

Ketidakpastian Pengukuran Temperatur Udara Berpendingin Menggunakan HIOKI LR8450 Pada Rack server Data Center BRIN

Arif Cahyono Dwi Nugroho^{ab}*, Berkah Fajar Tamomo Kiono^a, Tony Suryo Utomo^a, Muhammad Penta Helios^b, Dani Ramdani^c, Didi Tri Wibowo^b

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Tembalang, Semarang 50275

^bBadan Riset dan Inovasi Nasional

^cProdi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pamulang
*E-mail: arifnugroho@students.undip.ac.id

Abstrak

Keandalan sistem pendinginan merupakan faktor kritis dalam menjaga kinerja dan keberlangsungan operasional data center. Salah satu aspek penting dalam pengelolaan sistem pendinginan adalah akurasi dan keandalan pengukuran suhu yang digunakan sebagai dasar pengendalian dan evaluasi kinerja *Precision Air Conditioning (PAC)*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis ketidakpastian pengukuran suhu perangkat PAC pada data center dengan menggunakan pendekatan *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*. Pengukuran suhu dilakukan pada sepuluh titik inlet (Tci) dan sepuluh titik outlet (Tco) perangkat PAC dengan jumlah data yang besar dan relatif seragam pada setiap titik pengamatan. Analisis ketidakpastian mencakup ketidakpastian tipe A dan tipe B, yang meliputi kontribusi resolusi alat ukur, akurasi sensor, resolusi pembacaan, kalibrasi, serta pengaruh lingkungan. Seluruh komponen ketidakpastian digabungkan untuk memperoleh nilai ketidakpastian gabungan dan ketidakpastian diperluas (*expanded uncertainty*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai ketidakpastian gabungan (u_c) sebesar $0,312^\circ\text{C}$ dan ketidakpastian diperluas (U) sebesar $0,625^\circ\text{C}$ dengan faktor cakupan $k = 2$ bersifat konsisten pada seluruh titik pengukuran. Nilai rata-rata suhu *inlet* lebih tinggi dibandingkan dengan suhu *outlet*, yang mengindikasikan bahwa perangkat PAC berfungsi secara efektif dalam menurunkan suhu udara. Komponen ketidakpastian terbesar berasal dari akurasi sensor dan kalibrasi, sedangkan kontribusi dari resolusi alat ukur dan faktor lingkungan relatif kecil. Secara keseluruhan, tingkat ketidakpastian data pengukuran temperatur rack server yang diperoleh masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk menganalisa kinerja sistem pendingin di data center dan dapat dijadikan dasar yang andal dalam pengambilan keputusan terkait pengendalian suhu, evaluasi kinerja sistem pendinginan, serta peningkatan efisiensi operasional data center.

Kata kunci: data center, *Precision Air Conditioner*, ketidakpastian pengukuran, GUM, suhu

Abstract

Cooling system reliability is a critical factor in maintaining the performance and operational continuity of data centers. One crucial aspect of cooling system management is the accuracy and reliability of temperature measurements, which serve as the basis for controlling and evaluating Precision Air Conditioning (PAC) performance. This study aims to analyze the uncertainty of PAC device temperature measurements in data centers using the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) approach. Temperature measurements were conducted at ten inlet points (Tci) and ten outlet points (Tco) of the PAC device, with a large and relatively uniform amount of data at each observation point. The uncertainty analysis included Type A and Type B uncertainties, which include contributions from measuring instrument resolution, sensor accuracy, reading resolution, calibration, and environmental influences. All uncertainty components were combined to obtain combined and expanded uncertainty values. The results showed that the combined uncertainty (u_c) was 0.312°C and the expanded uncertainty (U) was 0.625°C , with a coverage factor of $k = 2$, consistent across all measurement points. The average inlet temperature was higher than the outlet temperature, indicating that the PAC device effectively reduced air temperature. The largest uncertainty components stem from sensor accuracy and calibration, while the contributions from measuring instrument resolution and environmental factors were relatively small. Overall, the level of uncertainty in the measured server rack temperature data obtained remains within acceptable limits for analyzing the performance of the cooling system in the data center and can serve as a reliable basis for decision-making related to temperature control, evaluation of cooling system performance, and improvements in data center operational efficiency.

Keywords: data center, *Precision Air Conditioner*, measurement uncertainty, GUM, temperature

1. Pendahuluan

Pengukuran temperatur merupakan parameter kunci dalam pemantauan kondisi operasional pada fasilitas data center, khususnya di sekitar rack server yang beroperasi pada beban penuh. Temperatur udara yang terkontrol secara optimal merupakan faktor penting untuk menjaga kinerja, stabilitas, dan umur layanan peralatan elektronik. Suhu yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan penurunan efisiensi alat, peningkatan risiko kerusakan komponen, serta peningkatan konsumsi energi dari sistem pendingin (*cooling system*) yang harus bekerja lebih keras untuk menjaga performa perangkat server.

