

SNSU PK.S-04:2023

# Panduan Kalibrasi

## Indikator dan Simulator Suhu Menggunakan Metode Pengukuran dan Simulasi Kelistrikan



**SNSU PK.S-04:2023**

**PANDUAN KALIBRASI INDIKATOR DAN SIMULATOR SUHU MENGGUNAKAN  
METODE PENGUKURAN DAN SIMULASI KELISTRIKAN**

Penyusun : 1. Arief Gunawan  
2. Aditya Achmadi  
3. Ghufron Zaid  
4. Arfan Sindhu Tistomo  
5. Melati Azizka Fajria  
6. Dwi Larassati  
7. Arlan  
8. Iip Ahmad Rifai  
9. Mareta Dwi Anastasya  
10. Sri Ningsih Yazana Pakpahan  
11. Kelvin Sapta Dewantara

Kontributor : 1. Dede Erawan  
2. Ahmad Atsari Sujud

Desain Sampul : Bagus Muhammad Irvan – BSN

**Direktorat SNSU Termoelektrik dan Kimia  
Badan Standardisasi Nasional**

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2023

## Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Indikator dan Simulator Suhu Menggunakan Metode Pengukuran dan Simulasi Kelistrikan (SNSU PK.S-04:2023) diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi indikator dan simulator suhu menggunakan metode pengukuran dan simulasi kelistrikan di laboratorium kalibrasi maupun institusi lain yang berkepentingan dengan pengukuran yang perlu dijamin keabsahannya. Panduan ini mencakup definisi umum, langkah-langkah kalibrasi, serta evaluasi ketidakpastian pengukuran. Panduan ini disusun berdasarkan acuan metode internasional, nasional, maupun sumber ilmiah lainnya melalui proses pembahasan internal di Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Termoelektrik dan Kimia serta dengan mempertimbangkan masukan dari para ahli di bidang metrologi suhu.

Dokumen ini diterbitkan secara bebas dan tidak untuk diperjualbelikan secara komersial. Bagian dari dokumen ini dapat dikutip untuk keperluan edukasi atau kegiatan ilmiah dengan menyebutkan sumbernya, namun tidak untuk keperluan komersial.

Disahkan tanggal 05 Desember 2023

Y. Kristianto Widiwardono  
Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran  
Badan Standardisasi Nasional

## Daftar Isi

Penyusun dan Kontributor .....	i
Lembar Pengesahan .....	ii
Daftar Isi .....	iii
1. RUANG LINGKUP .....	1
2. TERMINOLOGI .....	1
3. PRINSIP-PRINSIP KALIBRASI .....	3
3.1 Kalibrasi Indikator Suhu .....	3
3.2 Kalibrasi Simulator Suhu .....	3
3.3 Kompensasi Sambungan Referensi .....	3
4. PERALATAN DAN SET UP PENGUKURAN .....	5
5. PRA KALIBRASI .....	6
5.1 Rekaman Teknis .....	6
5.2 Pembuatan Titik Es .....	6
6. LANGKAH KERJA .....	7
6.1 Kalibrasi Indikator Suhu Untuk Sensor Jenis Termometer Tahanan Platina ....	7
6.2 Kalibrasi Indikator Suhu Untuk Sensor Jenis Termokopel dengan Fitur CJC Aktif .....	8
6.3 Kalibrasi Indikator Suhu Untuk Sensor Jenis Termokopel dengan Fitur CJC Nonaktif .....	9
6.4 Kalibrasi Simulator Suhu Untuk Sensor Jenis Termometer Tahanan Platina .	10
6.5 Kalibrasi Simulator Suhu Untuk Sensor Jenis Termokopel dengan Fitur CJC Aktif .....	11
6.6 Kalibrasi Simulator Suhu Untuk Sensor Jenis Termokopel dengan Fitur CJC Nonaktif .....	12
7. ANALISIS DATA DAN EVALUASI KETIDAKPASTIAN .....	13
8. PELAPORAN .....	15
Daftar Pustaka .....	17
Lampiran A .....	18

## 1. RUANG LINGKUP

**1.1** Metode ini dapat digunakan untuk mengkalibrasi indikator suhu dan simulator suhu dengan cara pengukuran dan simulasi kelistrikan, baik berupa tegangan maupun tahanan listrik. Indikator suhu dan simulator suhu tersebut biasanya digunakan untuk pengukuran termometer tahanan platina (*PRT/platinum resistance thermometer*) dan/atau termokopel yang terstandarisasi. Indikator suhu dan simulator suhu untuk termokopel dapat dilengkapi dengan atau tanpa kompensasi sambungan referensi (*CJC/cold junction compensation*)

**1.2** Dalam keadaan normal untuk pengukuran suhu, indikator suhu digunakan bersama dengan sensor suhu. Kalibrasi dengan simulasi kelistrikan ini hanya memastikan akurasi dari indikator suhu saja, tetapi tidak untuk unjuk kerja metrologis sensor suhu yang akan digunakan dengan indikator suhu tersebut.

**1.3** Lebih lanjut, untuk mendapatkan pengukuran suhu yang benar dan tertelusur, pengguna harus memastikan indikator suhu dan sensor suhu telah dikalibrasi, baik secara terpisah maupun secara bersama sebagai sebuah sistem. Selain itu, dalam menggunakan simulator suhu, termokopel yang digunakan untuk menghubungkan simulator suhu dengan instrumen yang diukur harus terkalibrasi.

## 2. TERMINOLOGI

**2.1** Simulasi Kelistrikan: Suatu proses kalibrasi indikator suhu dengan mengganti sensor suhu (termokopel atau PRT) dengan perangkat listrik yang memberikan nilai output kelistrikan yang setara dengan output sensor suhu terkait.

**2.2** Indikator Suhu: Sebuah perangkat yang digunakan untuk menampilkan nilai dalam satuan suhu yang diperoleh dari pengukuran parameter input dari sensor suhu, seperti tahanan dan/atau tegangan listrik. Tabel referensi standar digunakan untuk mengkonversi parameter input tersebut ke unit suhu.

**2.3** Simulator Suhu: Sebuah sumber sinyal listrik yang outputnya dapat disetel sesuai dengan output listrik sensor suhu pada suhu tertentu. Biasanya, pengaturan simulator suhu dinyatakan dalam satuan suhu. Sebuah simulator suhu biasanya dapat mensimulasikan output dari berbagai jenis sensor suhu. Tabel referensi standar digunakan sebagai rujukan untuk mengetahui hubungan antara pengaturan simulator suhu dan parameter output listrik.

**2.4** Tabel Referensi Standar: Tabel referensi standar memberikan nilai tabulasi dan/atau hubungan polinomial untuk konversi tegangan (untuk termokopel tertentu) atau tahanan (untuk PRT tertentu) ke dalam suatu besaran suhu yang sesuai dan sebaliknya.

**2.5** Termometer Tahanan Platina (PRT): Resistor yang sensitif terhadap perubahan suhu, dibuat dari bahan platina, dengan hubungan fungsional antara tahanan dan suhunya

sudah diketahui, merujuk pada suatu dokumen standar (IEC 60751:2022, ASTM E1137/E1137M-08:2020, ataupun dokumen lain yang diterbitkan secara internasional).

**2.6** Termokopel: Sepasang konduktor dari bahan yang berbeda yang dihubungkan pada salah satu ujungnya, digunakan untuk pengukuran suhu berdasarkan prinsip efek termoelektrik.

**2.7** Termokopel yang terstandarisasi: Secara umum, terdiri dari termokopel logam dasar (Tipe E, J, K, N, dan T) dan termokopel logam mulia (Tipe R, S, dan B). Termokopel tersebut telah distandardisasi berdasarkan bahan-bahan penyusunnya sehingga hubungan fungsional antara suhu dan tegangan outputnya sudah diketahui dengan merujuk pada suatu dokumen standar (ASTM E230/E230M-17:2017, IEC 60584-1:2013, ataupun dokumen lain yang diterbitkan secara internasional).

**2.8** Pengukuran Tahanan: Pengukuran tahanan listrik pada suatu resistor dapat dilakukan dengan konfigurasi dua kabel, tiga kabel, dan empat kabel. Pada pengukuran dua kabel, hasil pengukuran akan mencakup tahanan kedua kabel penghubung selain dari tahanan resistornya. Pada pengukuran tiga kabel, sepasang kabel di antaranya terhubung ke titik yang sama pada resistor yang diukur, sehingga mengkompensasi tahanan dari kabel tersebut, namun nilai tahanan kabel lainnya masih terukur. Pada pengukuran empat kabel, satu pasang kabel memasok arus pengukuran, sedangkan satu pasang lainnya mengukur potensial listrik yang melintasi resistor. Dengan demikian, pengukuran ini bebas dari nilai tahanan kabel yang digunakan.

