

SNSU PK.S-05:2024

Panduan Kalibrasi

Termometer Tahanan Platina dengan Metode Perbandingan



SNSU PK.S-05:2024

PANDUAN KALIBRASI TERMOMETER TAHANAN PLATINA DENGAN METODE PERBANDINGAN

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

Kontributor : 1. Dede Erawan
2. Suherlan

Desain Sampul : Bagus Muhammad Irvan – BSN

Direktorat SNSU Termoelektrik dan Kimia
Badan Standardisasi Nasional

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2024

Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Termometer Tahanan Platina dengan Metode Perbandingan, SNSU PK.S-05:2024, diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi termometer tahanan platina dengan metode perbandingan 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 9 Desember 2024

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	2
3.1 Kedalaman Pencelupan.....	2
3.2 Koefisien Sensitivitas.....	3
3.3 Histeresis.....	3
3.4 Pelaporan Hasil Kalibrasi.....	5
3.5 <i>Self-heating</i>	7
4. PERALATAN DAN SET UP KALIBRASI	7
5. PRA KALIBRASI	9
5.1 Rekaman Teknis.....	9
5.2 Pengkondisian Peralatan	9
5.3 Pembuatan Titik Es.....	9
6. LANGKAH KERJA	10
7. ANALISIS DATA	11
8. EVALUASI KETIDAKPASTIAN	12
8.1 Peralatan Standar ($u\delta_{Std}$)	14
8.2 Peralatan yang Dikalibrasi (δR_{UUT}).....	16
8.3 Media Kalibrasi (δ_{Med}).....	18
9. PELAPORAN	19
Daftar Pustaka	21
Lampiran A. Metode Konversi Resistansi ke Suhu untuk Persamaan ITS-90	22
Lampiran B. Metode Konversi Resistansi ke Suhu untuk Persamaan CVD	24
Lampiran C. Metode Penentuan Koefisien Persamaan Callendar Van Dusen	27
Lampiran D. Contoh Kalibrasi Termometer Tahanan Platina	30

1. RUANG LINGKUP

1.1 Dokumen ini bertujuan sebagai panduan kalibrasi Termometer Tahanan Platina (*Platinum Resistance Thermometer* (PRT)) dengan metode perbandingan, pada rentang ukur sesuai kemampuan termometer tahanan platina secara umum yaitu $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ sampai dengan $670\text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.2 Panduan ini menjelaskan prosedur untuk melakukan kalibrasi termometer tahanan platina dengan metode perbandingan di dalam suatu media kalibrasi.

1.3 Termometer standar yang digunakan harus terkalibrasi dan tertelusur ke satuan sistem internasional (SI). Termometer standar tersebut dapat berupa *Standard Platinum Resistance Thermometer* (SPRT), atau Termometer Tahanan Platina yang mempunyai tingkat akurasi yang lebih tinggi atau setidaknya sama dibandingkan termometer tahanan platina yang dikalibrasi.

1.4 Panduan ini diharapkan dapat dijadikan acuan untuk meningkatkan harmonisasi prosedur kalibrasi termometer tahanan platina oleh laboratorium kalibrasi yang diakreditasi oleh KAN maupun laboratorium pengujian yang melaksanakan kalibrasi *in-house*.

2. TERMINOLOGI

2.1 Termometer Tahanan Platina (*Platinum Resistance Thermometer*): Termometer yang peka terhadap perubahan suhu, terbuat dari bahan platina, dengan hubungan fungsional antara resistansi dan suhu yang telah ditentukan, sesuai dengan standar yang merujuk pada dokumen internasional seperti ITS-90, IEC 60751:2022, atau dokumen serupa lainnya yang diterbitkan dan diakui secara internasional, misalnya ASTM E1137/E1137M 08:2020, DKD-R, DKD-E, Euramet, dan lain-lain.

2.2 Pengukuran Resistansi: Pengukuran resistansi listrik pada sebuah termometer tahanan platina dapat dilakukan menggunakan konfigurasi dua kabel, tiga kabel, atau empat kabel. Dalam pengukuran dua kabel, hasil pengukuran mencakup resistansi dari kedua kabel penghubung selain resistansi resistornya. Pada pengukuran tiga kabel, sepasang kabel dihubungkan ke titik yang sama pada resistor yang diukur, sehingga resistansi kabel tersebut dikompensasi, namun resistansi kabel lainnya masih terukur. Sedangkan pada pengukuran empat kabel, satu pasang kabel digunakan untuk memasok arus pengukuran, dan satu pasang lainnya untuk mengukur potensial listrik yang melintasi resistor. Dengan cara ini, pengukuran ini bebas dari resistansi kabel yang digunakan selama jenis kabel, panjang kabel, diameter kabel relatif sama.

2.3 Titik es: Keseimbangan suhu yang dicapai selama proses perubahan wujud dari es menjadi air ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) yang dapat diukur dengan ketidakpastian secara umum kurang dari 20

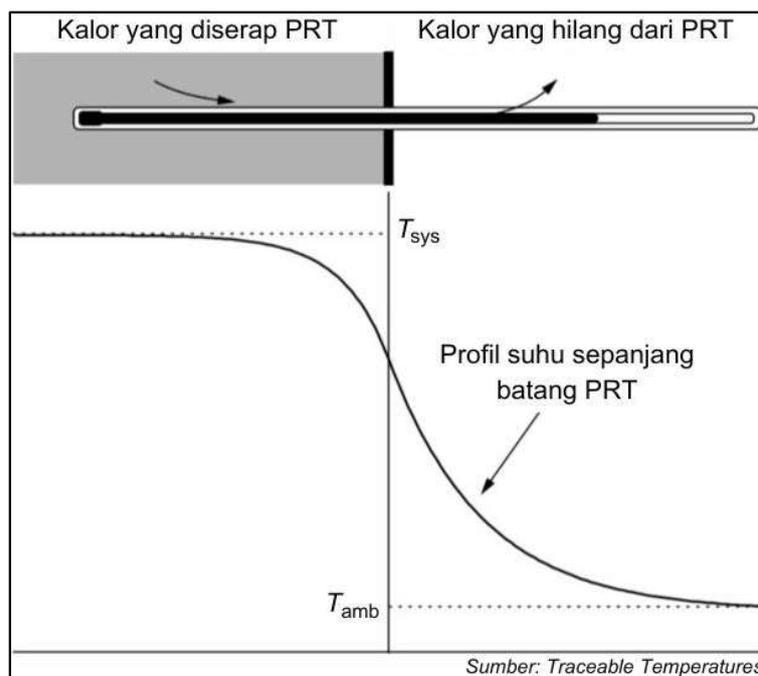
mK, bila direalisasikan dengan menggunakan prosedur yang tepat, sesuai panduan seperti MSL Technical Guide 1 Versi 3, ASTM E563-22:2022, atau dokumen serupa lainnya yang diterbitkan dan diakui secara internasional.

2.4 Resistansi Nominal: Nilai resistansi R_0 dari sebuah resistor atau termometer tahanan platina pada suhu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, yang tercantum pada penandaan termometer, biasanya dibulatkan ke ohm terdekat. Termometer tahanan platina sering kali dikarakterisasi berdasarkan resistansi nominalnya. Sebagai contoh, termometer tahanan platina dengan $R_0 = 100\ \Omega$ sering disebut sebagai Pt-100, dan Pt-25 memiliki nilai $R_0 = 25\ \Omega$.

3. PRINSIP-PRINSIP KALIBRASI

3.1 Kedalaman Pencelupan

Kedalaman pencelupan batang *probe* sensor termometer tahanan platina dapat menjadi salah satu kontributor kesalahan pengukuran yang dikenal dengan kesalahan pencelupan (*stem error*). Gambar 1 menunjukkan profil distribusi suhu pada batang termometer tahanan platina ketika dicelupkan ke dalam suatu media kalibrasi dengan suhu lebih tinggi dari lingkungan. Dari Gambar 1 terlihat bahwa termometer tahanan platina dapat menjadi perantara perpindahan/kehilangan panas dari media suhu ke lingkungan. Sehingga kedalaman pencelupan yang kurang memadai dapat menimbulkan *error* terhadap hasil pengukuran suhu dari termometer tersebut.



Gambar 1. Profil Distribusi Temperatur Sepanjang Batang PRT

Secara umum untuk pengukuran di laboratorium kalibrasi dengan akurasi 0,0001%, termometer tahanan platina harus tercelup dengan kedalaman setidaknya 15 kali diameter *probe* ditambah dengan panjang elemen sensor. Dalam hal panjang elemen sensor tidak diketahui, maka perhitungan kedalaman minimum pencelupan dapat didekati dengan nilai tidak kurang dari 20 kali diameter *probe*.

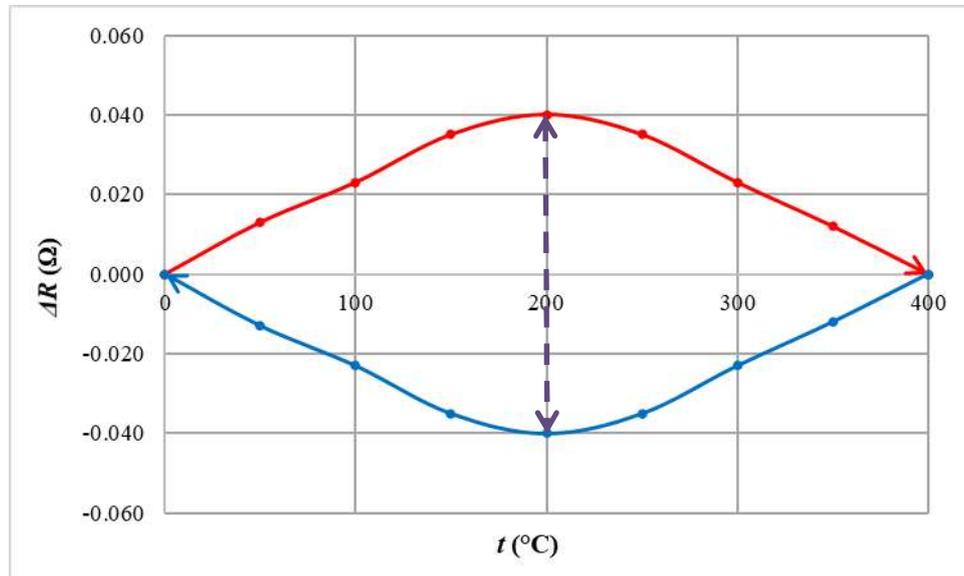
3.2 Koefisien Sensitivitas

Hal yang perlu diperhatikan dalam perhitungan ketidakpastian adalah koefisien sensitivitas (c_i), yaitu faktor yang menghubungkan perubahan dalam suatu besaran input dengan perubahan pada besaran output yang diukur. Koefisien sensitivitas membantu untuk memahami bagaimana perubahan kecil dalam besaran input mempengaruhi besaran output. Dalam konteks evaluasi ketidakpastian, hal ini digunakan untuk menghitung kontribusi ketidakpastian dari setiap komponen input terhadap ketidakpastian total. Sehingga walaupun satuan komponen input berbeda-beda, namun koefisien sensitivitas dapat membantu mengestimasi ketidakpastian dengan mengkonversi komponen-komponen ketidakpastian ke satuan pengukuran yang sesuai dengan ketidakpastian total. Untuk termometer tahanan platina Pt-100, nilai koefisien sensitivitas dapat didekati dengan nilai $2,5 \text{ } ^\circ\text{C}/\Omega$ atau $0,4 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$. Sedangkan untuk termometer standar Pt-25, nilai koefisien sensitivitasnya didekati dengan nilai $10 \text{ } ^\circ\text{C}/\Omega$ atau $0,1 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}$.