Dalam konteks penelitian ilmiah, ketidakpastian pengukuran bukan hanya menjadi persyaratan formal metrologi, tetapi juga berperan krusial dalam validitas dan kegunaan data penelitian. Ketidakpastian menggambarkan sejauh mana hasil yang diukur dapat dipercaya dan menggambarkan batas-batas nilai yang mungkin mencakup nilai sebenarnya dari besaran yang diukur. Secara umum, hasil pengukuran dinyatakan tidak lengkap apabila tidak menyertakan estimasi ketidakpastian karena ketidakpastian memungkinkan peneliti untuk memahami dispersi dan reliabilitas data yang diperoleh serta mengukur relevansi hasil terhadap tujuan penelitian yang spesifik.

Beberapa literatur metrologi menegaskan pentingnya pendekatan sistematis untuk evaluasi ketidakpastian pengukuran. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)* dari *Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM)* telah menjadi salah satu pedoman standar internasional yang digunakan untuk mengevaluasi dan mengekspresikan ketidakpastian hasil ukur secara konsisten di berbagai bidang ilmu dan engineering. Dalam pendekatan GUM, ketidakpastian dipecah dalam dua kategori utama: Tipe A (berdasarkan analisis statistik dari ulangan pengukuran) dan Tipe B (berdasarkan informasi non-statistik seperti data pabrikan, sertifikat kalibrasi, dan pengalaman teknis), yang kemudian digabung secara kuadratik untuk menghasilkan ketidakpastian gabungan.

Pada kajian lain untuk konteks *calibrated* sensor menunjukkan bahwa kalibrasi perangkat ukur terhadap standar acuan disertai dengan evaluasi ketidakpastian adalah sebuah keharusan untuk menghasilkan data yang dapat dipercaya. Dalam studi tentang kalibrasi termometer digital, evaluasi ketidakpastian gabungan dilakukan melalui metode regresi kalibrasi, yang menghasilkan nilai ketidakpastian baku sebagai parameter penting dalam menilai performa alat ukur [8].

Tinjauan literatur lainnya menunjukkan bahwa penelitian mengenai ketidakpastian pengukuran merupakan topik kajian yang luas, dengan berbagai metode penghitungan dan penerapan dalam konteks praktis. Misalnya, ada penelitian yang membandingkan metode evaluasi ketidakpastian seperti metode GUM dengan pendekatan lain seperti metode Kragten dan ketidakpastian relatif, sehingga muncul pemahaman bahwa pemilihan metode evaluasi harus sesuai dengan karakter sistem pengukuran yang digunakan untuk mendapatkan estimasi ketidakpastian yang paling representatif dalam eksperimen teknik [9].

Namun demikian, meskipun banyak penelitian melakukan analisis ketidakpastian pada pengukuran temperatur umum, masih sangat terbatas kajian yang secara khusus mengevaluasi ketidakpastian pengukuran suhu udara di lingkungan data center. Hal ini menunjukkan adanya *gap* penelitian yang relevan dan penting untuk diisi, khususnya guna mendukung evaluasi reliabilitas data monitor temperatur dalam sistem pendingin *rack server*, sehingga data-data ini dapat digunakan untuk optimasi pendinginan serta perencanaan strategi data center yang lebih efisien dan aman.

1.1 Tantangan Ketidakpastian dalam Pengukuran Suhu

Dalam aplikasi teknik, terutama pengukuran temperatur menggunakan *thermocouple* yang dikombinasikan dengan *data logger*, terdapat beberapa sumber ketidakpastian yang perlu diperhitungkan, seperti ketidakpastian instrumen, kompensasi sambungan referensi (*reference junction compensation*), resolusi alat, dan variasi sinyal acak (*random fluctuations*). Penelitian oleh Tan Mooi Hui & Asako menunjukkan bahwa nilai ketidakpastian temperatur yang diukur dengan *thermocouple* yang terhubung ke data logger seperti HIOKI dapat diperoleh dengan mempertimbangkan sumber error utama tersebut secara sistematis [10].

Selain itu, kajian tentang ketidakpastian pengukuran suhu dan kelembapan udara menunjukkan bahwa sensor-sensor digital populer seperti DHT22 memiliki nilai ketidakpastian tertentu yang dipengaruhi oleh desain dan kondisi lingkungan operasionalnya. Penelitian ini menekankan bahwa ketidakpastian harus dihitung bersama dengan alat pengukuran untuk mendapatkan hasil yang dapat diandalkan [8]. Analisis ketidakpastian juga diadopsi pada sistem pemantauan suhu *IoT*, seperti yang dilakukan pada sistem pengukuran suhu baterai kendaraan listrik, di mana faktor seperti *delay* dalam pengambilan dan transmisi data turut menjadi sumber ketidakpastian selain ketidakpastian alat ukur itu sendiri [11].