**2.9** Efek Termoelektrik: Efek yang menghasilkan gaya gerak listrik (*electromotive force/emf*) pada suatu konduktor dikarenakan adanya perbedaan suhu di sepanjang bagian konduktor tersebut.

**2.10** Kabel Kompensasi: Kabel yang dibuat dari konduktor yang mempunyai komposisi berbeda dari termokopel yang bersangkutan tetapi memiliki sifat termoelektrik yang relatif sama dengan termokopel tersebut untuk suatu rentang suhu tertentu (IEC 60584-3:2021).

**2.11** Kabel Ekstensi: Kabel sambungan yang dibuat dari konduktor yang memiliki komposisi nominal yang sama dengan termokopel yang bersangkutan untuk memperpanjang termokopel tersebut (IEC 60584-3:2021).

**2.12** Sambungan Pengukuran/Sambungan Panas: Sambungan termokopel yang dikenakan suhu yang akan diukur (IEC 60584-1:2013).

**2.13** Sambungan Referensi/Sambungan Dingin: Sambungan termokopel pada suhu (referensi) yang diketahui.

**2.14** Titik Es: Suhu yang dicapai pada kesetimbangan saat terjadinya perubahan wujud es menjadi air (0 °C). Suhu ini secara umum dapat mencapai ketidakpastian kurang dari 20

mK dengan menggunakan prosedur yang sesuai (MSL Technical Guide 1 Version 3, ASTM E563-22:2022, ataupun dokumen lain yang diterbitkan secara internasional).

### **3. PRINSIP-PRINSIP KALIBRASI**

#### **3.1 Kalibrasi Indikator Suhu**

- a. Indikator suhu bekerja dengan mengubah sinyal listrik yang diterima dari sensor suhu menjadi pembacaan dalam satuan suhu. Prinsip kalibrasi indikator dan simulator suhu dengan metode pengukuran dan simulasi kelistrikan adalah penggantian output sensor suhu dengan sinyal listrik yang sesuai untuk memastikan kebenaran proses konversi dari sinyal listrik menjadi besaran suhu yang ditampilkan indikator tersebut.
- b. Dalam proses kalibrasi, sumber listrik dengan penunjukkan yang telah dikalibrasi digunakan sebagai pengganti sensor suhu. Output sumber listrik ditentukan sesuai titik kalibrasi suhu yang diinginkan menggunakan tabel referensi standar. Output sumber listrik tersebut kemudian dijadikan input bagi indikator suhu yang dikalibrasi. Hasil pembacaan indikator suhu dibandingkan dengan titik kalibrasi suhu yang disimulasikan untuk mendapatkan koreksi pembacaan indikator suhu.

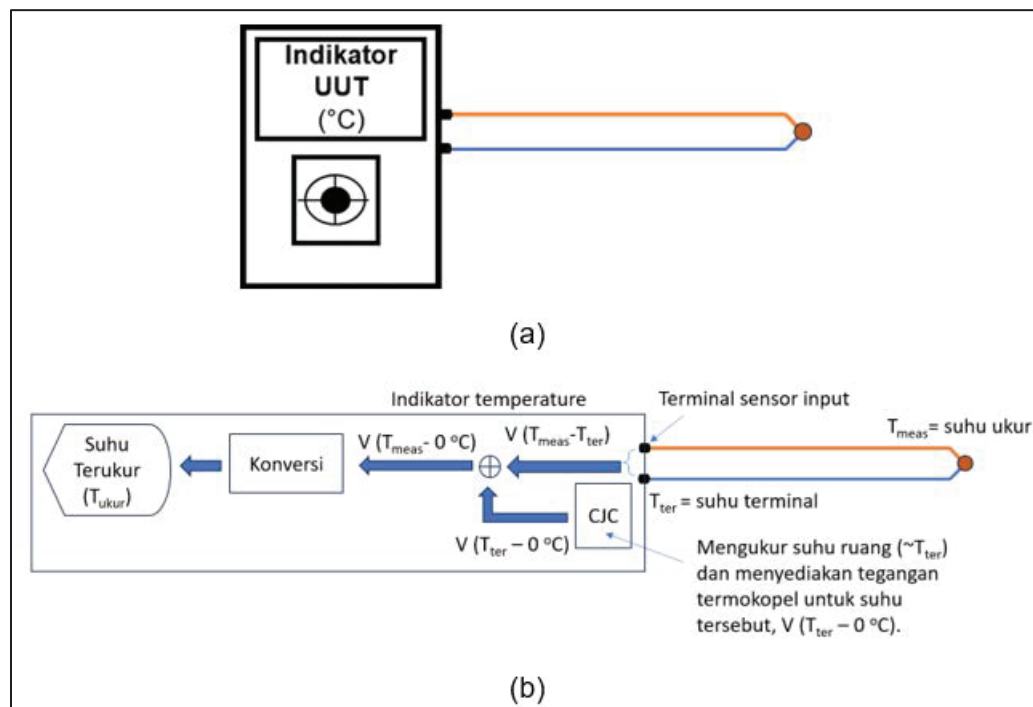
#### **3.2 Kalibrasi Simulator Suhu**

- a. Simulator suhu bekerja dengan mengkonversi nilai penyetelannya dalam satuan suhu, menjadi output sinyal listrik yang serupa dengan output sebuah sensor suhu. Konversi tersebut dilakukan berdasarkan tabel referensi standar yang sesuai. Prinsip kalibrasi simulator ini berdasarkan pada pemastian kebenaran proses konversi tersebut dengan cara pengukuran langsung sinyal listrik yang dihasilkan oleh simulator.
- b. Pada proses kalibrasi, simulator suhu disetel pada titik kalibrasi yang diinginkan. Dalam kondisi ini, alat ukur listrik yang terkalibrasi digunakan sebagai standar untuk mengukur besaran listrik yang dihasilkan simulator suhu. Nilai yang terukur tersebut dikonversi menjadi besaran suhu menggunakan tabel referensi standar dan perbedaannya terhadap penyetelan simulator suhu dapat dihitung.

#### **3.3 Kompensasi Sambungan Referensi**

Hasil konversi pada indikator suhu atau simulator suhu, pada dasarnya, harus sesuai dengan hasil konversi yang diberikan oleh tabel referensi standar. Tabel referensi standar untuk termokopel saat ini menyajikan hubungan antara nilai suhu terukur dan nilai tegangan listrik keluaran termokopel, untuk kondisi suhu sambungan referensi 0 °C. Oleh karena itu, indikator suhu dan simulator suhu yang dirancang untuk sensor termokopel

sering dilengkapi dengan fitur kompensasi sambungan referensi (*Cold Junction Compensation*, CJC). Hal ini diperlukan karena dalam prakteknya, sambungan referensi termokopel yang terhubung ke terminal indikator/simulator, berada pada suhu ruang, bukan suhu  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sehingga, fungsi CJC ini bermanfaat untuk mengkompensasi perbedaan suhu antara sambungan referensi  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan suhu ruang yang sebenarnya. Cara kerja pengukuran tersebut serta fungsi dari CJC diilustrasikan pada Gambar 1, untuk kasus sebuah indikator suhu.

