Termokopel 1 (%)	1.8	0.9	1.3	0.7	1.1	1.0
Termokopel 2 (%)	1.0	1.6	1.4	0.7	0.8	1.1
Termokopel 3 (%)	1.4	1.2	1.4	0.7	0.8	1.0
Termokopel 4 (%)	1.4	0.9	0.6	0.4	0.3	0.5
Termokopel 5 (%)	1.2	0.4	1.0	0.6	0.8	0.7
Termokopel 6 (%)	1.0	0.7	0.6	0.5	0.8	0.7
Termokopel 7 (%)	0.5	1.1	0.7	0.9	0.9	0.9
Termokopel 8 (%)	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8	0.8
Termokopel 9 (%)	1.0	1.0	0.8	0.5	0.7	0.7

Nilai ketidakpastian temperatur dalam bentuk persentase, seperti disajikan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa seluruh termokopel tipe K memiliki kinerja yang relatif baik dengan rentang ketidakpastian rata-rata antara 0,5% hingga 1,1%. Secara umum, sebagian besar termokopel berada pada kisaran 0,7%–1,0%, yang mengindikasikan tingkat konsistensi dan keandalan pengukuran yang cukup tinggi. Termokopel 2 memiliki nilai ketidakpastian rata-rata tertinggi sebesar 1,1%, diikuti oleh Termokopel 1 dan 3 sebesar 1,0%, yang menunjukkan variasi pengukuran yang sedikit lebih besar dibandingkan sensor lainnya. Sebaliknya, Termokopel 4 menunjukkan performa terbaik dengan nilai ketidakpastian rata-rata terendah sebesar 0,5%, diikuti oleh Termokopel 5, 6, dan 9 dengan nilai sekitar 0,7%, yang mencerminkan stabilitas pengukuran yang lebih baik. Jika ditinjau terhadap variasi temperatur, tidak terlihat tren peningkatan ketidakpastian yang signifikan seiring kenaikan temperatur, meskipun pada beberapa titik terdapat fluktuasi nilai yang dipengaruhi oleh kondisi eksperimental seperti distribusi panas yang tidak seragam dan respon dinamis sensor. Secara keseluruhan, nilai ketidakpastian ini menunjukkan bahwa termokopel tipe K yang digunakan masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi teknik, sehingga layak digunakan untuk pengukuran temperatur dengan tingkat presisi menengah.

Tabel 3. Error termokopel dibandingkan dengan termometer 1

Pengukuran	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)	T4 (%)	T5 (%)	T6 (%)	T7 (%)	T8 (%)	T9 (%)
1	1.3	1.5	1.2	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5
2	1.6	1.7	1.5	1.8	1.6	1.8	1.8	1.9	1.8
3	2.3	2.4	2.4	2.6	2.6	2.6	2.3	2.4	2.3
4	2.1	2.5	2.1	2.3	2.1	2.2	2.0	2.1	2.2
5	1.7	1.4	2.3	2.8	2.1	2.1	1.8	1.8	1.8
6	1.8	2.0	1.6	1.8	2.0	2.1	2.2	2.1	2.1
7	1.8	2.1	1.8	1.8	1.9	2.3	1.8	2.2	1.8
8	1.9	1.8	1.9	2.0	2.1	2.0	2.1	1.8	1.8
9	2.5	2.3	2.4	2.6	2.8	2.7	2.3	2.6	2.4
Rata-rata	1.9	2.0	1.9	2.1	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0

Tabel 4. Error termokopel dibandingkan dengan termometer 2

Pengukuran	T1 (%)	T2 (%)	T3 (%)	T4 (%)	T5 (%)	T6 (%)	T7 (%)	T8 (%)	T9 (%)
1	2.3	2.0	2.1	2.2	2.4	2.5	2.3	2.3	2.0
2	2.9	2.0	2.8	2.8	3.0	3.3	2.8	3.1	2.8
3	3.2	2.4	3.2	3.0	3.4	3.6	3.2	3.5	2.9
4	3.4	2.8	3.1	3.3	3.4	3.5	3.0	3.4	3.2
5	2.5	2.3	3.4	3.9	3.1	3.1	2.7	2.6	2.7
6	2.4	2.3	2.4	2.8	3.1	2.6	2.4	2.4	2.4
7	2.7	2.0	2.9	3.2	3.1	2.8	2.7	2.7	2.8
8	2.5	2.3	2.7	2.9	3.1	2.7	2.5	2.5	2.5
9	3.8	3.4	3.6	4.1	4.2	4.0	3.4	3.9	3.7
Rata-rata	2.9	2.4	2.9	3.1	3.2	3.1	2.8	2.9	2.8