1.2 Pengukuran di Data Center dan Signifikansinya

Dalam konteks data center, beberapa studi terkait *environment monitoring* menunjukkan bahwa distribusi temperatur dan gradien suhu dalam suatu rak atau lorong *cold aisle/hot aisle* sangat dipengaruhi oleh arsitektur sistem pendingin serta beban kerja server. Data center monitoring biasanya memanfaatkan *sensor* tersebar dan *data logger* untuk mencatat perilaku suhu secara real-time di berbagai titik. Studi pemodelan dan prediksi temperatur ruang server menunjukkan bahwa pemahaman yang mendalam terhadap pola temperatur diperlukan untuk optimasi energi sistem pendingin.

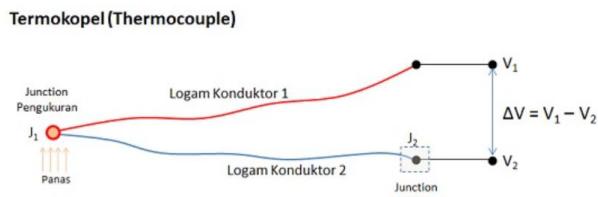
Namun demikian, penelitian eksplisit yang menggabungkan evaluasi ketidakpastian pengukuran temperatur dalam data center masih relatif terbatas. Padahal, dalam rangka menghasilkan data pemantauan lingkungan yang dapat digunakan secara ilmiah maupun operasional, penilaian ketidakpastian menjadi langkah penting agar data temperatur yang dikumpulkan benar-benar representatif dari kondisi nyata di lokasi.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menghitung dan menganalisis ketidakpastian pengukuran temperatur udara berpendingin pada *rack server* data center dengan pendekatan yang mengacu pada pedoman GUM, sehingga hasilnya dapat dijadikan landasan dalam *monitoring performance* sistem pendingin dan pengambilan keputusan operasional serta menjadi data yang valid untuk kebutuhan penelitian terkait data center pada umumnya dan dengan sistem pendingin pada khususnya. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi baru dalam literatur teknik mesin terkait *metrologi eksperimen* di sistem pendinginan data center menggabungkan teori metrologi dan praktik pengukuran suhu dalam skenario data center yang nyata, sehingga memberi referensi yang lebih kuat bagi penelitian selanjutnya maupun aplikasi industri.

2. Material dan metode penelitian

2.1. Sensor Termokopel (*Thermocouple*)

Termokopel (*Thermocouple*) adalah jenis sensor suhu yang digunakan untuk mendeteksi atau mengukur suhu melalui dua jenis logam konduktor berbeda yang digabung pada ujungnya sehingga menimbulkan efek *Thermo-electric*. Efek *Thermo-electric* terjadi dimana sebuah logam konduktor yang diberi perbedaan panas secara *gradient* akan menghasilkan tegangan listrik. Perbedaan Tegangan listrik diantara dua persimpangan (*junction*) ini dinamakan dengan Efek *Seebeck*, yaitu fenomena dimana *thermo-electromotive force (EMF)* dihasilkan ketika terdapat perbedaan suhu antara dua sambungan [1]. Perbedaan potensial listrik yang dihasilkan oleh termokopel bergantung pada perbedaan suhu sambungan. Oleh karena itu, suhu sambungan referensi harus diketahui untuk menentukan suhu sambungan pengukuran. Selanjutnya, telah dikembangkan perekam data dimana *reference junction compensation (RJC)* dilakukan secara otomatis dengan mengukur suhu terminal pada perekam data seperti ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Konsep koneksi untuk Termokopel [4].

Berdasarkan Gambar 1 di atas, ketika kedua persimpangan (*junction*) memiliki suhu yang sama, maka beda potensial atau tegangan listrik yang melalui dua persimpangan tersebut adalah NOL atau $V_1 = V_2$. Akan tetapi, ketika persimpangan yang terhubung dalam rangkaian diberikan suhu panas atau dihubungkan ke obyek pengukuran, maka akan terjadi perbedaan suhu diantara dua persimpangan tersebut yang kemudian menghasilkan tegangan listrik yang nilainya sebanding dengan suhu panas yang diterimanya atau $V_1 - V_2$. Tegangan listrik yang ditimbulkan ini pada umumnya sekitar $1\mu\text{V} - 70\mu\text{V}$ pada tiap derajat Celcius. Tegangan tersebut kemudian dikonversikan sesuai dengan tabel referensi yang telah ditetapkan sehingga menghasilkan pengukuran yang dapat ditentukan.

2.2. Data logger HIOKI LR8450

Salah satu aspek penting dalam penelitian ini adalah penggunaan *data logger* HIOKI LR8450 untuk merekam temperatur udara di dalam *rack server* data center. Perangkat ini sering digunakan dalam aplikasi pengukuran temperatur dan tegangan karena kemampuannya mencatat data secara kontinu dan kompatibel dengan berbagai sensor seperti termokopel tipe K. Implementasi instrumen ini pada sistem pendingin data center memungkinkan pengambilan data temperatur secara real-time dan berkelanjutan, sehingga dapat dianalisis lebih lanjut untuk menentukan ketidakpastian pengukuran.