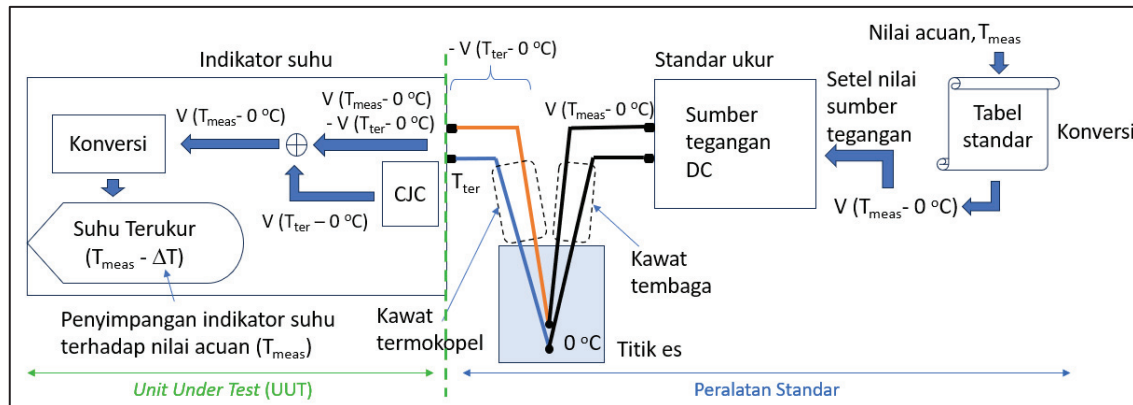


**Gambar 1.** (a) Ilustrasi sederhana sebuah indikator suhu dengan sensor termokopel (b) ilustrasi pengukuran sinyal listrik dari sensor termokopel dan fungsi *Cold Junction Compensation* untuk mengkompensasi suhu ruang terhadap suhu referensi  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Dalam proses kalibrasi indikator atau simulator yang dilengkapi dengan fitur CJC, diperlukan kawat termokopel dengan tipe yang sesuai, dan bak es, yang menyediakan suhu  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , untuk digunakan sebagai sambungan referensi eksternal (*external reference cold junction*) yang berfungsi mengkompensasi CJC agar hasil konversi indikator suhu dapat langsung dibandingkan dengan hasil konversi menggunakan tabel referensi standar. Dari perbandingan tersebut dapat dihitung penyimpangan penunjukkan indikator/simulator suhu terhadap nilai acuan sesuai tabel referensi standar. Penyimpangan tersebut dilaporkan sebagai hasil kalibrasi. Penting untuk dicatat bahwa kawat termokopel tersebut harus dikalibrasi dalam rentang kondisi suhu terminal input dari indikator/simulator suhu, yang dapat didekati dari nilai suhu ruangan laboratorium kalibrasinya. Nilai koreksi dan ketidakpastian hasil kalibrasi termokopel tersebut harus diperhitungkan dalam proses



pengukuran dan evaluasi ketidakpastian pengukuran, sehingga penyimpangan penunjukkan indikator suhu dapat diperoleh secara akurat. Konfigurasi kalibrasi indikator suhu dengan metode di atas diilustrasikan oleh Gambar 2.



**Gambar 2.** Ilustrasi sederhana penataan alat dan proses kalibrasi sebuah indikator suhu (yang dilengkapi CJC) sebagai UUT, dengan alat standar utama berupa sumber tegangan DC, kawat termokopel, dan bak es

CATATAN: Selubung kedap air sebaiknya digunakan untuk melindungi termokopel ketika dicelupkan ke dalam titik es. Pastikan kutub positif dan kutub negatif tidak mengalami sambungan pendek, dengan menggunakan bahan insulator yang cukup di antara kutub-kutub tersebut.

#### 4. PERALATAN DAN SET UP PENGUKURAN

Peralatan standar kalibrasi yang diperlukan dan konfigurasi pengukurannya ditentukan berdasarkan jenis sensor dan penggunaan fitur CJC pada indikator suhu atau simulator suhu yang akan dikalibrasi. Tabel 1 menyajikan daftar peralatan standar dan konfigurasi pengukuran yang dibutuhkan untuk setiap jenis indikator suhu dan simulator suhu. Meskipun demikian, daftar peralatan dan konfigurasi pengukuran yang tertera pada Tabel 1 tidak bersifat mengikat atau membatasi penggunaan peralatan lain, asalkan tetap mematuhi prinsip dasar yang sama sehingga dapat dipertanggungjawabkan secara metrologis. Sebagai contoh, penggunaan kalibrator simulator suhu yang telah terkalibrasi sebagai standar referensi juga dapat diakui sebagai alternatif yang sah, dikarenakan kalibrator tersebut secara prinsip memiliki fungsi dasar seperti peralatan standar yang terdapat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Daftar Peralatan dan Konfigurasi Pengukuran

Jenis Peralatan	Jenis Sensor	Peralatan Standar	Konfigurasi Pengukuran	Keterangan
Indikator Suhu	Termometer Tahanan Platina	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resistor standar atau Resistor dekade</li> </ul>	Gambar 3	Langkah 6.1

Jenis Peralatan	Jenis Sensor	Peralatan Standar	Konfigurasi Pengukuran	Keterangan
Indikator Suhu dengan CJC	Termokopel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sumber tegangan DC</li> <li>Termokopel</li> <li>Titik Es</li> </ul>	Gambar 4	Langkah 6.2
Indikator Suhu tanpa CJC	Termokopel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sumber tegangan DC</li> </ul>	Gambar 5	Langkah 6.3
Simulator Suhu	Termometer Tahanan Platina	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ohmmeter</li> </ul>	Gambar 6	Langkah 6.4
Simulator Suhu dengan CJC	Termokopel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltmeter DC</li> <li>Termokopel</li> <li>Titik Es</li> </ul>	Gambar 7	Langkah 6.5
Simulator Suhu tanpa CJC	Termokopel	<ul style="list-style-type: none"> <li>Voltmeter DC</li> </ul>	Gambar 8	Langkah 6.6

**CATATAN:**

- Seluruh standar referensi yang digunakan harus dikalibrasi dan dikarakterisasi sesuai dengan rentang ukur penggunaan.
- Apabila ada pengaruh kondisi lingkungan terhadap hasil pengukuran, seperti perubahan suhu ruangan, maupun pengaruh konfigurasi kabel dalam pengukuran tahanan (terutama konfigurasi 2 kabel dan 3 kabel) maka pengaruh tersebut harus dikoreksi atau dijadikan sumber ketidakpastian.

**5. PRA KALIBRASI****5.1 Rekaman Teknis**

Perekaman teknis peralatan yang dikalibrasi, data pengukuran, dan informasi teknis terkait lainnya, baik untuk indikator suhu maupun simulator suhu, dilakukan dalam proses kalibrasi dan pengukuran. Rekaman teknis biasanya mencakup hal-hal berikut:

- Pabrik pembuat, model, nomor seri, resolusi/daya baca, kapasitas/rentang ukur, dan informasi teknis terkait lainnya;
- Rentang ukur kalibrasi yang diminta dan akurasi yang diharapkan;
- Titik-titik ukur spesifik (jika ada) sesuai kebutuhan pelanggan;
- Kondisi lingkungan kalibrasi, mencakup suhu dan kelembaban relatif;
- Data pengukuran; dan
- Data teknis lain jika diperlukan.

**5.2 Pembuatan Titik Es**

Penggunaan titik es sebagai suhu sambungan referensi di 0 °C diperlukan dalam mengkalibrasi indikator atau simulator yang dilengkapi dengan fitur CJC untuk memastikan akurasinya. Keuntungan penggunaan titik es adalah pembuatannya yang mudah dan murah. Selama pembuatannya dilakukan dengan metode yang benar, pengukuran di titik

es dapat dilakukan dengan akurasi sampai  $\pm 20$  mK. Langkah-langkah pembuatan titik es adalah sebagai berikut:

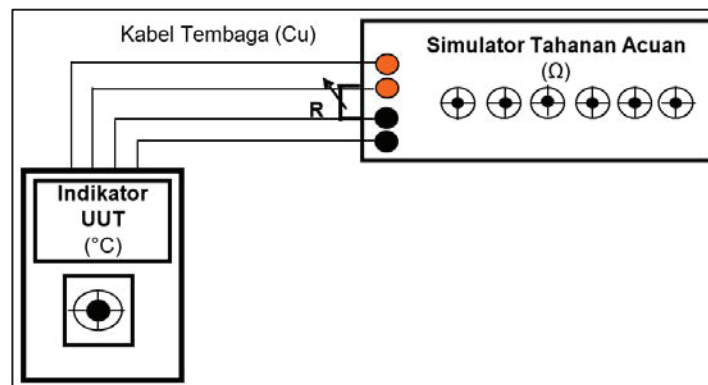
- (1) Gunakan sarung tangan plastik bersih untuk menangani es dan peralatannya—pastikan juga peralatan tersebut dibilas dan dikeringkan;
- (2) Siapkan es serut yang terbuat dari air suling. Es serut tersebut dapat dibuat dengan mesin penyerut es ataupun mesin pembuat butiran es;
- (3) Siapkan termos kosong dan letakkan selang yang dipanjangkan ke dasar termos untuk memudahkan pembuangan kelebihan air akibat pencairan es. Pastikan ukuran termos mengakomodir batas minimum kedalaman pencelupan sensor suhu (sambungan referensi termokopel);
- (4) Masukkan air suling kurang lebih sepertiga kapasitas termos lalu masukkan es serut hingga penuh;  
CATATAN: tambahkan lebih banyak air suling untuk memastikan warna es berwarna abu-abu, bukan putih—warna putih menunjukkan suhu es lebih rendah dari 0 °C.
- (5) Pastikan es serut dan air suling tercampur dengan baik dan kelebihan air dibuang dengan selang. Kemudian masukkan batang kaca/logam sebagai tempat tercelupnya sambungan referensi termokopel. Lalu padatkan campuran es serut dan air suling tersebut untuk mendapatkan kontak termal yang lebih baik;
- (6) Masukkan sambungan referensi termokopel ke dalam lubang cetakan batang kaca/logam, padatkan lagi campuran es serut, biarkan titik es tercapai keseimbangan termalnya selama 15 menit sebelum digunakan;
- (7) Untuk penggunaan jangka panjang, rawat titik es dengan membuang kelebihan air dan mengisi kembali es serut apabila diperlukan dan lakukan pemadatan ulang;
- (8) Setelah menggunakan titik es, cucilah termos, batang kaca/logam, dan selang menggunakan air suling untuk menghindari kontaminasi karena kontaminasi dapat mempengaruhi suhu titik es.