3.3 Histeresis

Histeresis pada termometer adalah sifat yang menunjukkan perubahan hubungan antara resistansi dan suhu akibat perubahan nilai suhu yang bersiklus (siklus termal), atau dalam kata lain keluaran termometer tidak hanya tergantung nilai suhu saja, namun juga riwayat perubahan suhu sebelumnya. Keluaran termometer dengan kondisi arah suhu naik akan berbeda dengan keluaran pada kondisi yang arah suhunya turun, walaupun nilai suhunya sama, hal tersebut diilustrasikan pada Gambar 2. Besarnya perubahan dikarenakan oleh histeresis bervariasi untuk tiap termometer, tergantung dari rancangan dan kualitas termometer tersebut. Selama proses kalibrasi, dan pada saat penggunaan di lapangan, secara umum termometer akan mengalami siklus termal, yaitu dari suhu minimum naik hingga ke suhu maksimum dan kemudian turun kembali ke arah suhu minimum. Sehingga pengaruh histeresis ini harus ditentukan sebagai salah satu sumber ketidakpastian. Perubahan hasil pengukuran karena histeresis, secara umum (walaupun tidak selalu), paling besar terjadi di tengah-tengah rentang ukur. Sehingga ketidakpastian

seringkali diestimasi dari perbedaan nilai resistansi yang diukur pada suhu titik tengah rentang kalibrasi, yang diambil ketika arah perubahan suhu naik, dan ketika arah perubahan suhu turun. Perbedaan tersebut, diwakili dengan garis putus-putus pada kurva di Gambar 2.



Gambar 2. Histeresis pada Termometer Tahanan Platina

Estimasi dan laporan ketidakpastian karena histeresis dapat dilakukan dengan empat pendekatan, di antaranya:

- 1) Mengacu ke spesifikasi teknis termometer tahanan platina, di mana sebagian termometer tahanan platina dilengkapi dengan buku manual/spesifikasi yang memuat informasi nilai histeresis dari termometer tahanan platina oleh pabrik pembuat. Nilai tersebut dapat digunakan untuk mengestimasi nilai histeresis saat termometer tahanan platina dikalibrasi, dengan pendekatan distribusi kotak (*rectangular*).
- 2) Pengukuran langsung dengan metode baku, efek histeresis dapat ditentukan melalui percobaan sesuai dengan metode baku yang telah dikenal, misal dari DKD-R 5.1. Proses ini dimulai dengan kalibrasi yang arah peningkatan suhunya dilakukan secara bertahap, dimulai dari titik ukur suhu terendah, dengan keluaran R_{Min} , kemudian meningkat ke titik pengukuran di tengah rentang suhu, sehingga diperoleh R_{Mid} . Berlanjut, setelah pengukuran pada suhu maksimum R_{Max} , arah perubahan suhu segera diubah kembali turun ke suhu tengah, untuk mendapatkan nilai keluaran tengah yaitu R_{Mid} kedua. Untuk lebih mudah perhitungan histeresis diperoleh sebagaimana dijelaskan pada skema pengukuran sederhana berikut:

- Rentang titik ukur minimal ($R_1 = R_{Min}$)
- Rentang titik ukur tengah ($R_2 = R_{Mid}$)
- Rentang titik ukur maksimal ($R_3 = R_{Max}$)
- Rentang titik ukur tengah ($R_4 = R_{Mid}$)

$$\Delta R_{Hys} = |R_4 - R_2| \quad (3.1)$$

- 3) Jika histeresis tidak diukur dan tidak ada informasi lain yang dapat digunakan, maka nilai ketidakpastian karena histeresis dapat diestimasi sebesar 0,2% dari total rentang ukur termometer tahanan platina dalam satuan suhu.
- 4) Jika histeresis tidak dimasukkan ke dalam perhitungan ketidakpastian, maka di dalam laporan kalibrasi hal ini harus dinyatakan dan diberikan catatan bahwa hasil kalibrasi hanya berlaku untuk arah suhu naik dan ketika pengukuran terjadi dalam arah turun, akan muncul efek histeresis yang dapat menyebabkan kesalahan pengukuran hingga 2% dari rentang pengukuran maksimum.

3.4 Pelaporan Hasil Kalibrasi

Cara pelaporan hasil kalibrasi dipilih berdasarkan kebutuhan pengguna, tingkat akurasi yang diperlukan, dan kemudahan dalam memanfaatkan data yang diperoleh. Selain itu, cara pelaporan hasil harus dipastikan terhindar dari munculnya tambahan kesalahan yang signifikan ataupun potensi penggunaan yang kurang tepat. Setidaknya ada dua cara pelaporan kalibrasi yang umum dilakukan, yaitu dalam bentuk persamaan kalibrasi dan dalam bentuk tabel hasil kalibrasi. Pelaporan dengan bentuk persamaan kalibrasi memiliki kelebihan terkait dengan fleksibilitasnya dalam menentukan suhu pada nilai tahanan berapapun selama masih dalam rentang kalibrasinya, sementara tabel hasil kalibrasi dapat menyediakan referensi langsung yang sederhana dan praktis tanpa perhitungan namun dibatasi hanya pada titik-titik kalibrasi yang tersedia. Penentuan hasil kalibrasi diluar titik-titik kalibrasi dengan cara yang tidak tepat dapat menyebabkan munculnya kesalahan tambahan pada hasil kalibrasi. Sehingga pelaporan dengan bentuk tabel kalibrasi sederhana lebih cocok diterapkan pada termometer tahanan platina yang digunakan oleh industri atau pengguna akhir (*end user*) yang memiliki titik-titik pengukuran yang telah ditetapkan sebelumnya.

Sementara itu, untuk laporan kalibrasi yang diterbitkan dari laboratorium rujukan nasional (dalam hal ini SNSU BSN) untuk laboratorium kalibrasi, atau antar laboratorium kalibrasi, disarankan untuk mencantumkan persamaan matematika yang menggambarkan hubungan antara suhu dan tahanan keluaran termometer tahanan platina yang dikalibrasi. Sehingga pada penerapannya hasil kalibrasi tersebut dapat digunakan pada titik kalibrasi

mana pun sesuai permintaan pelanggan kalibrasi. Persamaan matematika yang digunakan tersebut dapat berupa Persamaan ITS-90, persamaan Callendar Van Dusen (CVD), atau persamaan lain yang dapat digunakan untuk mendekati karakteristik termometer tahanan platina (PRT).

Pada Panduan ini, pembahasan akan menggunakan model persamaan CVD, yang menunjukkan hubungan antara resistansi keluaran termometer tahanan platina (R_t) dengan suhu (t), yang pada awalnya ditunjukkan sebagaimana Persamaan (3.2).

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta \frac{t}{100} \left(\frac{t}{100} - 1 \right) - \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \right\} \quad (3.2)$$

di mana $\beta = 0$ untuk $t > 0$ °C. Kemudian perkembangan berikutnya, persamaan CVD juga dikenal dalam bentuk Persamaan (3.3).

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (3.3)$$

di mana $C = 0$ untuk $t > 0$ °C. Persamaan (3.2) ini merupakan persamaan yang lebih dikenal di dokumen-dokumen standar. Secara matematis koefisien kedua persamaan tersebut memiliki hubungan sebagaimana persamaan (3.4), (3.5) dan (3.6) sehingga ketika sudah mengetahui persamaan dalam bentuk yang satu, akan dengan mudah dapat pula dihitung persamaan dalam bentuk lainnya.

$$A = \alpha \left(1 + \frac{\delta}{100} \right) \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad (3.4)$$

$$B = -10^{-4} \alpha \delta \text{ } ^\circ\text{C}^{-2} \quad (3.5)$$

$$C = -10^{-8} \alpha \beta \text{ } ^\circ\text{C}^{-4} \quad (3.6)$$

kembali ke Persamaan (3.3), dapat dijelaskan bahwa

R_t = resistansi pada suhu t , dalam Ω

R_0 = resistansi saat $t = 0$ °C, dalam Ω

t = suhu (ITS-90), dalam °C

A = Koefisien, dengan nilai umumnya adalah $3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

B = Koefisien, dengan nilai umumnya adalah $-5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$

C = Koefisien, dengan nilai umumnya adalah $-4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$

Catatan: Pada prakteknya setiap termometer tahanan platina memiliki nilai-nilai R_0 , A , B , dan C yang unik dan berbeda dari nilai keumuman di atas, dan nilai-nilai tersebut diperoleh melalui proses kalibrasi.

Koefisien persamaan CVD diperoleh melalui metode regresi untuk menghasilkan fungsi terbaik yang sesuai dengan data pengukuran, yaitu pasangan nilai suhu standar dan

nilai tahanan keluaran dari termometer tahanan platina pada setiap titik ukur. Akurasi hasil regresi meningkat seiring bertambahnya jumlah titik ukur, karena hal ini meningkatkan derajat kebebasan yang secara statistik mendekati hasil ke populasi sebenarnya, sehingga mengurangi potensi bias.