Dalam literatur metrologi, analisis ketidakpastian pengukuran temperatur telah dilakukan pada berbagai aplikasi instrumen dan lingkungan yang berbeda. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan oleh Tan Mooi Hui dan Asako menggunakan pendekatan analisis ketidakpastian untuk pengukuran temperatur yang melibatkan *data logger* HIOKI dan sensor termokopel. Mereka mengidentifikasi beberapa sumber utama ketidakpastian, seperti batas resolusi perangkat akuisisi data, kesalahan kompensasi sambungan referensi (*reference junction compensation*), serta variasi acak (*random error*) dari sinyal yang direkam, dan kemudian menggabungkan komponen-komponen tersebut untuk menentukan ketidakpastian pengukuran dengan metode *root sum of squares* [10].

2.3. Metode Penelitian

Evaluasi ketidakpastian pengukuran temperatur udara pada penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada metode *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM). Proses pengukuran temperatur udara dilakukan

menggunakan sensor temperatur digital yang telah dikalibrasi pada rentang operasional data center. Nilai temperatur terukur dinyatakan sebagai besaran keluaran (T), yang merupakan fungsi dari beberapa besaran masukan, meliputi hasil pembacaan sensor, koreksi kalibrasi, resolusi alat ukur, dan pengaruh stabilitas lingkungan. Secara matematis, model pengukuran dapat dinyatakan sebagai:

$$T = T_b + C_k + C_r + C_e + C_a \quad (1)$$

di mana T_b adalah nilai bacaan sensor, C_k adalah koreksi hasil kalibrasi, C_r adalah koreksi akibat resolusi alat ukur, C_e adalah koreksi akibat pengaruh dari stabilitas lingkungan dan C_a adalah koreksi akurasi alat ukur. Identifikasi sumber ketidakpastian dilakukan dengan mengelompokkan komponen ketidakpastian menjadi ketidakpastian tipe A dan tipe B. Ketidakpastian tipe A diperoleh dari analisis statistik terhadap pengukuran berulang temperatur udara pada titik pengukuran yang sama, sedangkan ketidakpastian tipe B diperoleh dari informasi non-statistik, seperti sertifikat kalibrasi sensor, spesifikasi pabrikan, dan resolusi alat ukur.

Ketidakpastian baku masing-masing komponen dihitung sesuai dengan karakteristik distribusinya. Untuk ketidakpastian tipe A, ketidakpastian baku ditentukan dari simpangan baku rata-rata pengukuran. Sementara itu, ketidakpastian tipe B yang berasal dari resolusi dan sertifikat kalibrasi diasumsikan mengikuti distribusi seragam atau normal, sesuai dengan informasi yang tersedia.

Ketidakpastian tipe A dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{nilai rata-rata} \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i. \quad (2)$$

$$\text{nilai standard deviasi} \quad \delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}. \quad (3)$$

$$\text{nilai ketidakpastian} \quad u_a = \frac{\delta}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

Ketidakpastian tipe B dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{akurasi perangkat} \quad u_{b1} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

$$\text{resolusi perangkat} \quad u_{b2} = \frac{r}{\sqrt{12}} \quad (6)$$

$$\text{kalibrasi perangkat} \quad u_{b3} = \frac{u_{call}}{k_{call}} \quad (7)$$

Perhitungan kombinasi tipe A dan tipe B dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + u_{b3}^2 + u_{b4}^2} \quad (8)$$

Untuk memperoleh ketidakpastian diperluas (*expanded uncertainty*), ketidakpastian baku gabungan dikalikan dengan faktor cakupan k . Pada penelitian ini digunakan faktor cakupan $k = 2$, yang merepresentasikan tingkat kepercayaan sekitar 95%. Dengan demikian, ketidakpastian diperluas temperatur udara berpendingin dinyatakan sebagai:

$$U = k * u_c \quad (9)$$

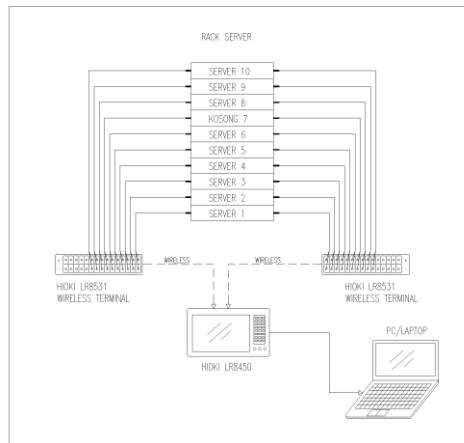
Hasil pengukuran temperatur udara berpendingin pada data center kemudian dinyatakan dalam bentuk:

$$T = \bar{T} \pm U \text{ } ^\circ\text{C}, (k = 2) \quad (10)$$

Di mana \bar{T} adalah nilai rata-rata temperatur hasil pengukuran. Penyajian hasil ini memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai kualitas data pengukuran dan tingkat keandalannya dalam mendukung pengelolaan sistem pendingin data center.