## 6. LANGKAH KERJA

### 6.1 Kalibrasi Indikator Suhu Untuk Sensor Jenis Termometer Tahanan Platina

- (1) Hubungkan masing-masing terminal sensor input pada indikator termometer tahanan UUT ke terminal tahanan acuan (dapat berupa resistor standar, resistor dekade, maupun simulator sensor tahanan) menggunakan kawat tembaga, disarankan menggunakan konfigurasi pengukuran tahanan empat kabel sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3;
- (2) Gunakan tabel referensi standar tahanan yang sesuai, setel nilai tahanan acuan yang

ekuivalen dengan  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  setelah terhubung dengan indikator termometer tahanan UUT;



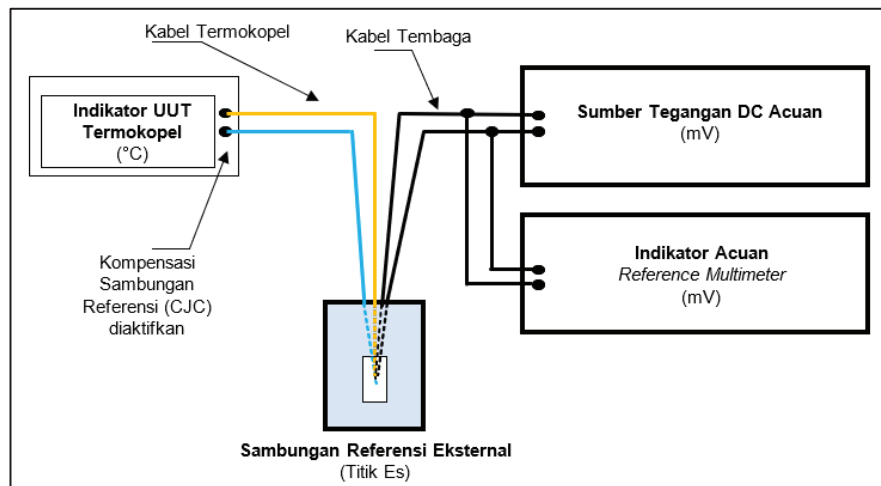
**Gambar 3.** Konfigurasi Kalibrasi Indikator UUT untuk Termometer Tahanan Platina Menggunakan Metode 4 Kawat.

- (3) Bila penunjukkan indikator termometer tahanan UUT telah stabil, rekam hasil pembacaannya dalam satuan suhu pada suatu formulir yang telah disediakan, bersama dengan nilai tahanan acuan yang disetel.
- (4) Untuk titik kalibrasi  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ulangi langkah (3) dengan cara menurunkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan nilai suhu paling rendah sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan.
- (5) Untuk titik kalibrasi  $t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ulangi langkah (3) dengan cara menaikkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan nilai suhu paling tinggi sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan.;
- (6) Catat suhu dan kelembaban relatif ruangan kalibrasi selama proses kalibrasi.

## 6.2 Kalibrasi Indikator Suhu Untuk Sensor Jenis Termokopel dengan Fitur CJC Aktif

- (1) Buat sambungan antara masing-masing kutub positif (+) dan negatif (-) kawat termokopel dengan kawat tembaga. Sambungan ini adalah sambungan referensi eksternal yang akan dimasukkan ke dalam titik es, berikan isolasi pada kedua sambungan untuk memastikan tidak terjadi sambungan pendek antar masing-masing kutub;
- (2) Hubungkan indikator termokopel UUT dengan sumber tegangan DC acuan dengan cara memasang kawat termokopel pada indikator termokopel UUT dan kawat tembaga pada sumber tegangan DC acuan, dan masukkan sambungan referensi eksternal termokopel ke dalam titik es, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2. Pada konfigurasi ini sumber tegangan DC berperan sebagai standar pengukuran dalam proses kalibrasi;
- (3) Alternatif lain adalah dengan menambahkan sebuah indikator acuan, misalnya

sebuah *reference multimeter* yang telah terkalibrasi, yang mengukur tegangan keluaran dari sumber DC sebagaimana disajikan dalam Gambar 4. Pada konfigurasi tersebut, *reference multimeter* berperan sebagai standar pengukuran dalam proses kalibrasi;



**Gambar 4.** Konfigurasi Kalibrasi Indikator Termokopel Menggunakan Kompensasi Sambungan Referensi (CJC)

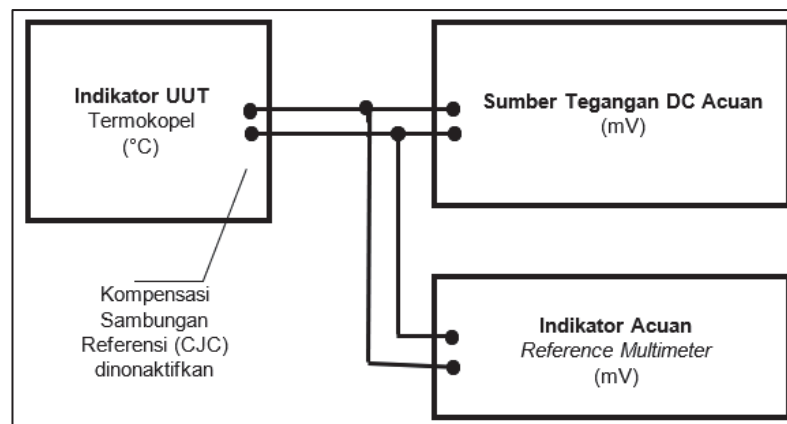
- (4) Gunakan tabel referensi standar termokopel yang sesuai, setelah nilai emf standar yang ekuivalen dengan  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  setelah terhubung dengan indikator termokopel UUT;
- (5) Bila penunjukkan indikator suhu telah stabil, catat pembacaannya secara bersamaan dengan pembacaan sumber tegangan DC sebagai acuan pada konfigurasi di poin (2), ataupun pembacaan *reference multimeter* jika menggunakan konfigurasi sesuai langkah (3). Sediakan formulir untuk pencatatan tersebut.
- (6) Untuk titik kalibrasi  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ulangi langkah (5) dengan cara menurunkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling rendah sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (7) Untuk titik kalibrasi  $t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ulangi langkah (5) dengan cara menaikkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling tinggi sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (8) Catat suhu dan kelembaban relatif ruangan selama proses kalibrasi.

### 6.3 Kalibrasi Indikator Suhu Untuk Sensor Jenis Termokopel dengan Fitur CJC Nonaktif

Beberapa indikator suhu yang dilengkapi dengan fitur kompensasi sambungan referensi internal (CJC), dapat menonaktifkan fitur CJC tersebut sehingga dapat menggunakan sambungan referensi termokopel eksternal. Dalam kondisi CJC yang nonaktif (tanpa CJC), maka langkah kalibrasi menjadi lebih sederhana sebagaimana langkah-

langkah di bawah ini.

- (1) Hubungkan indikator termokopel dengan sumber tegangan DC acuan menggunakan kawat termokopel atau kawat tembaga. Pada konfigurasi ini sumber DC acuan dijadikan sebagai alat standar kalibrasi;
- (2) Alternatif lain adalah dengan menambahkan sebuah indikator acuan, misalnya, sebuah *reference multimeter* yang telah terkalibrasi, yang mengukur tegangan keluaran dari sumber DC sebagaimana disajikan oleh Gambar 5. Pada konfigurasi tersebut, *reference multimeter* berperan sebagai alat standar kalibrasi.