Aturan umum dalam menentukan jumlah titik ukur adalah tiga kali jumlah koefisien persamaan. Untuk persamaan CVD dengan tiga koefisien, diperlukan setidaknya 9 titik ukur. Jika kondisi tidak memungkinkan, jumlah titik ukur dapat dikurangi dengan syarat derajat kebebasan tipe A tidak kurang dari 2. Dalam hal ini, regresi minimal dapat dilakukan dengan 5 titik ukur. Penjelasan lebih rinci mengenai metode regresi dan penentuan koefisien persamaan CVD tersedia di Lampiran C.

3.5 *Self-heating*

Self-heating adalah kenaikan suhu pada elemen termometer tahanan platina yang disebabkan oleh panas dari daya listrik yang masuk ke dalam elemen tersebut. Besarnya efek ini tergantung pada arus yang digunakan pada termometer tahanan platina dan seberapa cepat panas dapat keluar dari elemen termometer tahanan platina ke sekitarnya. Nilai *self-heating* dapat diukur dengan metode tertentu, misalnya yang tercantum dalam DKD-R 5.1. Selain itu, beberapa termometer tahanan platina mencantumkan nilai *self-heating* dalam spesifikasi teknisnya, yang dapat digunakan untuk memperkirakan ketidakpastian akibat *self-heating*. Dalam hal tidak ada informasi lain, maka untuk termometer tahanan platina dengan kondisi yang baik, nilai *self-heating* dapat diestimasi sebesar 2 – 4 mK dengan sebaran kebolehjadian rectangular.

4. PERALATAN DAN SET UP KALIBRASI

Peralatan yang diperlukan dalam kalibrasi termometer tahanan platina dengan metode perbandingan di antaranya sebagai berikut:

- Termometer standar, dapat berupa *Standard Platinum Resistance Thermometer* (SPRT) atau termometer tahanan platina standar sekunder (Pt-100) yang telah terkalibrasi sebelumnya.
- Indikator tahanan, dapat berupa *Digital Multimeter* (DMM) atau jembatan tahanan (*Resistance Bridges*), atau indikator lain yang dapat mengukur tahanan listrik.

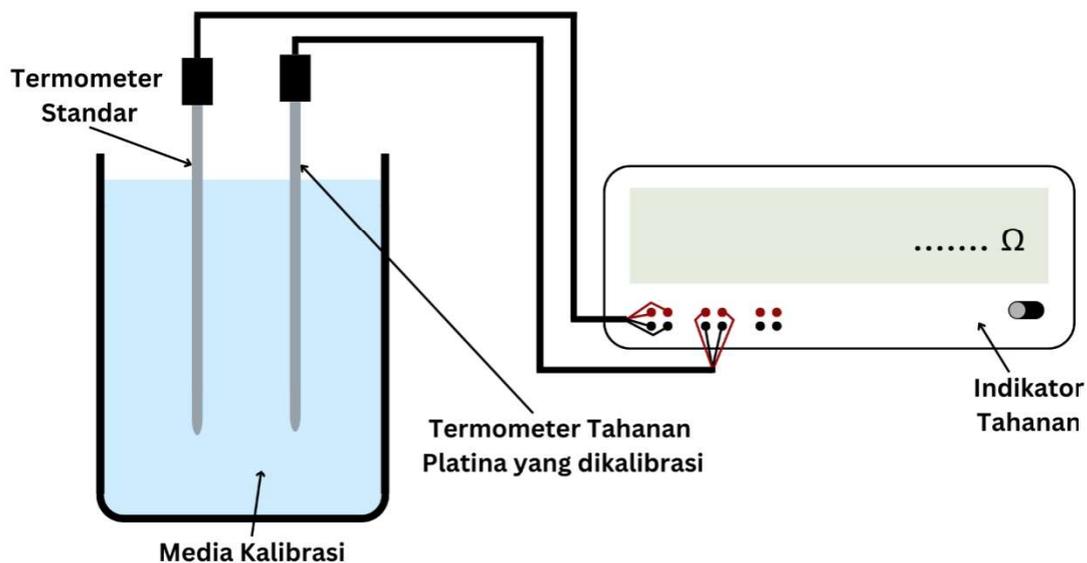
CATATAN: Sensor standar dan indikatornya dapat dikalibrasi sebagai satu sistem dengan penunjukan dalam besaran suhu. Cara tersebut lebih praktis, namun untuk akurasi tertinggi biasanya dipilih cara kalibrasi terpisah, baik untuk sensor standar maupun indikatornya.

- Media kalibrasi, yang telah diketahui nilai keseragaman dan kestabilan suhunya di

seluruh area kerja yang digunakan, dengan rentang suhu media kalibrasi yang sesuai dengan kebutuhan. Media kalibrasi dapat berupa bak air, bak minyak, bak alkohol, bak halokarbon, bak garam, dan cairan lainnya yang sesuai, atau dapat berupa tungku, *dry block calibrator* atau media kering lainnya.

- Termohigrometer, untuk mencatat kondisi ruangan kalibrasi (suhu dan kelembaban relatif) selama proses kalibrasi.
- Media kalibrasi titik es, diperlukan juga media bak es berisi serutan es yang sedang meleleh untuk menentukan nilai resistansi keluaran termometer tahanan platina pada suhu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (R_0).

Gambar 3 mengilustrasikan *set up* kalibrasi termometer tahanan platina menggunakan metode perbandingan. Dalam *set up* ini, termometer tahanan platina yang akan dikalibrasi dicelupkan ke dalam media suhu yang dikontrol, bersamaan dengan termometer standar. Pastikan kedua sensor termometer dalam keadaan sedekat mungkin. Kedua termometer dihubungkan ke sistem pengukuran keluaran termometer tahanan platina, sehingga nilai keluaran dari termometer tahanan platina yang dikalibrasi dapat dibandingkan langsung dengan nilai referensi dari termometer standar. Proses ini memastikan bahwa kedua termometer merasakan suhu yang sama untuk mendapatkan hasil kalibrasi yang akurat.



Gambar 3. *Set Up* Peralatan Kalibrasi Termometer Tahanan Platina dengan Metode Perbandingan

5. PRA KALIBRASI

5.1 Rekaman Teknis

Perekaman teknis peralatan yang dikalibrasi, data pengukuran, dan informasi teknis terkait lainnya, 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 Pengkondisian Peralatan

Dalam beberapa kasus (jika diperlukan), peralatan kalibrasi termometer tahanan platina dengan metode perbandingan memerlukan pengkondisian sebelum dilakukan proses kalibrasi. Misalnya, beberapa tipe indikator tahanan (umumnya indikator dengan resolusi tinggi), mungkin memerlukan *pre-conditioning* (dihidupkan setidaknya selama 1 jam sebelum pengambilan data kalibrasi), stabilisasi tegangan jala-jala, dan lain-lain.

5.3 Pembuatan Titik Es

Penggunaan titik es sebagai penyedia suhu 0 °C diperlukan dalam mengkalibrasi termometer tahanan platina dengan metode perbandingan untuk menentukan nilai R_0 , yaitu resistansi keluaran termometer tahanan platina pada suhu 0 °C. 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 ± 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 termometer standar dan termometer tahanan platina yang dikalibrasi;

- (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 buat lubang untuk tempat tercelupnya termometer standar dan termometer tahanan platina yang dikalibrasi (biasanya menggunakan batang gelas atau kayu). Lalu padatkan campuran es serut dan air suling tersebut untuk mendapatkan kontak termal yang lebih baik;
- (6) Masukkan termometer standar dan termometer tahanan platina yang dikalibrasi ke dalam lubang hasil cetakan, padatkan lagi campuran es serut, biarkan titik es tercapai keseimbangan termalnya selama (15 - 30) 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 cetakan lubang, dan selang dan kemudian keringkan.

6. LANGKAH KERJA

Secara umum, proses kalibrasi termometer tahanan platina dengan metode perbandingan adalah dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- (a) Siapkan titik es dalam media kalibrasi titik es, yang langkah-langkahnya dijelaskan dalam sub-bab 5.3. Masukkan termometer standar dan termometer tahanan platina ke dalam media kalibrasi titik es, kemudian tunggu hingga penunjukkan stabil. Ukur dan rekam penunjukkan keduanya pada titik es;
- (b) Lakukan *set up* kedua termometer standar dan termometer tahanan platina ke dalam media kalibrasi seperti pada Gambar 3;
- (c) Pada media kalibrasi terkontrol, lakukan penyetelan suhu media kalibrasi sesuai titik dan rentang ukur yang diperlukan dimulai dari titik ukur suhu terendah dari rentang kalibrasi yang diinginkan;
- (d) Tunggu sampai suhu media kalibrasi mencapai kestabilan, kemudian rekam pembacaan kedua termometer standar dan termometer tahanan platina sekurangnya 5 kali, atau dapat lebih banyak sesuai kebutuhan dan kondisi data;

- (e) Ulangi langkah (c) dan (d) untuk titik ukur suhu lainnya sampai dengan suhu maksimal kalibrasi;
- (f) Jika diperlukan, pindahkan *set up* kalibrasi ke media kalibrasi lain yang sesuai dengan titik dan rentang ukur yang diperlukan;
- (g) Jika kalibrasi yang dilakukan sudah mencapai suhu maksimal, ulangi langkah (c) dan (d) pada suhu pertengahan rentang kalibrasi. Langkah ini adalah untuk mengukur ketidakpastian dari histeresis. Pastikan arah perubahan suhu dari suhu tinggi ke suhu rendah.
- (h) Ulangi langkah (a) untuk mengukur stabilitas jangka pendek (*short-term stability*) termometer tahanan platina pada titik es;
- (i) Catat kondisi ruangan (suhu dan kelembaban relatif) selama proses kalibrasi.

7. ANALISIS DATA

Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan termometer tahanan platina yang dikalibrasi dengan termometer standar dalam media kalibrasi. *Output* dari termometer tahanan platina yang dikalibrasi dan termometer standar (R_{UUT} dan R_{Std}) diukur menggunakan indikator tahanan. Resistansi *output* termometer standar (R_{Std}) diubah menjadi suhu standar menggunakan koefisien ITS-90, CVD, atau hubungan matematis lain yang tersedia dalam sertifikat kalibrasi. Termometer standar yang dikalibrasi secara satu sistem dengan indikatornya biasanya sudah memiliki penunjukan dan koreksi dalam satuan suhu ($^{\circ}\text{C}$) pada sertifikat kalibrasinya, sehingga tidak memerlukan proses perhitungan di atas, selama titik ukur yang digunakan sama dengan titik kalibrasi di sertifikat kalibrasinya.