Nilai error temperatur rata-rata termokopel tipe K terhadap termometer kaca 1 yang ditunjukkan pada Tabel 3 berada pada rentang 1,9%–2,1%, yang menunjukkan penyimpangan relatif kecil dan konsisten. Sebagian besar termokopel memiliki error sekitar 1,9%–2,0%, sedangkan T4, T5, dan T6 sedikit lebih tinggi yaitu sekitar 2,1%. Peningkatan error pada beberapa titik pengukuran, terutama pengukuran ke-3 dan ke-9, kemungkinan dipengaruhi oleh fluktuasi temperatur fluida, distribusi panas yang tidak merata, serta respon dinamis sensor. Secara keseluruhan, nilai error sekitar 2% menunjukkan bahwa hasil kalibrasi terhadap referensi pertama masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi teknik.

Sementara itu, Tabel 4 menunjukkan bahwa error temperatur terhadap termometer kaca 2 lebih besar, yaitu pada rentang 2,4%–3,2%. Sebagian besar termokopel memiliki error di atas 2,8%, dengan nilai tertinggi pada T5 sebesar 3,2%, sedangkan nilai terendah terdapat pada T2 sebesar 2,4%. Peningkatan error pada beberapa pengukuran, terutama pada temperatur yang lebih tinggi, menunjukkan adanya pengaruh distribusi temperatur yang tidak homogen, respon termal sensor, serta kemungkinan ketidakakuratan instrumen referensi kedua.

Hasil kalibrasi juga menunjukkan bahwa nilai ketidakpastian pengukuran berada pada rentang 0,3 °C–0,6 °C atau sekitar 0,5%–1,1%, yang masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi teknik menengah. Berdasarkan pendekatan GUM [11], [12], nilai tersebut merupakan kombinasi ketidakpastian tipe A dari pengukuran berulang dan tipe B dari spesifikasi instrumen.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa termokopel tipe K yang dikalibrasi dengan metode perbandingan dapat digunakan secara andal dalam sistem termal, meskipun kualitas instrumen referensi dan kondisi distribusi panas tetap berpengaruh terhadap hasil kalibrasi. Pendekatan kalibrasi simultan beberapa sensor dalam satu sistem termal juga memberikan evaluasi konsistensi sensor yang lebih komprehensif.

4 Kesimpulan

Hasil kalibrasi sembilan termokopel tipe K pada rentang temperatur 30 °C–70 °C menunjukkan bahwa nilai ketidakpastian pengukuran berada pada kisaran 0,3 °C–0,6 °C atau sekitar 0,5%–1,1%, yang masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk aplikasi teknik. Nilai error terhadap termometer kaca pertama berkisar 1,9%–2,1%, sedangkan terhadap termometer kaca kedua berada pada kisaran 2,4%–3,2%, yang menunjukkan adanya perbedaan tingkat keandalan instrumen referensi.

Secara umum, sebagian besar termokopel menunjukkan performa pengukuran yang stabil dengan variasi error yang relatif kecil. Oleh karena itu, metode kalibrasi perbandingan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dinilai cukup efektif dan andal untuk mengevaluasi kinerja sensor temperatur pada skala laboratorium.