2. 4. Pengaturan dan Pengambilan Data Eksperimen

Penelitian ini menggunakan *data logger* HIOKI (LR8450) dengan dua unit *wireless terminal* (LR8531) yang masing-masing unitnya memiliki terminal sebanyak 15 saluran. Sepuluh termokopel tipe T masing-masing dihubungkan ke terminal terminal (+) dan (-), digunakan untuk mengukur suhu terminal (+) dan (-). Suhu terminal (+) dan (-) dari saluran lainnya diukur dengan cara yang sama. LR8450 mengukur suhu internal, $T_{internal}$, dalam unit LR8531. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, terminal (+) dan (-) dari saluran 1 dihubungkan dengan kawat tembaga untuk mengetahui $T_{internal}$. Skema pengambilan data temperature rack server dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Alur pengambilan data temperature Rack server menggunakan Hioki LR8450.



(a)

(b)

Gambar 3. Hioki LR8450 (a) dan Wireless Terminal LR8531 (b)



Gambar 4. Thermocouple and Penempatannya pada Perangkat Server.

Gambar 4 menunjukkan pengambilan data menggunakan 20 sensor temperatur yang ditempatkan masing-masing 10 sensor pada sisi *intake* dan 10 sensor pada sisi *outlet* rack server dengan durasi pengambilan data selama 4 jam dengan *record data* per-detik, data kemudian disimpan dalam format *Excel* untuk dilakukan pengolahan data.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

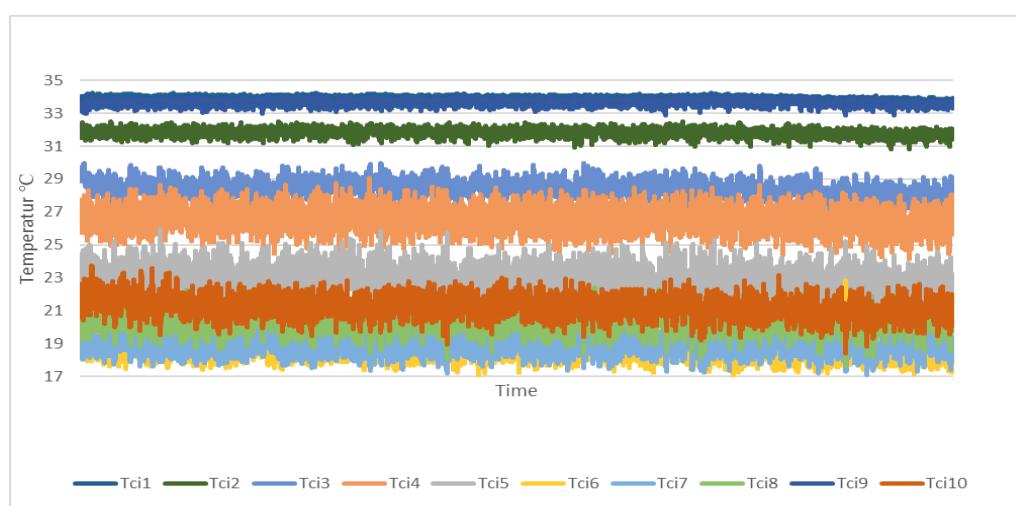
Nilai ketidakpastian tipe A dihitung dari sampling data yang dilakukan dengan jumlah 15.385 data untuk setiap sensornya. Sedangkan nilai ketidakpastian tipe B yang dihitung adalah akurasi, resolusi dan kalibrasi serta pengaruh lingkungan. Akurasi perangkat ditentukan oleh nilai *manufacturer accuracy* sebesar $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, sehingga $u_{\text{b}1} = 0,5 / \sqrt{3} = 0,289$. Resolusi perangkat (*r*) mempunyai nilai $0,1^{\circ}\text{C}$ sehingga $u_{\text{b}2} = 0,1 / \sqrt{12} = 0,029^{\circ}\text{C}$. Nilai kalibrasi perangkat $0,2/2=0,1^{\circ}\text{C}$ serta nilai pengaruh lingkungan perangkat $0,1/\sqrt{3} = 0,058$.

Hasil perhitungan nilai ketidakpastian pengukuran temperatur *input* pada rak server dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Perhitungan ketidakpastian hasil pengukuran pada temperatur *input* rack server.