Pasangan lengkap suhu standar dan resistansi *output* termometer tahanan platina yang dikalibrasi digunakan untuk menghasilkan koefisien persamaan CVD (A , B , dan C). Secara umum, langkah-langkah dalam analisis data untuk kalibrasi termometer tahanan platina dengan metode perbandingan adalah sebagai berikut:

- (a) Hitung koreksi tahanan dari penunjukkan termometer standar dan termometer tahanan platina dengan menggunakan informasi sertifikat kalibrasi *DMM* atau jembatan tahanan (*resistance bridge*) tersebut;
- (b) Hitung nilai rata-rata dan standar deviasi dari masing-masing termometer standar dan termometer tahanan platina pada pengukuran di titik es (R_0) dan suhu lainnya (R_i);
- (c) Konversi penunjukkan resistansi dari termometer standar terkoreksi ke nilai suhu menggunakan persamaan yang tercantum pada sertifikat kalibrasinya. Cara konversinya secara detail dijelaskan pada Lampiran A dan Lampiran B;

- (d) Tentukan koefisien A , B , dan C dari termometer tahanan platina yang dikalibrasi berdasarkan Persamaan (3.3) menggunakan metode regresi. Cara penentuan koefisien-koefisien tersebut secara detail akan disajikan pada Lampiran C;
- (e) Catat nilai SEE (*standard error estimate*) dan DoF (*degree of freedom*) yang dihasilkan dari regresi sebagaimana pada langkah (d) di atas;
- (f) Hitung nilai *drift* (*short-term stability*) dari kedua termometer standar dan termometer tahanan platina, yaitu selisih absolut antara nilai pengukuran sebelum dan sesudah kalibrasi pada titik es;
- (g) Hitung nilai histeresis dari kedua termometer standar dan termometer tahanan platina, menurut Persamaan (3.1);
- (h) Hitung nilai rata-rata, minimum, dan maksimum dari kondisi ruang kalibrasi (suhu dan kelembaban relatif).

8. EVALUASI KETIDAKPASTIAN

Dalam melakukan kalibrasi termometer tahanan platina, tujuan utama adalah memastikan bahwa nilai tahanan dari termometer tahanan platina yang dikalibrasi (R_{UUT}) sesuai dengan suhu dari sistem standar yang digunakan (t_{std}). Untuk mencapai kesesuaian ini, hubungan antara tahanan dan suhu dinyatakan menggunakan fungsi Callendar-Van Dusen (f_{CVD}) yang secara matematis dimodelkan sebagai berikut:

$$R_{UUT} = f_{CVD}(t_{std}) \quad (8.1)$$

karena pengukuran tidak selalu ideal, diperlukan koreksi atau terdapat sumber ketidakpastian pengukuran dari masing-masing suku pada Persamaan (8.1) sebagai berikut:

$$R_{UUT} + \delta R_{UUT} = f_{CVD}(t_{std} + \delta t_{std}) \quad (8.2)$$

Dalam mengestimasi ketidakpastian, semua komponen ketidakpastian harus menggunakan satuan yang sama, yaitu suhu ($^{\circ}\text{C}$). Oleh karena itu, diperlukan nilai koefisien sensitivitas (c_i) yang berfungsi mengubah nilai tahanan menjadi suhu, yang nilainya bergantung pada termometer tahanan platina yang digunakan. Untuk termometer tahanan platina standar Pt-25, nilai c_i didekati sebesar $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\Omega$, dan termometer tahanan platina Pt-100, nilai c_i didekati sebesar $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\Omega$. Persamaan (8.2) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R_{UUT} = f_{CVD}(t_{std} + \delta t_{std} + c_i \delta R_{UUT}) \quad (8.3)$$

Lebih lanjut, koreksi sistem standar yang digunakan terdiri dari koreksi termometer tahanan platina standar (termasuk indikator tahanannya) dan koreksi media kalibrasi,

sehingga:

$$\delta t_{std} = \delta_{std} + \delta_{Med} \quad (8.4)$$

Nilai koreksi termometer tahanan platina standar (termasuk indikator tahananannya) dan koreksi media kalibrasi dapat dijabarkan menjadi Persamaan (8.5) dan (8.6).

$$\begin{aligned} \delta_{std} = \delta ts + c_i \delta RS_{L.drift} + c_i \delta RS_{S.drift} + c_i \delta RS_{rep} + c_i \delta RS_{ind} + c_i \delta RS_{ind.drift} \\ + c_i \delta RS_{ind.res} + c_i \delta RS_{ind.SEE} \end{aligned} \quad (8.5)$$

di mana

- δts = Koreksi dari sertifikat kalibrasi termometer standar
- $\delta RS_{L.drift}$ = *Long-term drift* termometer standar
- $\delta RS_{S.drift}$ = *Short-term drift* termometer standar
- δRS_{rep} = Pengulangan pembacaan termometer standar
- δRS_{ind} = Koreksi dari indikator tahanan untuk pembacaan termometer standar
- $\delta RS_{ind.drift}$ = *Drift* indikator tahanan untuk pembacaan termometer standar
- $\delta RS_{ind.res}$ = Daya baca indikator tahanan untuk pembacaan termometer standar
- $\delta RS_{ind.SEE}$ = Kesalahan baku dari regresi koreksi indikator tahanan untuk pembacaan *output* termometer standar

$$\delta_{Med} = \delta Med_{ice} + \delta Med_{stab} + \delta Med_{unif} \quad (8.6)$$

di mana

- δMed_{ice} = Kesalahan suhu dari titik es
- δMed_{stab} = Stabilitas media kalibrasi
- δMed_{unif} = Keseragaman media kalibrasi

Sedangkan untuk komponen yang berasal dari UUT dijabarkan dalam Persamaan (8.7).

$$\begin{aligned} \delta RU_{UUT} = c_i \delta RU_{ind} + c_i \delta RU_{ind.drift} + c_i \delta RU_{ind.res} + c_i \delta RU_{UUT_{stab}} \\ + c_i \delta RU_{UUT_{rep}} + c_i \delta R_{Hys} + \delta t_{SH} + c_i \delta RU_{ind.SEE} + c_i \delta RU_{CVD.SEE} \end{aligned} \quad (8.7)$$

di mana

- δRU_{ind} = Koreksi dari indikator tahanan untuk pembacaan termometer tahanan

	platina yang dikalibrasi
$\delta RU_{ind.drift}$	= <i>Drift</i> indikator tahanan untuk pembacaan termometer tahanan platina yang dikalibrasi
$\delta RU_{ind.res}$	= Resolusi indikator tahanan untuk pembacaan termometer tahanan platina yang dikalibrasi
δRU_{STAB}	= <i>Short-term drift</i> termometer tahanan platina yang dikalibrasi
δRU_{rep}	= Pengulangan pembacaan termometer tahanan platina yang dikalibrasi
δR_{Hys}	= <i>Hysteresis</i> termometer tahanan platina yang dikalibrasi
δt_{SH}	= <i>Self-heating</i> termometer tahanan platina yang dikalibrasi
$\delta RU_{ind.SEE}$	= Kesalahan baku dari regresi koreksi indikator tahanan untuk pembacaan output termometer tahanan platina yang dikalibrasi
$\delta RU_{CVD.SEE}$	= Kesalahan baku dari regresi persamaan CVD

Sumber-sumber ketidakpastian dievaluasi berdasarkan Persamaan (8.5) hingga (8.7), sehingga diperoleh ketidakpastian gabungan u_c dan ketidakpastian terentang U diperoleh dengan mengalikan ketidakpastian gabungan u_c dengan faktor cakupan k yang memiliki tingkat kepercayaan 95%, dengan nilai $k = 2$.

$$U = k \times u_c \quad (8.8)$$

8.1 Peralatan Standar ($u_{\delta_{std}}$)

Persamaan matematika untuk sumber ketidakpastian yang berasal dari peralatan standar, baik termometer standar maupun indikator tahanan untuk termometer standar sebagaimana dijabarkan oleh Persamaan (8.5), dengan penjelasan sebagai berikut:

a. Sertifikat Kalibrasi Termometer Standar (δts)

Sertifikat kalibrasi terbaru dari termometer standar yang digunakan harus tersedia untuk mendapatkan nilai ketidakpastian. Umumnya, nilai tersebut dilaporkan dalam tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan $k = 2$ (distribusi normal). Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_1 = \frac{U(\delta ts)}{2}$$

dengan nilai $U(\delta ts)$ diperoleh dari sertifikat kalibrasi termometer standar, derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student*.

b. Long-term Drift Termometer Standar ($\delta RS_{L,drift}$)

Perubahan nilai pengukuran termometer standar dalam jangka waktu tertentu (dalam satuan Ω) diperkirakan sebagai *long-term drift* termometer standar, $U(\delta RS_{L,drift})$, yang dapat dirujuk dari catatan historis kalibrasi sebelumnya. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_2 = \frac{U(\delta RS_{L,drift})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

c. Short-term Drift Termometer Standar ($\delta RS_{S,drift}$)

Perubahan nilai pengukuran termometer standar selama proses kalibrasi (dalam satuan Ω) diperkirakan sebagai *short-term drift* termometer standar, $U(\delta RS_{S,drift})$, yang dapat ditentukan dari nilai terukur pada titik es sebelum dan sesudah proses kalibrasi. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_3 = \frac{U(\delta RS_{S,drift})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

d. Sertifikat Kalibrasi Indikator Tahanan untuk Pembacaan Termometer Standar (δRS_{ind})

Sertifikat kalibrasi terbaru dari indikator tahanan yang digunakan harus tersedia untuk mendapatkan nilai ketidakpastian. Umumnya, nilai tersebut dilaporkan dalam tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan $k = 2$ (distribusi normal). Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_4 = \frac{U\delta(RS_{ind})}{2}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student*.