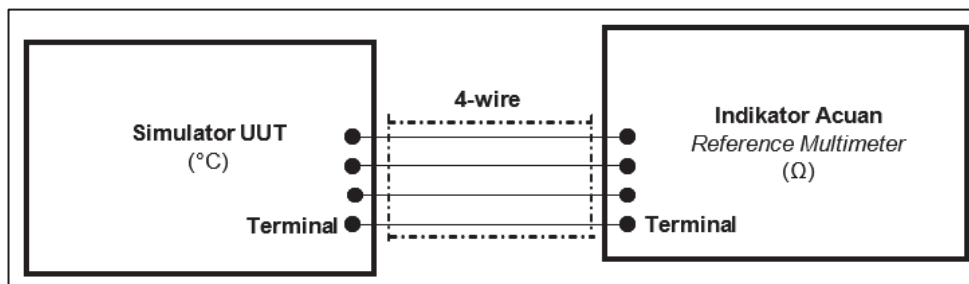
**Gambar 5.** Konfigurasi Kalibrasi Indikator Termokopel Tanpa Menggunakan Kompensasi Sambungan Referensi (CJC)

- (3) Gunakan tabel referensi standar termokopel yang sesuai, setelah nilai emf standar yang ekuivalen dengan  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  setelah terhubung dengan indikator termokopel UUT;
- (4) Bila penunjuk indikator suhu telah stabil, catat pembacaannya secara bersamaan dengan pembacaan sumber tegangan DC sebagai acuan pada konfigurasi di poin (2), ataupun pembacaan *reference multimeter* jika menggunakan konfigurasi sesuai poin (3) di atas. Sediakan formulir untuk pencatatan tersebut;
- (5) Untuk titik kalibrasi  $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ulangi langkah (4) dengan cara menurunkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling rendah sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (6) Untuk titik kalibrasi  $t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ulangi langkah (4) dengan cara menaikkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling tinggi sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (7) Catat suhu dan kelembaban relatif ruangan selama proses kalibrasi.

#### 6.4 Kalibrasi Simulator Suhu Untuk Sensor Jenis Termometer Tahanan Platina

Pengukuran dapat menggunakan konfigurasi 4 kawat, 3 kawat, atau 2 kawat, di mana konfigurasi 4 kawat direkomendasikan untuk mendapatkan akurasi terbaik. Langkah-langkah kalibrasi simulator tahanan adalah sebagai berikut:

- (1) Hubungkan simulator tahanan UUT dengan indikator acuan (*reference multimeter*) sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 6.

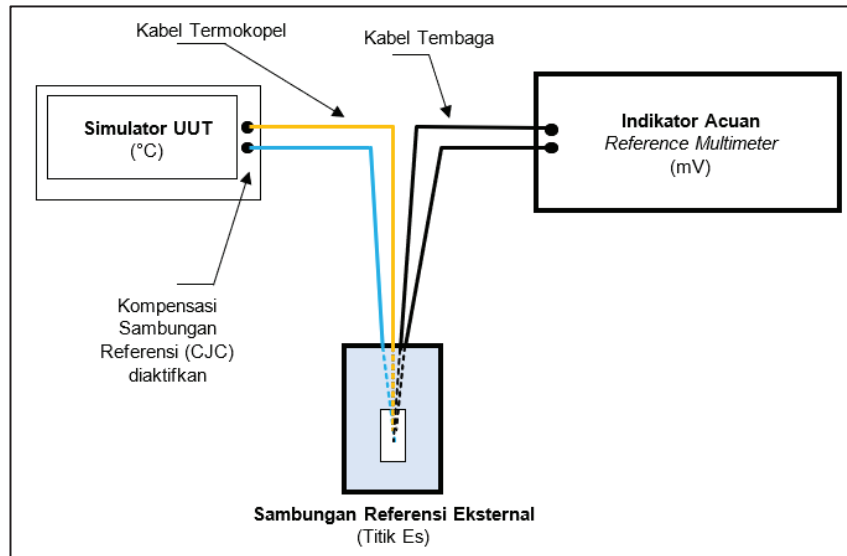


**Gambar 6.** Konfigurasi Kalibrasi Simulator Termometer Tahanan Platina Menggunakan Metode 4 Kawat.

- (2) Setel nilai suhu pada simulator UUT pada 0 °C setelah terhubung dengan indikator acuan;
- (3) Bila penunjukkan indikator acuan telah stabil, catat pembacaannya dalam satuan tahanan pada formulir yang telah disediakan, Bersama dengan nilai suhu yang disetel pada simulator UUT;
- (4) Untuk titik kalibrasi  $t < 0$  °C, ulangi langkah (3) dengan cara menurunkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling rendah sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (5) Untuk titik kalibrasi  $t > 0$  °C, ulangi langkah (3) dengan cara menaikkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling tinggi sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (6) Catat suhu dan kelembaban relatif ruangan selama proses kalibrasi.

### 6.5 Kalibrasi Simulator Suhu Untuk Sensor Jenis Termokopel dengan Fitur CJC Aktif

- (1) Buat sambungan antara masing-masing kutub positif (+) dan negatif (-) kawat termokopel dengan kawat tembaga. Sambungan ini adalah sambungan referensi eksternal yang akan dimasukkan ke dalam titik es;
- (2) Hubungkan simulator UUT dengan cara memasang kawat termokopel pada simulator UUT dan kawat tembaga pada indikator acuan, dan masukkan sambungan referensi eksternal ke dalam titik es. Selanjutnya, rangkailah simulator UUT dengan *reference multimeter* sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 7;
- (3) Setel nilai suhu simulator UUT pada 0 °C setelah terhubung dengan indikator acuan;
- (4) Bila penunjukkan indikator acuan telah stabil, catat pembacaannya dalam satuan tegangan (mV) pada formulir yang telah disediakan, bersama dengan nilai suhu yang disetel pada simulator UUT.

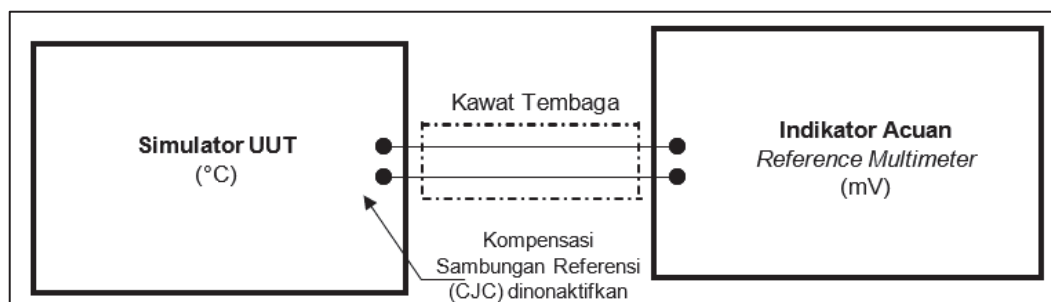


**Gambar 7.** Konfigurasi Kalibrasi Simulator Termokopel Menggunakan Kompensasi Sambungan Referensi (CJC)

- (5) Untuk titik kalibrasi  $t < 0$  °C, ulangi langkah (4) dengan cara menurunkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling rendah sesuai dengan rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (6) Untuk titik kalibrasi  $t > 0$  °C, ulangi langkah (4) dengan cara menaikkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling tinggi sesuai dengan rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (7) Catat suhu dan kelembaban relatif ruangan selama proses kalibrasi.

#### 6.6 Kalibrasi Simulator Suhu Untuk Sensor Jenis Termokopel dengan Fitur CJC Nonaktif

- (1) Hubungkan indikator termokopel dengan sumber tegangan DC menggunakan kawat termokopel atau kawat tembaga (lihat Gambar 8);



**Gambar 8.** Konfigurasi Kalibrasi Simulator Termokopel Tanpa Kompensasi Sambungan Referensi (CJC)

- (2) Setel nilai suhu simulator UUT pada 0 °C setelah terhubung dengan indikator acuan;
- (3) Bila penunjukkan indikator acuan telah stabil, catat pembacaannya dalam satuan tegangan (mV) pada formulir yang telah disediakan, bersama dengan nilai suhu yang



disetel pada simulator UUT;

- (4) Untuk titik kalibrasi  $t < 0$  °C, ulangi langkah (3) dengan cara menurunkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling rendah sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (5) Untuk titik kalibrasi  $t > 0$  °C, ulangi langkah (3) dengan cara menaikkan titik kalibrasi dengan kelipatan suhu tertentu sampai dengan suhu paling tinggi sesuai rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (6) Catat suhu dan kelembaban relatif ruangan selama proses kalibrasi.

## 7. ANALISIS DATA DAN EVALUASI KETIDAKPASTIAN

Analisis data untuk kalibrasi indikator dan simulator suhu dengan metode pengukuran dan simulasi kelistrikan, secara umum dapat dibagi ke dalam empat jenis pengolahan data sebagai berikut:

1. Kalibrasi indikator termometer tahanan (sebagai *measure*);
2. Kalibrasi indikator termokopel (sebagai *measure*);
3. Kalibrasi simulator termometer tahanan (sebagai *source*); dan
4. Kalibrasi simulator termokopel (sebagai *source*).