Parameter	Tci1	Tci2	Tci3	Tci4	Tci5	Tci6	Tci7	Tci8	Tci9	Tci10
Jumlah data (N)	15395	15385	15385	15385	15385	15385	15385	15385	15385	15385
Rata-rata (°C)	33,99	33,62	31,85	28,49	26,58	22,74	18,61	18,82	20,40	21,22
Standar deviasi s (°C)	0,273	0,158	0,211	0,446	0,647	0,866	0,619	0,509	0,659	0,610
u_a (°C)	0,002	0,001	0,002	0,004	0,005	0,007	0,005	0,004	0,005	0,005
u_b (akurasi) (°C)	0,289	0,289	0,289	0,289	0,289	0,289	0,289	0,289	0,289	0,289
u_b (resolusi) (°C)	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
u_b (kalibrasi) (°C)	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
u_b (lingkungan) (°C)	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058
u_c (°C)	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312	0,312
$U (k=2)$ (°C)	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625

Grafik temperatur terhadap waktu hasil pengukuran pada temperatur *input* rack server dapat dilihat pada Gambar 5 berikut ini:



Gambar 5. Grafik hasil pengukuran pada temperatur *input* rack server.

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 5 menunjukkan hasil pengolahan data pengukuran suhu pada sepuluh titik pengamatan (Tci1 hingga Tci10) perangkat rack server di lingkungan data center, diperoleh gambaran kuantitatif mengenai tingkat ketidakpastian pengukuran suhu yang dihasilkan. Setiap titik pengukuran memiliki jumlah data yang relatif seragam, yaitu sebanyak 15.395 hingga 15.398 data, yang menunjukkan konsistensi proses akuisisi data selama periode pengamatan.

Nilai rata-rata suhu yang terukur berada pada rentang 33,93 °C hingga 36,22 °C. Variasi nilai ini mencerminkan perbedaan beban pendinginan dan distribusi aliran udara pada masing-masing titik di rack server. Standar deviasi suhu yang diperoleh berkisar antara 0,158 °C hingga 0,864 °C, yang mengindikasikan tingkat fluktuasi suhu yang relatif kecil hingga sedang. Nilai standar deviasi tertinggi ditemukan pada titik Tci6, yang menunjukkan adanya variasi suhu yang lebih besar dibandingkan titik lainnya, kemungkinan dipengaruhi oleh dinamika beban termal atau kondisi lingkungan sekitar perangkat.

Komponen ketidakpastian tipe B yang diperhitungkan meliputi ketidakpastian resolusi alat ukur, akurasi sensor, resolusi pembacaan, kalibrasi, serta pengaruh lingkungan. Nilai ketidakpastian resolusi (u_a) dan resolusi pembacaan (u_b resolusi) relatif kecil dan seragam pada seluruh titik, yaitu sekitar 0,001–0,002 °C dan 0,029 °C, yang menunjukkan bahwa kontribusi dari resolusi alat terhadap total ketidakpastian bersifat minimal. Sementara itu, ketidakpastian akibat akurasi sensor (u_b akurasi) memiliki nilai konstan sebesar 0,289 °C, yang menjadi salah satu kontributor utama dalam pembentukan ketidakpastian gabungan.

Ketidakpastian kalibrasi (u_b kalibrasi) sebesar 0,100 °C dan ketidakpastian lingkungan (u_b lingkungan) sebesar 0,058 °C juga memberikan kontribusi yang signifikan namun masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk pengukuran suhu operasional data center. Penggabungan seluruh komponen ketidakpastian tersebut menghasilkan nilai ketidakpastian gabungan (u_c) yang konsisten pada seluruh titik pengukuran, yaitu sebesar 0,312 °C.

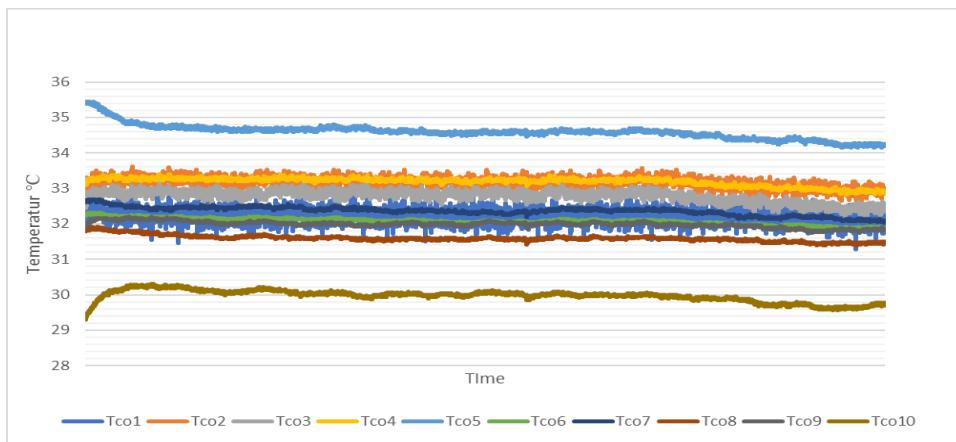
Selanjutnya, dengan menggunakan faktor cakupan $k = 2$ yang merepresentasikan tingkat kepercayaan sekitar 95%, diperoleh nilai ketidakpastian diperluas (U) sebesar 0,625 °C pada seluruh titik Tci1 hingga Tci10. Keseragaman nilai U ini menunjukkan bahwa sistem pengukuran suhu pada rack server memiliki tingkat reliabilitas dan konsistensi yang baik, serta mampu memberikan hasil pengukuran yang stabil untuk mendukung pengendalian suhu data center.