Dalam hal koreksi pembacaan indikator diperoleh dari regresi, ketidakpastian regresi tersebut (SEE) harus diperhitungkan. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_5 = \frac{U(\delta RS_{ind,SEE})}{1}$$

dengan derajat kebebasan ν tergantung dari hasil regresinya.

e. Drift Indikator Tahanan untuk Pembacaan Termometer Standar ($\delta RS_{ind,drift}$)

Perubahan nilai pengukuran indikator tahanan dalam jangka waktu tertentu (dalam satuan Ω) diperkirakan sebagai penyimpangan indikator tahanan $U(\delta RS_{ind,drift})$, yang dapat dirujuk dari catatan historis kalibrasi sebelumnya. Sebagai alternatif jika indikator tahanan

baru dikalibrasi perdana, $U\delta R_{S_{ind.drift}}$ dapat dilihat dari spesifikasi di buku manual indikator tahanan. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_6 = \frac{U(\delta R_{S_{ind.drift}})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

f. Daya Baca Indikator Tahanan untuk Pembacaan Termometer Standar ($\delta R_{S_{ind.res}}$)

Daya baca indikator tahanan, $U(\delta R_{S_{ind.res}})$, ditentukan sebesar $\frac{1}{2}$ angka penting dari resolusi indikator tahanan. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_7 = \frac{U(\delta R_{S_{ind.res}})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

g. Pengulangan Pembacaan Termometer Standar ($\delta R_{S_{rep}}$)

Pengulangan pembacaan termometer standar dihitung dari serangkaian pembacaan suhu indikator yang memberikan deviasi standar dengan distribusi normal. Ketidakpastian standarnya adalah:

$$u_8 = \frac{U(\delta R_{S_{rep}})}{\sqrt{n}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = n - 1$.

8.2 Peralatan yang Dikalibrasi (δR_{UUT})

Persamaan matematika untuk sumber ketidakpastian yang berasal dari peralatan yang dikalibrasi, baik termometer tahanan platina maupun indikator tahanan untuk termometer tahanan platina sebagaimana dijabarkan dalam Persamaan (8.7) dengan penjelasan sebagai berikut:

a. Sertifikat Kalibrasi Indikator Tahanan untuk Pembacaan Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi ($\delta R_{UUT_{ind}}$)

Sertifikat kalibrasi terbaru dari indikator tahanan yang digunakan harus tersedia untuk mendapatkan nilai ketidakpastian. Umumnya, nilai tersebut dilaporkan dalam tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan $k = 2$ (distribusi normal). Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_9 = \frac{U(\delta R_{UUT_{ind}})}{2}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student*.

Dalam hal koreksi pembacaan indikator diperoleh dari regresi, ketidakpastian regresi tersebut (SEE) harus diperhitungkan. Ketidakpastian bakunya adalah.

$$u_{10} = \frac{U(\delta RU_{ind.see})}{1}$$

dengan derajat kebebasan ν tergantung dari hasil regresinya.

b. Drift Indikator Tahanan untuk Pembacaan Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi ($\delta RU_{ind.drift}$)

Perubahan nilai pengukuran indikator tahanan dalam jangka waktu tertentu (dalam satuan Ω) diperkirakan sebagai penyimpangan indikator tahanan $U(\delta RU_{ind.drift})$, yang dapat dirujuk dari catatan historis kalibrasi sebelumnya. Sebagai alternatif jika indikator tahanan baru dikalibrasi perdana, $U(\delta RU_{ind.drift})$ dapat dilihat dari spesifikasi di buku manual indikator tahanan. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_{11} = \frac{U(\delta RU_{ind.drift})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektanguler.

c. Daya Baca Indikator tahanan untuk Pembacaan Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi ($\delta RS_{ind.res}$)

Daya baca indikator tahanan ditentukan sebesar $\frac{1}{2}$ angka penting dari resolusi indikator tahanan. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_{12} = \frac{U(\delta RS_{ind.res})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektanguler.

d. Stabilitas Jangka Pendek Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi (δUUT_{stab})

Perubahan nilai pengukuran Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi selama proses kalibrasi (dalam satuan Ω) diperkirakan sebagai stabilitas jangka pendek Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi, $U(\delta UUT_{stab})$, yang dapat ditentukan dari nilai terukur pada titik es sebelum dan sesudah proses kalibrasi. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_{13} = \frac{U(\delta UUT_{stab})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran

kebolehjadiannya adalah rektangular.

e. Pengulangan Pembacaan Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi ($\delta RUUT_{rep}$)

Pengulangan pembacaan termometer tahanan platina yang dikalibrasi dihitung dari serangkaian pembacaan suhu indikator yang memberikan deviasi standar dengan distribusi normal. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_{14} = \frac{U(\delta RUUT_{rep})}{\sqrt{n}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = n - 1$.

f. Histeresis Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi (δR_{Hys})

Histeresis mengukur perbedaan antara pengukuran urutan pemanasan dan pengukuran urutan pendinginan. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_{15} = \frac{U(\delta R_{Hys})}{\sqrt{3}}$$

di mana $U(\delta R_{Hys})$ dapat ditentukan sebagaimana ditulis pada sub-bab 3.3, dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

g. Self-heating Termometer Tahanan Platina yang Dikalibrasi (δt_{SH})

Sesuai dengan pembahasan pada sub-bab 3.5, *self-heating* dapat diperkirakan sebesar 2 – 4 mK, dengan ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_{16} = \frac{U(\delta t_{SH})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

h. SEE dari Regresi Persamaan CVD ($\delta R_{CVD,SEE}$)

Ketidakpastian ini diperoleh dari regresi persamaan CVD, yang diasumsikan berdistribusi normal dalam analisis ketidakpastian. Ketidakpastian bakunya adalah:

$$u_{17} = \frac{U(\delta R_{CVD,SEE})}{1}$$

dengan derajat kebebasan ν tergantung dari hasil regresinya.

8.3 Media Kalibrasi (δ_{Med})

Persamaan matematika untuk sumber ketidakpastian yang berasal dari media

kalibrasi dijabarkan dalam Persamaan (8.6), dengan rincian sebagai berikut:

a. Ketidakpastian dari Titik Es (δMed_{ice})

Ketidakpastian dari titik es $U(\delta Med_{ice})$ diperkirakan sebesar 0,02 °C, dengan ketidakpastian bakunya adalah

$$u_{18} = \frac{U(\delta Med_{ice})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

b. Ketidakpastian dari Stabilitas Media Kalibrasi (δMed_{stab})

Stabilitas diperoleh dari sertifikat media kalibrasi, di mana $U(\delta Med_{stab})$ dianalisis dari nilai terbesar. Jika media kalibrasi yang digunakan lebih dari satu, nilai stabilitas dapat disesuaikan menurut rentang CMC yang diusulkan. Oleh karena itu, ketidakpastian bakunya adalah.

$$u_{19} = \frac{U(\delta Med_{stab})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

c. Ketidakpastian dari Keseragaman Media Kalibrasi (δMed_{unif})

Keseragaman diperoleh dari sertifikat media kalibrasi, di mana $U(\delta Med_{unif})$ dianalisis dari nilai terbesar. Jika media kalibrasi yang digunakan lebih dari satu, nilai keseragaman dapat disesuaikan menurut rentang CMC yang diusulkan. Oleh karena itu, ketidakpastian bakunya adalah.

$$u_{20} = \frac{U(\delta Med_{unif})}{\sqrt{3}}$$

dengan derajat kebebasan $\nu = 60$, dari tabel distribusi *t-student* dan sebaran kebolehjadiannya adalah rektangular.

9. 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 termometer tahanan platina 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;
- Ketidakpastian harus dilaporkan pada tingkat kepercayaan 95% dengan nilai faktor cakupannya; dan
- Informasi terkait histeresis jika tidak disertakan dalam evaluasi ketidakpastian (lihat sub-bab 3.3)
- Informasi tambahan yang disyaratkan oleh SNI ISO/IEC 17025:2017.

Daftar Pustaka

- ASTM D7962–21, “*Standard Practice for Determination of Minimum Immersion Depth and Assessment of Temperature Sensor Measurement Drift*”, Diterbitkan Mei 2021;
- ASTM E1137/E1137M–08, “*Standard Specification for Industrial Platinum Resistance Thermometers*”, Diterbitkan Mei 2020;
- ASTM E2488–09, “*Standard Guide for the Preparation and Evaluation of Liquid Baths Used for Temperature Calibration by Comparison*”, Diterbitkan Desember 2014;
- ASTM E563-22, “*Standard Practice for Preparation and Use of an Ice-Point Bath as a Reference Temperature*”, Diterbitkan Agustus 2022;
- ASTM E644–11, “*Standard Test Methods for Testing Industrial Resistance Thermometers*”, Diterbitkan November 2019;
- BIPM, “*Guide to Secondary Thermometry — Industrial Platinum Resistance Thermometers*”, Diterbitkan November 2021;
- Delker, C. J., Auden, E. C., & Solomon, O. M. (2018). *Calculating interval uncertainties for calibration standards that drift with time*. NCSLI Measure, 12(4), 9-20.
- DKD-E 5-1, “*Additions to guidelines DKD-R 5-1:2018, DKD-R 5-3:2018, and DKD-R-5-4:2018 General recommendations and recommendations on comparisons*”, Diterbitkan April 2022
- DKD-R 5-1, “*Calibration of resistance thermometers*”, Diterbitkan November 2023;
- IEC 60751:2022, “*Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*”, Diterbitkan Januari 2022;
- 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;
- MSL Technical Guide 40 Version 2, “*Interpolating Corrections from Calibration Certificates*”, Diterbitkan Januari 2020;
- MSL Technical Guide 21 Version 2, “*Using SPRT Calibration Certificates*”, Diterbitkan Desember 2017.

Lampiran A

Metode Konversi Resistansi ke Suhu untuk Persamaan ITS-90

Kalibrasi termometer tahanan platina standar (*Standard Platinum Resistance Thermometer*), atau SPRT, dilakukan pada rentang 24 K (-250 °C) sampai dengan 961.78 °C menggunakan beberapa titik beku, titik leleh, ataupun titik tripel yang ditetapkan oleh Skala Suhu Internasional 1990 (*International Temperature Scale 1990*), atau ITS-90, yang mendefinisikan suhu berdasarkan tahanan SPRT. Sertifikat kalibrasi SPRT umumnya menyajikan jenis titik tetap yang digunakan, definisi suhu titik tetap yang digunakan, penunjukan SPRT pada titik tetap tersebut, dan ketidakpastian pengukuran.

Lampiran ini menjelaskan cara menggunakan sertifikat kalibrasi SPRT untuk menganalisis data kalibrasi termometer tahanan platina. Untuk kemudahan, panduan ini hanya mencakup rentang suhu dari -38,8344 °C (titik tripel merkuri) hingga 660,323 °C (titik beku aluminium), namun prinsip-prinsipnya sama untuk rentang suhu lainnya.