Keempat jenis pengolahan data kalibrasi ini secara umum memiliki model matematis yang sama, yaitu:

$$K_{UUT} = t_{std} - t_{UUT} \quad (7.1)$$

di mana nilai koreksi UUT ( $K_{UUT}$ ), diperoleh dari selisih nilai suhu penunjukkan UUT ( $t_{UUT}$ ), dengan hasil pengukuran standar ( $t_{std}$ ). Secara umum, penunjukkan UUT sudah dalam besaran suhu, namun hasil pengukuran standar biasanya masih dalam besaran listrik sesuai jenis sensornya, baik untuk kasus sebuah simulator suhu maupun indikator suhu. Sebagai contoh, jika hasil pengukuran tersebut adalah  $V_x$  dalam besaran tegangan listrik untuk jenis sensor termokopel tipe S, maka  $t_{std}$  dapat dihitung sesuai dengan persamaan (7.2).

$$t_{std} = P[V_x + K_{V_x} + K_{tk_{CJC}}] \quad (7.2)$$

$$(u_{K_{UUT}})^2 = (u_{t_{std}})^2 + (u_{t_{UUT}})^2 \quad (7.3)$$

di mana  $P$  adalah adalah fungsi konversi tegangan termokopel tipe S ke besaran suhunya mengacu kepada tabel referensi standar termokopel. Sebelum dikonversi, tegangan hasil pengukuran peralatan standar tersebut harus dikoreksi dengan beberapa nilai yaitu, koreksi dari hasil kalibrasi alat standar,  $K_{V_x}$ , serta koreksi hasil kalibrasi kawat termokopel yang dijadikan sambungan referensi eksternal untuk mengkompensasi CJC yaitu  $K_{tk_{CJC}}$ .

Secara prinsip, cara yang sama dilakukan juga untuk kasus hasil pengukuran alat standar tahanan, yaitu  $R_x$  yang masih dalam besaran tahanan listrik untuk jenis sensor tahanan platina Pt-100. Nilai  $t_{std}$  tersebut diperoleh dari hasil konversi menggunakan tabel referensi standar PRT Pt-100. Konversi dilakukan setelah nilai  $R_x$  dikoreksi terhadap hasil kalibrasi dari peralatan standar.

Setelah nilai koreksi UUT dihitung, berikutnya adalah evaluasi ketidakpastian dari nilai koreksi tersebut. Komponen ketidakpastian dapat diidentifikasi dari model matematis di persamaan (7.3) yaitu ketidakpastian yang berasal dari suhu standar yaitu  $u(t_{std})$  dan ketidakpastian dari suhu UUT,  $u(t_{UUT})$  yang dapat diurutkan sesuai dengan jenis UUT pada Tabel 2, di mana tanda ceklis menunjukkan komponen ketidakpastian tersebut harus diperhitungkan untuk suatu jenis indikator suhu dan simulator suhu. Ketidakpastian pengukuran harus dievaluasi dengan pedoman internasional JCGM 100:2008 mengenai "Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement".

**Tabel 2.** Matriks Komponen Ketidakpastian untuk Tiap Jenis Indikator dan Simulator Suhu

No	Komponen Ketidakpastian	Indikator Suhu			Simulator Suhu		
		PRT	Termokopel dengan CJC	Termokopel tanpa CJC	PRT	Termokopel dengan CJC	Termokopel tanpa CJC
$u(t_{std})$							
1	Kalibrasi Standar ( $u_{CV_x}$ )	√	√	√	√	√	√
2	Resolusi penunjukkan Standar ( $u_{res}$ )	√	√	√	√	√	√
3	Kalibrasi Termokopel sambungan reference eksternal ( $u_{C_{tk,CJC}}$ )		√			√	
4	Drift standar ( $u_{S,drift}$ )	√	√	√	√	√	√
5	Nilai titik es ( $u_{ice}$ )		√			√	
6	Drift kawat termokopel ( $u_{tk,drift}$ )		√			√	
7	Pengukuran Berulang Standar ( $u_{stdvs}$ )	√	√	√	√	√	√
8	Influence factors ( $u_{if}$ )		√			√	
9	Parasitic Voltage ( $u_{pv}$ )		√	√		√	√
$u(t_{UUT})$							
10	Resolusi penunjukkan UUT ( $u_{res}$ )	√	√	√	√	√	√
11	Pengukuran Berulang UUT ( $u_{stdvs UUT}$ )	√	√	√	√	√	√

Dengan mengasumsikan seluruh komponen ketidakpastian tidak saling berkorelasi, maka ketidakpastian gabungan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (7.4).

$$u_c = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2 + \dots + (c_n u_n)^2} \quad (7.4)$$

di mana  $u_1, u_2, \dots, u_n$  adalah komponen-komponen ketidakpastian,  $c_1, c_2, \dots, c_n$  adalah koefisien sensitivitas untuk setiap komponen ketidakpastian. Kemudian, ketidakpastian yang diperluas diperoleh dengan mengalikan ketidakpastian standar gabungan dengan faktor cakupan yang sesuai ( $k$ ) untuk memberikan probabilitas cakupan sekitar 95%.

Contoh analisis ketidakpastian untuk kalibrasi indikator suhu menggunakan sensor jenis termokopel tipe S dengan CJC aktif diuraikan dalam Lampiran A. Pendekatan yang sama dapat diterapkan untuk kasus kalibrasi simulator suhu. Namun, komponen ketidakpastian yang bersumber dari standar bukan lagi sumber tegangan DC acuan, tetapi diganti menjadi indikator acuan.

Selain itu, dalam hal simulator suhu digunakan sebagai standar untuk mengkalibrasi indikator suhu, di mana keduanya menggunakan fitur CJC aktif dan tampilan keduanya dalam satuan suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ), maka ketidakpastian yang bersumber dari sambungan referensi eksternal (titik es), sebagaimana diuraikan oleh Tabel 2 menjadi tidak relevan. Namun, ketidakpastian pengukuran CJC untuk kedua instrument tersebut harus dimasukkan ke dalam perhitungan ketidakpastian. Nilai ketidakpastian tersebut dapat diperoleh secara umum dari spesifikasi kedua instrument yang digunakan tersebut.

## 8. PELAPORAN

Hasil pengukuran yang dilaporkan dalam sertifikat kalibrasi harus mudah dipahami oleh pengguna untuk menghindari penyalahgunaan dan kesalahpahaman. Setiap sertifikat (laporan) kalibrasi harus menyertakan setidaknya informasi berikut ini:

- Nama dan alamat pelanggan yang melakukan pemesanan;
- Deskripsi yang jelas, kondisi, dan identifikasi unik indikator/simulator suhu yang dikalibrasi beserta produsen, model, nomor seri, dan/atau informasi lain yang diperlukan;
- Tanggal kalibrasi dan penerbitan sertifikat kalibrasi;
- Kondisi lingkungan/ruangan (misalnya suhu dan kelembaban relatif) tempat kalibrasi dilakukan;
- Identifikasi peralatan standar dan metode kalibrasi yang digunakan;
- Hasil kalibrasi harus melaporkan setidaknya tiga informasi untuk setiap titik kalibrasi, meliputi:
  - ✓ nilai suhu standar;

- ✓ nilai sinyal listrik yang ekuivalen dengan nilai suhu standar; dan
- ✓ nilai penunjukkan UUT;

CATATAN: Jika penunjukkan kedua standar dan UUT dalam satuan suhu ( $^{\circ}\text{C}$ ), nilai sinyal kelistrikan yang ekuivalen dengan nilai suhu standar tidak harus dilaporkan.

- Sensor yang digunakan, mencakup:
  - ✓ Jenis sensor (PRT atau termokopel);
  - ✓ Tipe sensor (jika termokopel);
  - ✓ Konfigurasi pengukuran tahanan (jika PRT);
  - ✓ Jumlah kanal (*channel*) pada UUT (jika multi kanal); dan
  - ✓ Rentang ukur kalibrasinya.
- Ketidakpastian harus dilaporkan pada tingkat kepercayaan 95% dengan nilai faktor cakupannya;
- Informasi terkait penggunaan *Cold Junction Compensation* (CJC) pada kasus termokopel;  
Catatan: Dalam hal kalibrasi dilakukan dengan CJC non aktif, perlu diberikan pernyataan bahwa hasil kalibrasi hanya valid dalam penggunaannya jika menggunakan kompensasi sambungan referensi eksternal.
- Pernyataan bahwa metode kalibrasi hanya menggunakan metode pengukuran dan simulasi kelistrikan; dan
- Informasi dokumen acuan dan versinya untuk tabel referensi standar yang digunakan.