Hasil perhitungan nilai ketidakpastian pengukuran temperatur pada *output* rak server dapat dilihat pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Perhitungan ketidakpastian hasil pengukuran pada temperature *output* rack server.

Parameter	Tco1	Tco2	Tco3	Tco4	Tco5	Tco6	Tco7	Tco8	Tco9	Tco10
Jumlah data (N)	15385	15385	15385	15385	15385	15385	15385	15385	15395	15395
Rata-rata (°C)	32.23	33.18	32.79	33.19	34.60	32.08	32.36	31.59	31.97	29.97
Standar deviasi s (°C)	0.187	0.147	0.161	0.115	0.202	0.094	0.122	0.089	0.684	0.177
u_a (°C)	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.006	0.001
u_b (akurasi) (°C)	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289	0.289
u_b (resolusi) (°C)	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029
u_b (kalibrasi) (°C)	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100
u_b (lingkungan) (°C)	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058	0.058
u_c (°C)	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312
U (k=2) (°C)	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625

Grafik temperatur terhadap waktu hasil pengukuran pada temperature *output* rack server dapat dilihat pada Gambar 6 berikut ini:



Gambar 6. Grafik hasil pengukuran pada temperatur *output* rack server.

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 5 memperlihatkan hasil pengolahan data pengukuran suhu pada sepuluh titik keluaran (*output*) perangkat rack server, yaitu Tco1 hingga Tco10, diperoleh gambaran tingkat ketidakpastian pengukuran suhu pada sistem pendinginan data center. Jumlah data yang digunakan pada setiap titik pengukuran relatif seragam, berkisar antara 15.385 hingga 15.395 data, yang menunjukkan bahwa proses pencatatan data dilakukan secara konsisten dan kontinu selama periode observasi.

Nilai rata-rata suhu yang terukur pada titik Tco berada pada rentang 31,97 °C hingga 34,68 °C. Rentang suhu ini lebih rendah dibandingkan dengan suhu pada sisi inlet, yang mencerminkan fungsi utama perangkat PAC dalam menurunkan suhu udara sebelum didistribusikan kembali ke ruang data center. Perbedaan nilai rata-rata suhu antar titik pengukuran mengindikasikan adanya variasi distribusi udara dingin dan kemungkinan perbedaan beban pendinginan pada masing-masing zona.

Nilai standar deviasi suhu yang diperoleh berada pada kisaran 0,084 °C hingga 0,202 °C. Standar deviasi tertinggi terdapat pada titik Tco5 sebesar 0,202 °C, sedangkan nilai terendah tercatat pada Tco6 sebesar 0,084 °C. Secara umum, nilai standar deviasi yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa fluktuasi suhu pada sisi keluaran PAC cenderung stabil, sehingga mencerminkan kinerja kontrol suhu yang baik dari sistem pendinginan.

Komponen ketidakpastian tipe B yang diperhitungkan dalam analisis ini meliputi ketidakpastian resolusi alat ukur, akurasi sensor, resolusi pembacaan, kalibrasi, dan pengaruh lingkungan. Ketidakpastian resolusi (u_a) berada pada kisaran 0,001–0,002 °C, sedangkan ketidakpastian resolusi pembacaan (u_b resolusi) sebesar 0,029 °C dan ketidakpastian akurasi sensor (u_b akurasi) sebesar 0,289 °C, yang bersifat konstan pada seluruh titik pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa kontribusi ketidakpastian didominasi oleh karakteristik sensor dan spesifikasi alat ukur yang digunakan.

Ketidakpastian akibat kalibrasi (u_b kalibrasi) sebesar 0,100 °C serta ketidakpastian lingkungan (u_b lingkungan) sebesar 0,058 °C juga memberikan kontribusi terhadap ketidakpastian total, namun masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk pengukuran suhu operasional data center. Penggabungan seluruh komponen ketidakpastian menghasilkan nilai ketidakpastian gabungan (u_c) yang sama pada seluruh titik pengukuran, yaitu sebesar 0,312 °C.

Dengan menerapkan faktor cakupan $k = 2$ yang merepresentasikan tingkat kepercayaan sekitar 95%, diperoleh nilai ketidakpastian diperluas (U) sebesar 0,625 °C untuk seluruh titik Tco1 hingga Tco10. Keseragaman nilai

ketidakpastian diperluas ini menunjukkan bahwa sistem pengukuran suhu pada sisi keluaran perangkat rack server memiliki tingkat konsistensi dan keandalan yang tinggi.