Suhu pada ITS-90 disimbolkan t_{90} , dengan tahanan SPRT pada t_{90} disimbolkan $R(t_{90})$. Untuk melakukan konversi suhu dari tahanan tersebut, ITS-90 melakukan 3 (tiga) perhitungan, di mana yang pertama adalah menghitung rasio tahanan sebagaimana diekspresikan oleh Persamaan A.1.

$$W(t_{90}) = \frac{R(t_{90})}{R_{TPW}} \quad (\text{A.1})$$

di mana R_{TPW} adalah tahanan SPRT pada titik tripel air.

Nilai $W(t_{90})$ untuk setiap SPRT hampir identik, namun memiliki sedikit perbedaan. Untuk mengkompensasinya, ITS-90 menerapkan koreksi kecil ke nilai $W(t_{90})$ untuk mendapatkan nilai rasio tahanan referensi, $W_r(t_{90})$, berdasarkan persamaan A.2.

$$W_r(t_{90}) = W(t_{90}) - \Delta W(t_{90}) \quad (\text{A.2})$$

di mana $\Delta W(t_{90})$ disebut fungsi deviasi SPRT, yang ditentukan dari kalibrasi.

Fungsi deviasi SPRT, $\Delta W(t_{90})$, bergantung pada rentang suhu kalibrasi, sebagaimana yang disajikan oleh Tabel A.1. Fungsi deviasi ini memiliki konstanta a , b , dan c , yang merupakan konstanta kalibrasi SPRT. Jumlah konstanta sama dengan sel titik tetap yang digunakan (tidak termasuk titik tripel air, yang diperlukan untuk menghitung rasio tahanan, $W(t_{90})$).

Tabel A.1. Sub Rentang Suhu, Fungsi Deviasi, dan Titik Tetap dalam Realisasi ITS-90

Sub Rentang Suhu	Fungsi Deviasi	Titik Tetap
-38.8344 °C s/d 29.7646 °C	$a(W - 1) + b(W - 1)^2$	Hg, Ga
0.01 °C s/d 29.7646 °C	$a(W - 1)$	Ga

Sub Rentang Suhu	Fungsi Deviasi	Titik Tetap
0.01 °C s/d 156.5985 °C	$a(W - 1)$	In
0.01 °C s/d 231.928 °C	$a(W - 1) + b(W - 1)^2$	In, Sn
0.01 °C s/d 419.527 °C	$a(W - 1) + b(W - 1)^2$	Sn, Zn
0.01 °C s/d 660.323 °C	$a(W - 1) + b(W - 1)^2 + c(W - 1)^3$	Sn, Zn, Al

Selanjutnya jika nilai $W_r(t_{90})$ telah ditentukan, maka suhu dapat dihitung menggunakan persamaan referensi yang didefinisikan oleh ITS-90, menurut persamaan A.3 ($t_{90} < 0,01$ °C) dan A.4 ($t_{90} \geq 0,01$ °C).

$$t_{90}(W_r) = \left(273.16 \times \left\{ \sum_{i=0}^{15} B_i \left[\frac{W_r(t_{90})^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i \right\} \right) - 273.15 \tag{A.3}$$

$$t_{90}(W_r) = \sum_{i=0}^9 D_i \left[\frac{W_r(t_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i \tag{A.4}$$

dengan nilai B_i dan D_i terdapat pada Tabel A.2.

Tabel A.2. Koefisien Persamaan Referensi ITS-90

i	B_i	D_i
0	0.183 324 722	439.932 854
1	0.240 975 303	472.418 020
2	0.209 108 771	37.684 494
3	0.190 439 972	7.472 018
4	0.142 648 498	2.920 828
5	0.077 993 465	0.005 184
6	0.012 475 611	-0.963 864
7	-0.032 267 127	-0.188 732
8	-0.075 291 522	0.191 203
9	-0.056 470 670	0.049 025
10	0.076 201 285	
11	0.123 893 204	
12	-0.029 201 193	
13	-0.091 173 542	
14	0.001 317 696	
15	0.026 025 526	

Berdasarkan penjelasan di atas, perhitungan konversi tahanan menjadi suhu dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak pengolah data, misalnya *spreadsheet*. Perhitungan dapat dilakukan secara manual dengan rumus-rumus yang tersedia, atau dengan memanfaatkan fitur pemrograman untuk mengotomatisasi proses perhitungan, sehingga lebih efisien dan akurat.

Lampiran B

Metode Konversi Resistansi ke Suhu untuk Persamaan CVD

Metode Newton-Raphson dapat digunakan untuk mengkonversi nilai resistansi ke suhu berdasarkan Persamaan Callendar Van Dusen yang digunakan pada resistansi termometer tahanan platina. Persamaan Callendar Van Dusen memberikan hubungan non-linear antara resistansi (R) dan suhu (t), yang sulit dipecahkan secara langsung. Metode iterasi Newton-Raphson adalah teknik numerik yang dapat digunakan untuk mencari akar dari fungsi non-linear ini. Prosesnya melibatkan perkiraan awal suhu dan kemudian memperbaiki perkiraan tersebut dengan iterasi berdasarkan derivatif fungsi. Dalam konteks Persamaan Callendar Van Dusen, solusi iteratif ini akan menghasilkan nilai suhu yang sesuai dengan nilai tahanan yang diberikan. Proses iterasi Newton-Raphson untuk konversi ini dapat dirumuskan berdasarkan Persamaan (B.1).

$$t_{n+1} = t_n - \frac{f(t_n)}{f'(t_n)} \quad (\text{B.1})$$

di mana $f(t_n)$ adalah Persamaan Callendar Van Dusen yang menyatakan hubungan antara tahanan dan suhu, sebagai berikut.

$$f(t_n) = R_0[1 + At + Bt^2 + (t - 100)Ct^3] - R_t \quad (\text{B.2})$$

dan $f'(t_n)$ adalah turunan pertama dari fungsi (B.2), yaitu.

$$f'(t_n) = R_0[A + 2Bt + 4Ct^2(t - 75)] \quad (\text{B.3})$$

dengan $C = 0$ untuk $t > 0$ °C. Metode ini membutuhkan nilai awal suhu t_0 , dan iterasi dilanjutkan sampai perbedaan antara dua nilai berturut-turut mendekati nol atau mencapai batas toleransi yang ditetapkan. Metode Newton-Raphson ini dapat diterapkan di Microsoft Excel dengan memanfaatkan iterasi manual dan formula Excel. Berikut adalah langkah-langkah untuk mengimplementasikannya.

- (1) Masukkan nilai R_0 dan koefisien Persamaan Callendar Van Dusen (A , B , dan C) sebagaimana contoh pada Tabel B.1.

Tabel B.1. Nilai R_0 dan koefisien Persamaan Callendar Van Dusen

	A	B	C
1	$R_0 =$	100.000 0	Ω
2	$A =$	3.908 3 E-03	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
3	$B =$	-5.775 E-07	$^{\circ}\text{C}^{-2}$
4	$C =$	-4.183 E-12	$^{\circ}\text{C}^{-4}$

- (2) Pada Microsoft Excel, siapkan kolom-kolom untuk nilai-nilai: (a) Kolom B berisi nilai

resistansi yang akan diubah menjadi suhu; (b) Kolom C berisi nilai suhu yang akan diperoleh melalui iterasi; (c) Kolom D berisi fungsi persamaan Callendar Van Dusen; (d) Kolom E berisi turunan pertama dari Fungsi persamaan Callendar Van Dusen; dan (e) Kolom F berisi formula Newton Rhapson.

- (3) Pisahkan sel-sel dari kolom-kolom tersebut untuk iterasi suhu negatif ($t \leq 0$ °C) dan suhu positif ($t > 0$ °C).
- (4) Pastikan untuk mengaktifkan fitur iterasi di Microsoft Excel karena tidak ada iterasi manual secara default, dengan cara:
 - Buka *File > Options > Formula*;
 - Pada bagian *Calculation Options*, centang *Enable Iterative Calculation*;
 - Atur *Maximum Iterations* dan *Maximum Change* untuk mengontrol konvergensi perhitungan.
- (5) Untuk iterasi suhu negatif ($t \leq 0$ °C), siapkan sel-sel sebagaimana dicontohkan oleh Tabel B.2.

Tabel B.2. Contoh Iterasi Newton Rhapson untuk suhu negatif ($t \leq 0$ °C)

	A	B	C	D	E	F
6	Iterasi ke-	Rt	t	f(t)	f'(t)	t(n+1)
7	1	88.22	0.00	11.78	0.39	-30.14
8	2	88.22	-30.14	-0.05	0.39	-30.00
9	3	88.22	-30.00	0.00	0.39	-30.00
10	4	88.22	-30.00	0.00	0.39	-30.00
11	5	88.22	-30.00	0.00	0.39	-30.00

- a) Pada sel B7, masukkan nilai resistansi yang akan diubah menjadi suhu. Pastikan nilai resistansi ini merupakan nilai yang sudah dikoreksi berdasarkan sertifikat kalibrasi indikator tahanan.
- b) Pada sel C7, masukkan nilai perkiraan awal suhu, misalnya 0,00 °C.
- c) Pada sel D7, masukkan fungsi Callendar Van Dusen berdasarkan Persamaan B.2, dengan formula:

$$=B\$1 * (1 + B\$2 * C7 + B\$3 * C7^2 + (C7 - 100) * B\$4 * C7^3) - B7$$

- d) Pada sel E7, masukkan turunan pertama dari fungsi Callendar Van Dusen berdasarkan Persamaan B.3, dengan formula:

$$=B\$1 * (B\$2 + 2 * B\$3 * C7 + 4 * B\$4 * C7^2 * (C7 - 75))$$

- e) Pada sel F7, masukkan rumus iterasi Newton Rhapson berdasarkan Persamaan B.1, dengan formula:

$$=C7 - (D7 / E7)$$

- f) Hasil iterasi ke-1 pada sel F7 akan memberikan nilai suhu baru berdasarkan perkiraan sebelumnya. Lebih lanjut, salin nilai yang ada di sel F7 ke sel C8 untuk

menghasilkan iterasi ke-2 pada sel F8.

- g) Ulangi proses di atas untuk mendapatkan nilai suhu yang lebih akurat pada baris berikutnya.
 - h) Setelah iterasi stabil (contoh pada Tabel B.2 setelah 3 iterasi), suhu yang dihasilkan adalah $-30,00\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk nilai resistansi $88,22\text{ }\Omega$.
- (6) Selanjutnya untuk iterasi suhu positif ($t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), siapkan sel-sel sebagaimana dicontohkan oleh Tabel B.3.