### Daftar Pustaka

- ASTM E1137/E1137M-08, “*Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers*”, Diterbitkan Mei 2020;
- ASTM E230/E230M-17, “*Standard Specification for Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples*”, Diterbitkan November 2017;
- ASTM E563-22, “*Standard Practice for Preparation and Use of an Ice-Point Bath as a Reference Temperature*”, Diterbitkan Agustus 2022;
- EURAMET/cg-11/version 2.0:2011, (previously published as EA-10/11), “*Guidelines on the Calibration of Temperature Indicators and Simulators by Electrical Simulation and Measurement*”, Diterbitkan Maret 2011. [tersedia di <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines>];
- IEC 60584-1:2013, “*Thermocouples – Part 1: EMF specifications and tolerances*”;
- IEC 60584-3:2021, “*Thermocouples – Part 3: Extension and compensating cables – Tolerances and identification system*”;
- IEC 60751:2022, “*Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*”;
- JCGM 100:2008, “*Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*”;
- MSL Technical Guide 1 Version 3, “*The Ice Point*”, Diterbitkan Juli 2019.

## Lampiran A

### Contoh Analisis Ketidakpastian

Untuk kasus kalibrasi sebuah Indikator termokopel tipe S dengan kompensasi sambungan referensi diaktifkan.

#### A1. Prosedur dan Informasi Pengukuran

Indikator suhu yang dikalibrasi (UUT) dilengkapi dengan fasilitas kompensasi sambungan referensi (CJC). Prosedur kalibrasi yang digunakan mengikuti metode yang diberikan dalam Bab 6, Gambar 4. Sumber tegangan DC acuan yang digunakan dalam keadaan terkalibrasi.

Kabel termokopel referensi yang digunakan untuk kompensasi sambungan referensi eksternal telah dikalibrasi pada rentang suhu 18 °C hingga 40 °C. Suhu lingkungan yang tercatat selama kalibrasi indikator suhu adalah 23 °C ± 1 °C. Indikator suhu yang dikalibrasi adalah untuk sensor termokopel tipe S dengan resolusi 0,1 °C (tampilan digital).

#### A2. Hasil pengukuran

**Tabel A.1.** Contoh Hasil Pengukuran Indikator Suhu Metode Simulasi Kelistrikan

Suhu Kalibrasi	Nilai penyetelan sumber tegangan DC acuan (*)	Indikasi Indikator Suhu
1000 °C	9587,1 μV	999,8 °C

(\*) Nilai penyetelan sumber tegangan DC acuan harus ekuivalen dengan suhu kalibrasi, yang ditentukan berdasarkan tabel referensi standar yang sesuai dengan termokopel tipe S.

#### A.3 Model Pengukuran

Nilai yang dicari dari proses kalibrasi adalah nilai koreksi UUT ( $K_{UUT}$ ) untuk diterapkan pada tampilan indikator ( $t_{UUT}$ ) ketika mengukur output termokopel standar pada suhu kalibrasi  $t_{std}$ . Model matematis perhitungan  $K_{UUT}$  ditunjukkan oleh Persamaan A.1.

$$K_{UUT} = t_{std} - t_{UUT} \quad (A.1)$$

$$t_{std} = P[V_X + K_{V_X} + K_{tk_{CJC}}] \quad (A.2)$$

$$(u_{K_{UUT}})^2 = (u_{t_{std}})^2 + (u_{t_{UUT}})^2 \quad (A.3)$$

$$(u_{t_{std}})^2 = (c_1 u_{res.std})^2 + (c_2 u_{C_{V_X}})^2 + (c_3 u_{S_{drift}})^2 + (c_4 u_{stddev_S})^2 + (c_5 u_{if})^2 \quad (A.4)$$

$$+ (c_6 u_{pv})^2 + (c_7 u_{tk_{CJC}})^2 + (c_8 u_{tk_{drift}})^2 + (c_9 u_{ice})^2$$

$$(u_{t_{UUT}})^2 = (c_{10} u_{res.UUT})^2 + (c_{11} u_{stddev_UUT})^2 \quad (A.5)$$

Hal yang perlu diperhatikan dalam perhitungan ketidakpastian adalah koefisien sensitivitas ( $c_i$ ), yang membantu mengestimasi ketidakpastian dengan mengkonversi komponen-komponen ketidakpastian ke unit pengukuran yang sama, dengan

mempertimbangkan bahwa kontribusi ketidakpastian harus dalam unit pengukuran yang sama. Jika sumber ketidakpastian berada dalam unit yang berbeda, maka koefisien sensitivitas diperlukan. Untuk termometer tahanan platina Pt-100, nilai koefisien sensitivitas adalah  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}/\Omega$  atau  $0,4 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$ . Sedangkan untuk termokopel, nilai koefisien sensitivitas merupakan turunan pertama dari persamaan referensi termokopel pada tabel referensi standar termokopel, menurut Persamaan A.7.

$$c_i = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (\text{A.7})$$

di mana  $c_i$  adalah koefisien sensitivitas ( $\text{mV}/^\circ\text{C}$ ),  $E$  adalah tegangan termoelektrik ( $\text{mV}$ ), dan  $t$  adalah suhu yang sebanding dengan tegangan termoelektrik tersebut ( $^\circ\text{C}$ ). Persamaan tegangan termoelektrik  $E$  sebagai fungsi  $t$  dapat dilihat pada tabel referensi standar termokopel. Sebagai tambahan, nilai koefisien sensitivitas termokopel berbeda-beda tergantung pada jenis termokopel dan nilai suhu titik kalibrasinya. Sebagai contoh, Tabel A.2 menyajikan koefisien sensitivitas termokopel tipe S pada beberapa nilai suhu.

**Tabel A.2.** Koefisien Sensitivitas Termokopel Tipe S pada Suhu  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  dan  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$

$t / ^\circ\text{C}$	$c_i \text{ (mV}/^\circ\text{C)}$
0	0,0054
30	0,0060
1000	0,0115

#### A4. Kontribusi Ketidakpastian

- **Resolusi (daya baca) sumber tegangan DC acuan ( $u_{res.std}$ ):**

Keluaran dari sumber tegangan DC acuan dianggap sama dengan nilai penyetelannya, dalam batas yang ditentukan oleh resolusinya. Karena sumber tegangan DC acuan memiliki resolusi  $1 \text{ } \mu\text{V}$ , maka nilai batasnya adalah  $\pm 0,5 \text{ } \mu\text{V}$ , dan ketidakpastian bakunya  $0,29 \text{ } \mu\text{V}$ .

- **Kalibrasi sumber tegangan DC acuan ( $u_{cv_x}$ ):**

Koreksi sumber tegangan DC acuan dan ketidakpastiannya diambil dari sertifikat kalibrasinya. Nilai ketidakpastian tersebut adalah  $\pm 1 \text{ } \mu\text{V}$  dengan faktor cakupan  $k = 2$ , sehingga nilai ketidakpastian bakunya adalah  $\pm 0,5 \text{ } \mu\text{V}$ .

- **Drift sumber tegangan DC acuan ( $u_{S,drift}$ ):**

Nilai koreksi kalibrasi saat ini dibandingkan dengan kalibrasi sebelumnya menunjukkan bahwa penyimpangan (*drift*) sumber tegangan DC acuan nilainya sekitar  $0,1 \text{ } \mu\text{V}$ , sehingga diperoleh ketidakpastian bakunya sebesar  $0,058 \text{ } \mu\text{V}$ .

- **Pengulangan pembacaan sumber tegangan DC acuan ( $u_{stdev,S}$ ):**

Pengulangan pembacaan sumber tegangan DC acuan dihitung dari rangkaian pembacaan sumber tegangan DC acuan yang memberikan simpangan baku yang

berdistribusi normal dengan derajat kebebasan  $\nu = n - 1$ . Dikarenakan penunjukkannya yang sama selama proses kalibrasi, pada kasus ini, ketidakpastian bakunya diestimasi tidak signifikan.

- **Influence Factors ( $u_{if}$ ):**

*Influence factors* adalah suatu nilai mempengaruhi pengukuran pada indikator suhu, yang disebabkan oleh pengaruh suhu lingkungan terhadap akurasi pengukuran CJC. Nilainya dapat diperoleh dari spesifikasi alat yang diterbitkan oleh produsen, yang pada kasus ini tidak melebihi  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sehingga diperoleh ketidakpastian baku sebesar  $0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- **Parasitic Voltages ( $u_{pv}$ ):**

*Parasitic voltage* adalah suatu nilai yang timbul pada konektor atau dari penggunaan pemindai (*scanner*) atau sakelar pemilih (*selector switch*). Ketidakpastian bakunya diestimasi sekitar  $1,15\text{ }\mu\text{V}$ .