Secara keseluruhan, hasil analisis ketidakpastian pengukuran suhu pada titik T_{co} menunjukkan bahwa sistem pendinginan PAC mampu menghasilkan suhu keluaran yang stabil dengan tingkat ketidakpastian yang relatif kecil. Kondisi ini sangat mendukung pemenuhan kebutuhan pengendalian suhu data center, serta memberikan dasar yang kuat bagi evaluasi kinerja pendinginan, pemenuhan *Service Level Agreement (SLA)*, dan peningkatan efisiensi energi operasional data center.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis ketidakpastian pengukuran suhu pada rack server di data center, dapat disimpulkan bahwa sistem pengukuran suhu yang digunakan telah menunjukkan tingkat konsistensi dan keandalan yang baik. Hal ini ditunjukkan oleh jumlah data pengukuran yang besar dan relatif seragam pada setiap titik pengamatan, baik pada sisi inlet (T_{ci}) maupun outlet (T_{co}), sehingga hasil analisis memiliki tingkat akurasi cukup baik.

Nilai rata-rata suhu pada sisi *inlet* (T_{ci}) berada pada rentang yang lebih rendah dibandingkan dengan sisi *outlet* (T_{co}), yang mengindikasikan bahwa perangkat *Precision Air Conditioning* (PAC) berfungsi secara efektif dalam menurunkan suhu perangkat server sebelum disirkulasikan kembali ke ruang data center. Perbedaan nilai rata-rata suhu antara T_{ci} dan T_{co} mencerminkan proses pendinginan yang berlangsung sesuai dengan prinsip kerja sistem pendingin presisi.

Hasil perhitungan ketidakpastian menunjukkan bahwa nilai ketidakpastian gabungan (u_c) pada seluruh titik pengukuran adalah sebesar 0,312 °C, sedangkan nilai ketidakpastian diperluas (U) dengan faktor cakupan k = 2 adalah sebesar 0,625 °C. Keseragaman nilai ketidakpastian ini pada seluruh titik pengukuran menunjukkan bahwa variasi hasil pengukuran lebih dipengaruhi oleh karakteristik alat ukur dan spesifikasi sensor dibandingkan oleh fluktuasi kondisi operasional sesaat.

Komponen ketidakpastian terbesar berasal dari ketidakpastian akurasi sensor dan kalibrasi, sedangkan kontribusi dari resolusi alat ukur dan pengaruh lingkungan relatif kecil. Dengan demikian, upaya peningkatan akurasi pengukuran suhu di masa mendatang dapat difokuskan pada peningkatan kualitas sensor dan pelaksanaan kalibrasi secara berkala.

Secara keseluruhan, tingkat ketidakpastian data pengukuran temperatur rack server yang diperoleh masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk menganalisa kinerja sistem pendingin di data center dan dapat dijadikan dasar yang andal dalam pengambilan keputusan terkait pengendalian suhu, evaluasi kinerja sistem pendinginan, serta peningkatan efisiensi operasional data center.

Daftar Pustaka

- [1] JCGM 100:2008, “Evaluation of Measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement”
- [2] Barry N. Taylor, Chis E. Kuyyat, 1994, “Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results”. NIST Technical Note 1297 1994 Edition, Gaithersburg.
- [3] ISO/IEC Guide 98-3:2008, “Uncertainty of measurement - Part 3 Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)”, Switzerland.
- [4] Anonymous, “Termokopel dan Prinsip Kerjanya”, <https://teknikelektronika.com/pengertian-termokopel-thermocouple-dan-prinsip-kerjanya>, diakses : 2 Januari 2026.
- [5] Anonymous, “Memory Hilogger LR8450”, https://www.hioki.com/global/products/multichannel-data-loggers/multichannel/id_6767, diakses : 3 Januari 2036.
- [6] Recktenwald, Gerald., 2026, “Uncertainty estimation and calculation.” Dept. of Mechanical Engineering, Portland State Univ., Portland.
- [7] Trias Prima Satya, dkk., 2019, “Kajian Ketidakpastian Pengukuran Suhu dan Kelembaban Udara Pada Sensor DHT22 Berbasis Arduino Uno”, Jurnal Ilmu Fisika, 11: 102-110.
- [8] Icha Fatwasauri, dkk., 2021, “Evaluasi Ketidakpastian Pengukuran dalam Kalibrasi Termometer Digital Menggunakan Persamaan Regresi”, Komunikasi Fisika Inndonesia, 18: 131-136.
- [9] José Daniel Hernández-Vásquez, dkk., 2022, “Comparison of Different Methods to Evaluate Measurement Uncertainty in Bimetallic Thermometers Used in Industrial Equipment”, International Journal of Technology, 13: 374-386.
- [10] Tan Mooi Hui, dkk, 2021 “Implementation of Uncertainty Analysis of Temperature Measurement”, Journal of Advanced Research Design, 77: 1-7.
- [11] Yaaro Telaumbanua dkk, 2023, “An Investigation into the Uncertainty of Temperature Measurement in Internet of Things (IoT): A Case Study of Battery Performance Monitoring System for Electric Vehicles”, Majalah Ilmiah Pengkajian Industri, 7: 1-7.