Tabel B.3. Contoh Iterasi Newton Rhapson untuk suhu positif ($t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)

	A	B	C	D	E	F
13	Iterasi ke-	Rt	t	f(t)	f'(t)	t(n+1)
14	1	146.82	0.00	-46.82	0.39	119.80
15	2	146.82	119.80	-0.83	0.38	121.99
16	3	146.82	121.99	0.00	0.38	122.00
17	4	146.82	122.00	0.00	0.38	122.00
18	5	146.82	122.00	0.00	0.38	122.00

- a) Pada sel B14, masukkan nilai resistansi yang akan diubah menjadi suhu. Pastikan nilai resistansi ini merupakan nilai yang sudah dikoreksi berdasarkan sertifikat kalibrasi indikator tahanan.
- b) Pada sel C14, masukkan nilai perkiraan awal suhu, misalnya $0,00\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- c) Pada sel D14, masukkan fungsi Callendar Van Dusen berdasarkan Persamaan B.2, dengan formula:

$$=B14 * (1 + B2 * C14 + B3 * C14^2) - B14$$

- d) Pada sel E14, masukkan turunan pertama dari fungsi Callendar Van Dusen berdasarkan Persamaan B.3, dengan formula:

$$=B14 * (B2 + 2 * B3 * C14)$$

- e) Pada sel F14, masukkan rumus iterasi Newton Rhapson berdasarkan Persamaan B.1, dengan formula:

$$=C14 - (D14 / E14)$$

- f) Hasil iterasi ke-1 pada sel F14 akan memberikan nilai suhu baru berdasarkan perkiraan sebelumnya. Lebih lanjut, salin nilai yang ada di sel F14 ke sel C15 untuk menghasilkan iterasi ke-2 pada sel F15.
- g) Ulangi proses di atas untuk mendapatkan nilai suhu yang lebih akurat pada baris berikutnya.
- h) Setelah iterasi stabil (contoh pada Tabel B.3 setelah 3 iterasi), suhu yang dihasilkan adalah $122,00\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk nilai resistansi $146,82\text{ }\Omega$.

Lampiran C Metode Penentuan Koefisien Persamaan Callendar Van Dusen

Sebagaimana telah disebutkan bahwa Persamaan Callendar Van Dusen menunjukkan hubungan antara resistansi keluaran termometer tahanan platina (R_t) dengan suhu (t), menurut Persamaan C.1.

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \tag{C.1}$$

di mana $C = 0$ untuk $t > 0$ °C.

Langkah pertama yang perlu dilakukan untuk menentukan koefisien Persamaan Callendar Van Dusen adalah merubah persamaan tersebut menjadi Persamaan C.2.

$$R_t - R_0 = A \cdot R_0 t + B \cdot R_0 t^2 + C \cdot R_0 (t - 100)t^3 \tag{C.2}$$

Perhitungan koefisien A , B , dan C dengan menggunakan metode regresi non-linear atau dengan *fitting* persamaan ke data eksperimental menggunakan perangkat lunak pengolah data. Dalam proses ini, nilai $R_t - R_0$ ditempatkan pada sumbu y , sedangkan nilai $R_0 t$, $R_0 t^2$, dan $R_0(t - 100)t^3$ ditempatkan pada sumbu x .

Langkah selanjutnya adalah menyusun kolom-kolom untuk menempatkan nilai-nilai yang akan diregresi secara non-linear, seperti yang ditunjukkan pada Tabel C.1. Kolom-kolom ini akan berisi data resistansi yang diukur dan nilai-nilai terkait suhu, yang nantinya akan digunakan untuk menghitung koefisien. Penyusunan kolom ini penting agar proses regresi dapat dilakukan dengan tepat dan hasil yang diperoleh akurat.

Tabel C.1. Contoh Tabel Analisis Data

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
2	Set Point	R_t	t	R_t'	Residual	$R_t - R_0$	$R_0 t$	$R_0 t^2$	$R_0 (t-100) t^3$
3	0	100.059 713	0.003 098	100.060 947	0.001	0.00	0.31	9.60 E-04	0.00 E+00
4	-40	83.946 101	-39.968 771	83.948 660	0.003	-16.11	-3999.26	1.60 E+05	8.94 E+08
5	-30	87.971 227	-30.008 788	88.015 302	0.044	-12.09	-3002.67	9.01 E+04	3.52 E+08
6	-20	91.996 257	-20.017 851	92.051 817	0.056	-8.06	-2002.98	4.01 E+04	9.63 E+07
7	-10	96.027 980	-10.022 291	96.060 246	0.032	-4.03	-1002.83	1.01 E+04	1.11 E+07
8	10	104.030 159	9.985 568	104.031 719	0.002	3.97	999.15	9.98 E+03	0.00 E+00
9	20	108.000 562	19.997 471	108.002 562	0.002	7.94	2000.94	4.00 E+04	0.00 E+00
10	40	115.894 965	39.999 679	115.900 781	0.006	15.84	4002.36	1.60 E+05	0.00 E+00
11	60	123.742 525	59.995 709	123.750 066	0.008	23.68	6003.15	3.60 E+05	0.00 E+00
12	80	131.545 432	79.994 587	131.553 971	0.009	31.49	8004.24	6.40 E+05	0.00 E+00
13	100	139.303 122	100.000 437	139.314 070	0.011	39.24	10006.02	1.00 E+06	0.00 E+00

Setiap kolom dalam tabel memiliki peran penting dalam proses analisis data. Kolom **Set Point** menunjukkan titik ukur kalibrasi pada suhu tertentu yang telah ditetapkan. Kolom **R_t** berisi tahanan yang dihasilkan oleh PRT yang sedang dikalibrasi pada setiap set point suhu. Kolom **t** adalah suhu yang dibaca dari termometer standar, yang digunakan sebagai referensi untuk kalibrasi. Kolom **R_t'** adalah tahanan yang dihasilkan dari hasil fitting

menggunakan persamaan Callendar Van Dusen (CVD), yang dihasilkan dari model matematis setelah proses regresi. **Residual** merupakan selisih antara nilai tahanan yang terukur langsung (R_t) dengan nilai tahanan hasil fitting (R_t').

Selanjutnya, nilai $R_t - R_0$ mewakili komponen yang akan diregresi sebagai sumbu y dalam proses regresi, sedangkan nilai-nilai R_0t , R_0t^2 , dan $R_0(t - 100)t^3$ berfungsi sebagai komponen yang diregresi di sumbu x . Masing-masing dari komponen ini digunakan untuk menghitung koefisien persamaan Callendar Van Dusen, di mana R_0t akan menghasilkan koefisien A, R_0t^2 menghasilkan koefisien B, dan $R_0(t - 100)t^3$ menghasilkan koefisien C.

Perlu dicatat bahwa pada kolom $R_0(t - 100)t^3$, nilai ini akan menjadi 0 untuk *set point* di atas 0°C. Ini karena koefisien C dalam persamaan Callendar Van Dusen hanya berlaku pada suhu di bawah 0 °C. Kolom-kolom ini dirancang untuk memastikan regresi berjalan dengan baik dan koefisien yang diperoleh akurat.

Setelah menyusun kolom-kolom data, langkah berikutnya adalah menggunakan formula "LINEST" di Excel untuk melakukan regresi non-linear, yang bertujuan menghitung koefisien persamaan Callendar Van Dusen (A, B, dan C) berdasarkan data pengukuran. Dalam regresi ini, nilai $R_t - R_0$ (sumbu y) diregresi terhadap R_0t , R_0t^2 , dan $R_0(t - 100)t^3$ (sumbu x). Formula LINEST secara otomatis menghitung koefisien A, B, dan C dengan menyesuaikan persamaan linier pada data yang tersedia, memperhitungkan semua variabel terkait. Berikut adalah langkah-langkah untuk menggunakan formula "LINEST" di Excel, dengan hasilnya ditunjukkan oleh Tabel C.2.

Tabel C.2. Hasil Regresi Non-Linear Persamaan CVD

	A	B	C
27	CVD coefficients		
28	C	B	A
29	-6.952 5E-11	-6.895 8E-07	3.989 4E-03
30	4.333 8E-11	5.923 3E-08	4.933 9E-06
31	0.999998965	0.022482992	#N/A
32	2577655.734	8	#N/A
33	3908.898218	0.004043879	#N/A

- Pilih area sel kosong sebanyak jumlah koefisien yang diperlukan (biasanya tiga kolom dan lima baris untuk A, B, dan C).
- Masukkan formula "`=LINEST(y_values, x_values, FALSE, TRUE)`", di mana:
 - `y_values` adalah data pada kolom $R_t - R_0$.
 - `x_values` adalah data dari kolom R_0t , R_0t^2 , dan $R_0(t - 100)t^3$.
 - `FALSE` (parameter ketiga): Menunjukkan bahwa regresi yang dilakukan tidak akan menghitung *intercept*, karena merujuk pada Persamaan C.2,

persamaan regresi tidak membutuhkan konstanta y .

- **TRUE** (parameter keempat): Menyediakan statistik regresi tambahan yang berguna untuk memeriksa kualitas dan kecocokan model regresi.
- Tekan **Ctrl + Shift + Enter** untuk mendapatkan hasil regresi berupa koefisien A , B , dan C .
- Berdasarkan Tabel C.2, diperoleh hasil sebagai berikut:
 - Koefisien $A = 3,9894 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
 - Koefisien $B = -6,8958 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
 - Koefisien $C = -6,9525 \times 10^{-11} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$
 - SEE dari regresi CVD = 0,022482992
 - $\nu = 8$

Langkah selanjutnya setelah koefisien A , B , dan C diperoleh dari regresi adalah memasukkan koefisien tersebut ke dalam persamaan Callendar Van Dusen untuk menghitung nilai R_t' pada setiap suhu. Nilai R_t' ini dihitung berdasarkan persamaan yang sudah dihasilkan dari fitting data dengan koefisien yang telah dihitung. Nilai R_t' akan ditempatkan dalam kolom R_t' dan dihitung menggunakan Persamaan C.3.

$$R_t' = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (\text{C.3})$$

Setelah nilai R_t' diperoleh, nilai **Residual** dapat ditentukan, yaitu selisih antara nilai tahanan yang diukur secara langsung (R_t) dan nilai tahanan yang dihitung dari persamaan (R_t'). Residual menggambarkan seberapa besar perbedaan antara nilai hasil pengukuran nyata dan nilai hasil prediksi dari model fitting. Semakin kecil nilai residual, semakin baik model fitting tersebut merepresentasikan data pengukuran asli, yang berarti hasil kalibrasi semakin akurat. Jika residual kecil, artinya persamaan Callendar Van Dusen dengan koefisien yang dihitung sudah cocok dengan data yang diukur, menunjukkan bahwa kalibrasi termometer tahanan platina sudah dilakukan dengan baik dan akurat.