- **Kalibrasi Kabel Termokopel Referensi ( $u_{C_{tk\_CJC}}$ ):**

*Emf* yang dihasilkan oleh kabel termokopel referensi akan sesuai dengan suhu di terminal masukan indikator suhu. Suhu ini tidak diukur secara terpisah, tetapi (untuk kasus khusus ini) diasumsikan berada dalam batas  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  hingga  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nilai *emf* (sebelum dikoreksi) akan berada dalam kisaran  $131\text{ }\mu\text{V}$  hingga  $173\text{ }\mu\text{V}$ . Penyimpangan keluaran kabel termokopel referensi dari standar dalam kisaran suhu ini yaitu  $-1,8\text{ }\mu\text{V}$  ( $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dengan ketidakpastian terentang ( $k = 2$ ) sebesar  $1,5\text{ }\mu\text{V}$  ( $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

- **Drift Kabel Termokopel Referensi ( $u_{tk\_drift}$ ):**

Riwayat kalibrasi kabel termokopel referensi menunjukkan pergeseran koreksi termokopel tidak lebih dari  $0,6\text{ }\mu\text{V}$  ( $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), sehingga ketidakpastian bakunya  $0,34\text{ }\mu\text{V}$ .

- **Suhu Sambungan Referensi/Deviasi Titik Es ( $u_{ice}$ ):**

Karena sambungan referensi dikondisikan pada titik es, maka ketidakpastian baku dianggap  $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Penjelasan tentang koefisien sensitivitas: Dalam sumber ketidakpastian, semua kontribusi mengacu pada indikasi nilai  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Koefisien Seebeck pada suhu  $0^{\circ}\text{C}$  lebih kecil ( $5,4\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ) daripada koefisien Seebeck pada suhu  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $11,5\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ). Oleh karena itu, ketidakpastian suhu sambungan referensi ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) harus dikalikan faktor  $5,4/11,5$  ketika mengevaluasi ketidakpastian pengukuran di suhu pengukuran  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- **Resolusi (daya baca) dari indikator UUT ( $u_{res.UUT}$ ):**

Resolusi (daya baca) dari indikator suhu merupakan sumber ketidakpastian. Karena angka paling kecil dari indikator adalah  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , maka batasnya setara dengan  $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sehingga ketidakpastian bakunya adalah  $0,029\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- **Pengulangan pembacaan UUT ( $u_{stdev.UUT}$ ):**

Pengulangan pembacaan UUT dihitung dari rangkaian pembacaan UUT yang memberikan simpangan baku yang berdistribusi normal dengan derajat kebebasan  $\nu = n -$



1. Ketidakpastian baku Tipe A, misalnya, 0,0013 °C.

• **Korelasi:**

Tidak ada kuantitas masukan yang dianggap berkorelasi pada tingkat yang signifikan.

**A5. Budget Ketidakpastian**

Sesuai dengan penjelasan pada Bab 7, dan mengacu pada Persamaan 7.1, Tabel A.3 menyajikan contoh hasil perhitungan koreksi pada kalibrasi indikator suhu metode simulasi kelistrikan.

**Tabel A.3.** Contoh Hasil Perhitungan Koreksi

Titik kalibrasi suhu yang diinginkan	=	1000 °C
Penyetelan sumber tegangan DC acuan yang ekuivalen dengan titik kalibrasi suhu yang diinginkan (hasil konversi menggunakan tabel referensi standar termokopel)	=	9587,1 μV
Koreksi dari kalibrasi sumber tegangan DC acuan	=	0 μV
Koreksi dari kalibrasi sensor termokopel tipe S	=	1,8 μV
Penunjukkan sumber tegangan DC acuan terkoreksi	=	9589,9 μV
Titik kalibrasi suhu acuan yang sebenarnya (hasil konversi menggunakan tabel referensi standar termokopel) [ $t_{std}$ ]	=	1000,3 °C
Pembacaan oleh indikator UUT [ $t_{UUT}$ ]	=	999,8 °C
Koreksi pembacaan UUT [ $K_{UUT}$ ]	=	0,5 °C

Selanjutnya, Tabel A.4. menampilkan contoh perhitungan ketidakpastian berdasarkan komponen-komponen yang diuraikan di Bagian A4.

**Tabel A.4.** Contoh Perhitungan Ketidakpastian Kalibrasi Indikator dengan Kompensasi Sambungan Referensi (CJC) yang diaktifkan, Menggunakan Sensor Termokopel Tipe S

Simbol	Sumber Ketidakpastian	Distribusi	$u_i$	Sensitivity coef ( $c_i$ )	$u_i \times c_i$	$v_i$	$(u_i \times c_i)^2$	$(u_i \times c_i)^4/v_i$
$u_{res.std}$	Resolusi Sumber Tegangan DC Acuan	Rectangular Tipe B, $\sqrt{3}$	0,29 μV	11,5 μV/°C	0,025 °C	100	6,359 2E-04	4,043 9E-09
$u_{CV_x}$	Kalibrasi Sumber Tegangan DC Acuan	Normal Tipe B, 2	0,50 μV	11,5 μV/°C	0,043 °C	100	1,890 4E-03	3,573 5E-08
$u_{s.drift}$	Drift Sumber Tegangan DC Acuan	Rectangular Tipe B, $\sqrt{3}$	0,058 μV	11,5 μV/°C	0,005 °C	100	2,543 7E-05	6,470 2E-12
$u_{stdev.S}$	Pengulangan Pembacaan Sumber Tegangan DC Acuan	Normal Tipe A, $\sqrt{n}$	0,0 °C	1 °C	0,000 °C	4	0,000 0E+00	0,000 0E+00
$u_{if}$	Influence Factor	Rectangular Tipe B, $\sqrt{3}$	0,11 °C	1 °C	0,110 °C	100	1,210 0E-02	1,464 1E-06
$u_{pv}$	Parasitic Voltages	Rectangular Tipe B, $\sqrt{3}$	1,15 μV	11,5 μV/°C	0,100 °C	100	1,000 0E-02	1,000 0E-06
$u_{ctk.cjc}$	Kalibrasi Kabel Termokopel Referensi	Normal Tipe B, 2	0,75 μV	11,5 μV/°C	0,065 °C	100	4,253 3E-03	1,809 1E-07
$u_{tk.drift}$	Drift Kabel Termokopel Referensi	Rectangular Tipe B, $\sqrt{3}$	0,34 μV	11,5 μV/°C	0,030 °C	100	8,741 0E-04	7,640 5E-09
$u_{ice}$	Suhu Sambungan Referensi/Deviasi Titik Es	Rectangular Tipe B, $\sqrt{3}$	0,02 °C	0,470 °C	0,009 °C	100	8,819 7E-05	7,778 6E-11
$u_{res.UUT}$	Resolusi Penunjukan UUT	Rectangular Tipe B, $\sqrt{3}$	0,029 °C	1 °C	0,029 °C	100	8,410 0E-04	7,072 8E-09
$u_{stdev.UUT}$	Pengulangan Pembacaan UUT	Normal Tipe A, $\sqrt{n}$	0,0013 °C	1 °C	0,001 °C	4	1,800 0E-06	8,100 0E-13
Sums							3,071 0E-02	2,699 6E-06
Ketidakpastian Gabungan $u_c$							0,18	
Derajat kebebasan efektif ( $v_{eff}$ )							389	
Faktor cakupan pada $v_{eff}$ dan 95% ( $k$ )							2,0	
Ketidakpastian Terentang, $U_{95} = k \times u_c$							0,36	

## A6. Laporan Kalibrasi

Detail laporan harus berisi informasi yang mengacu pada Bab 8. Untuk studi kasus ini, secara umum dapat dilaporkan koreksi indikator suhu pada pembacaan 999,80 °C dan dengan kompensasi sambungan internal adalah  $(+0,50 \pm 0,36)$  °C. Koreksi ini diperoleh dengan menggunakan metode pengukuran dan simulasi kelistrikan saja. Ketidakpastian yang dilaporkan dinyatakan dengan faktor cakupan  $k = 2$ , dengan tingkat kepercayaan 95%. Contoh penyajian tabel hasil kalibrasi dapat dilihat pada Tabel A.5.

**Tabel A.5.** Contoh Penyajian Tabel Hasil Kalibrasi Indikator Suhu

Penunjukkan Standar	Penunjukkan Alat	Koreksi	Ketidakpastian
1000,30 °C	9588,90 $\mu$ V	999,80 °C	0,50 °C
			0,36 °C