Referensi

- [1] N. Abdurrojaq, K. Ginanjar, W.N. Hidayat, G.A. Adwitiya, R. Zaelani, R. Anggarani, C.S. Wibowo, and N.A. Fathurrahman, Pengaruh Metanol Dan Etanol Terhadap Sifat Penguapan Bensin Ron 92: Pengukuran Tekanan Uap Dengan Metode Reid Dan Dry, *Jurnal Teknologi*, Vol.9, (2021) pp.32–41. <https://doi.org/10.31479/jtek.v9i1.112>.
- [2] B. Soerachman, A.N. Sidiqa, and H. Endrowahyudi, Perbandingan akurasi pengukuran panjang kerja menggunakan metode radiografi dan elektronik pada perawatan endotonik, *Jurnal Ilmiah Dan Teknologi Kedokteran Gigi*, Vol.18, (2022) pp.51–56. <https://doi.org/10.32509/jitek.v18i2.2034>.
- [3] T. Supriyono, Pengukuran Teknik, 1st ed., Bandung, Indonesia, 2019.
- [4] V.S. Yudha, F. Mardawan, Y.R. Ferdiansyah, R. Fatah, and A. Munawar, Kalibrasi dan Analisis Ketidakpastian Pengukuran Sensor Temperatur DHT22 Menggunakan Termometer Digital Terkalibrasi sebagai Alat Referensi, *Kolecer, J*, Vol.1, (2025) pp.100–109.
- [5] Normah, B. Rifai, S. Vambudi, and R. Maulana, Analisa Sentimen Perkembangan Vtuber Dengan Metode Support Vector Machine Berbasis SMOTE, *Jurnal Teknik Komputer AMIK BSI*, Vol.8, (2022) pp.174–180. <https://doi.org/10.31294/jtk.v4i2>.
- [6] T. Supriyono, and B. Ariantara, Perancangan fuel gas treatment untuk PLTG, Vol.7, (2012) pp.129–132. [http://repository.unpas.ac.id/56945/1/Toto Supriyono 2012 Prosiding hal 129.pdf](http://repository.unpas.ac.id/56945/1/Toto%20Supriyono%202012%20Prosiding%20hal%20129.pdf).
- [7] A.Y. Nugraha, M.H. Kusuma, G. Giarno, and W. Wardoyo, Studi Eksperimen Pengaruh Beban Kalor Terhadap Unjuk Kerja Termal Model Loop Heat Pipe, *SIGMA EPSILON - Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir*, Vol.25, (2021) pp.84. <https://doi.org/10.17146/sigma.2021.25.2.6368>.
- [8] Kalibrasi, Mengenal Standar Kalibrasi yang Biasa Digunakan di Perusahaan, *Kalibrasi*, (2023). <https://news.kalibrasi.com/standar-kalibrasi/>.
- [9] S. Sabaniah, R.P. Agus Setiawan, W. Hermawan, and L. Saulia, Rancang Bangun

- Dan Pengujian Alat Tanam Murbei, *Jurnal Agritechno*, (2022) pp.85–91. <https://doi.org/10.20956/at.vi.701>.
- [10] 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>.
- [11] 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>.
- [12] JCGM106:2020, Guide to the expression of uncertainty in measurement - Part 6: Developing and using measurement models, *International Organization for Standardization Geneva*, Vol.JCGM GUM-6, (2020) pp.1–103. <https://www.bipm.org/en/publications/guides>.
- [13] T. Supriyono, B. Ariantara, M. Afzanizam, Sugiharto, M.S. Permana, F. Reynaldi, A. Mohd, N. Tamaldin, G. Omar, M. Shaahir, et al., Thermal performance analysis of passive cooling for a photovoltaic module using an artificial heat source, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol.3186, (2026) pp.1–16. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/3186/1/012044>.
- [14] T. Supriyono, G. Omar, N. Tamaldin, B. Ariantara, M. Yamin, M.R. Sumartono, and D.A.R. Wati, 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>.
- [15] V.S. Yudha, T. Supriyono, Y.R. Ferdiansyah, F. Mardawan, and R.F. Al Munawar, Kalibrasi dan analisis ketidakpastian pengukuran sensor temperatur DHT22 menggunakan termometer digital terkalibrasi sebagai alat referensi, *KOLECER Scientific Journal of Mechanical Engineering*, Vol.1, (2025) pp.100–109. <https://doi.org/https://doi.org/10.23969/ksjme.v1i2.39427>.
- [16] 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>.