Lampiran D Contoh Kalibrasi Termometer Tahanan Platina

Sebuah sensor *Platinum Resistance Thermometer* (PRT Pt-100) dengan panjang sensor 350 mm dan diameter 4 mm dikalibrasi pada rentang -40°C hingga 200°C menggunakan metode perbandingan. PRT Pt-100 tersebut dibandingkan terhadap sebuah termometer standar SPRT Pt-25 di dalam media kalibrasi berupa bak cairan. Berikut diuraikan secara detil langkah-langkah kalibrasi tersebut.

A. Penyiapan Peralatan Kalibrasi Utama

Peralatan utama kalibrasi adalah Sensor Standar, Indikator Tahanan Standar, dan Media Kalibrasi. Informasi detil dari setiap peralatan tersebut diuraikan sebagai berikut:

A.1. Sensor Standar:

- o Pada contoh ini, sensor standar yang digunakan adalah sebuah SPRT Pt-25 yang telah dikalibrasi menggunakan metode titik tetap (*Fixed Point*) ITS-90, dengan rentang kalibrasi dari $-38,83^{\circ}\text{C}$ hingga $660,323^{\circ}\text{C}$.

Hasil Kalibrasi / *Calibration Result*

Titik Tetap / <i>Fixed Points</i>	Definisi Suhu / <i>Temperature Definition</i>	Penunjukan SPRT / <i>SPRT Reading</i>	Ketidakpastian / <i>Uncertainty</i>
	($^{\circ}\text{C}$)	(Ω)	(mK)
Hg TP	-38.8344	21.223 141	4,3
H ₂ O TP	0,01	25.140 980	2,1
Ga MP	29.7646	28.110 605	5,1
Sn FP	231.928	47.583 769	8
Zn FP	419.527	64.579 518	10
Al FP	660.323	84.867 230	10

5. Koefisien-koefisien a_5 , b_5 , a_7 , b_7 , dan c_7 diperoleh dari hasil kalibrasi pada arus eksitasi 1 mA / *The coefficients a_5 , b_5 , a_7 , b_7 , and c_7 were obtained from the calibration at excitation current of 1 mA:*

$a_5 =$	-1,764 280 9 E-04	$a_7 =$	-1,204 696 8 E-04
$b_5 =$	5,386 567 6 E-05	$b_7 =$	-1,237 959 5 E-05
		$c_7 =$	3,129 521 8 E-07

Gambar D.4. Contoh Cuplikan Sertifikat Kalibrasi SPRT Pt-25

- o Informasi utama dari hasil kalibrasi metode titik tetap adalah nilai-nilai koefisien pada persamaan ITS-90. Gambar D.1 menunjukkan contoh laporan sertifikat alat standar (SPRT) yang mencantumkan koefisien persamaan ITS-90, yang ditandai dengan kotak garis putus-putus. Koefisien ini digunakan untuk mengkonversi nilai keluaran SPRT, dalam satuan tahanan (ohm), menjadi nilai

suhu yang terukur. Penjelasan lebih rinci tentang metode konversi resistansi ke suhu pada Persamaan ITS-90 dapat ditemukan pada Lampiran A.

A.2. Indikator Tahanan Standar

Indikator tahanan digunakan untuk pembacaan keluaran dari termometer standar dan juga keluaran dari PRT Pt-100 yang dikalibrasi (UUT). Indikator tahanan tersebut memiliki daya baca hingga $0,000001 \Omega$, dengan ketidakpastian pengukuran indikator standar pada tingkat kepercayaan 95% (U_{95}) sebesar $0,0012 \Omega$, sesuai informasi sertifikat kalibrasi terakhirnya.

Pembacaan termometer standar dan UUT dilakukan secara langsung dan bersamaan pada kanal yang berbeda. Setiap kanal memiliki koreksi tersendiri yang sesuai dengan sertifikat kalibrasi untuk tiap titik kalibrasi, sebagaimana tercantum pada Tabel D.1. Regresi atau interpolasi dapat dilakukan untuk memperkirakan koreksi nilai pengukuran yang bukan tepat di titik kalibrasinya.

Tabel D.1. Contoh Informasi Koreksi pada Sertifikat Kalibrasi Indikator Tahanan Standar

Nama Indikator Tahanan	Kanal	Pembacaan Alat (Ω)	Koreksi (Ω)	Ketidakpastian (Ω)
Precision Thermometry Bridge	1	0,999 984	0,000 014	0,000 009
		10,000 040	-0,000 055	0,000 054
		24,999 930	-0,000 100	0,000 130
		100,000 140	-0,000 520	0,000 520
		200,001 4	-0,001 2	0,001 2
		300,001 5	-0,002 3	0,001 2
		400,001 9	-0,002 6	0,001 2
	500,001 5	-0,003 7	0,001 2	
	2	0,999 994	0,000 004	0,000 018
		10,000 028	-0,000 043	0,000 054
		24,999 950	-0,000 120	0,000 130
		100,000 150	-0,000 520	0,000 520
		200,001 4	-0,001 1	0,001 2
		300,001 6	-0,002 4	0,001 2
400,002 0		-0,002 5	0,001 2	
500,000 7	-0,002 8	0,001 2		

A.3. Media Kalibrasi: Bak Cairan

Media kalibrasi yang digunakan adalah bak cairan (minyak silikon) yang telah ditentukan daerah kerjanya. Bak ini telah melalui proses kalibrasi dan karakterisasi, mencakup pengukuran kestabilan (*stability*) serta ketidakseragaman (*inhomogeneity*) untuk seluruh daerah kerja dan rentang ukurnya. Informasi lebih rinci mengenai hasil kalibrasi bak

cairan standar dapat dilihat pada Tabel A.2.

Tabel D.2. Contoh Informasi Teknis Bak Cairan

No.	Nama Alat	Rentang Ukur (°C)	Ketidakteraturan (°C)	Kestabilan (°C)
1	<i>Liquid Bath</i>	-40 ~ 100	0,008	0,003
2	<i>Liquid Bath</i>	100 ~ 250	0,006	0,004

B. Pemilihan Model Matematis Karakteristik PRT

Perhitungan hasil kalibrasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan persamaan Callendar Van Dusen untuk menentukan skala suhu UUT dalam rentang -40 °C hingga 200 °C. Persamaan CVD tercantum pada persamaan (D.1), di mana nilai koefisien A , B , dan C akan ditentukan melalui hasil kalibrasi. Perlu dicatat bahwa koefisien C bernilai 0 untuk suhu di atas 0 °C. Secara umum, jumlah titik ukur kalibrasi harus tiga kali jumlah koefisien yang akan dicari. Karena persamaan (D.1) memiliki 3 koefisien, kalibrasi idealnya dilakukan pada 9 titik ukur. Namun, jika hal ini tidak memungkinkan, kalibrasi dapat dilakukan dengan jumlah titik ukur yang lebih sedikit, dengan syarat derajat kebebasan tipe A dari proses regresi tidak kurang dari 2. Untuk memenuhi syarat ini, jumlah titik ukur minimal adalah jumlah koefisien ditambah 2. Oleh karena itu, untuk persamaan (D.1), regresi minimal harus dilakukan dengan 5 titik ukur.

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + (t - 100)Ct^3] \quad (D.1)$$

C. Setup Pengukuran dan Pengambilan Data

Langkah-langkah kalibrasi dilakukan dengan mengikuti prosedur berikut, yang dirancang untuk memastikan akurasi dan konsistensi hasil kalibrasi. Setiap langkah dilakukan dengan cermat dan sesuai urutan agar proses kalibrasi berjalan dengan baik dan menghasilkan data yang valid.

C.1. Set Up Alat:

- Lakukan *set up* pada masing-masing media kalibrasi yang digunakan sesuai konfigurasi alat yang ditunjukkan pada Gambar 3 pada bagian utama dokumen panduan ini.
- Pastikan batas pencelupan termometer standar dan UUT sudah sesuai dengan ketentuan yang telah diuraikan pada sub-bab 3.1.

C.2. Penentuan Nilai R_0 :

- Gunakan es serut yang disiapkan sesuai dengan prosedur yang dijelaskan pada sub-bab 5.3.
- Pembacaan dilakukan setelah termometer standar menunjukkan nilai pengukuran yang stabil.
- Lakukan pembacaan data secara berulang untuk meningkatkan akurasi hasil. Semakin banyak data yang dikumpulkan, semakin baik hasilnya, namun minimal lakukan pengulangan sebanyak 5 kali.

C.3. Kalibrasi pada Bak Cairan:

- Lakukan kalibrasi mulai dari suhu terendah ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$) hingga suhu tertinggi ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$) dengan menaikkan suhu secara bertahap sesuai titik ukur yang diperlukan di sepanjang rentang kalibrasi.

C.4. Pengambilan Data Histeresis:

- Setelah mencapai suhu tertinggi, turunkan suhu secara perlahan hingga mencapai nilai tengah rentang kalibrasi ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pastikan UUT merasakan penurunan suhu menuju nilai tengah tersebut dengan stabil.
- Lakukan pengukuran untuk memperoleh data histeresis, sebagaimana dijelaskan pada sub-bab 3.3.

C.5. Pengukuran Kembali pada Titik Es:

- Ulangi langkah (C.2) untuk memperoleh data *short-term stability* dari UUT.

D. Data Hasil Kalibrasi

D.1. Data yang diperoleh dari pengukuran di atas kemudian dikoreksi untuk kedua alat, yaitu termometer standar dan UUT, berdasarkan sertifikat indikator tahanan standar yang digunakan. Sebagai contoh, hasil pengambilan data pada suhu $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ disajikan dalam Tabel D.3, yang memuat nilai-nilai yang telah terkoreksi sesuai dengan sertifikat indikator tahanan standar.

Tabel D.3. Data Pengukuran dengan Nilai Terkoreksi oleh Sertifikat Indikator Tahanan Standar

Set Point ($^{\circ}\text{C}$)	$R_{std.terkoreksi}$ (Ω)	$R_{UUT.terkoreksi}$ (Ω)
40	29,126 201	115,543 856
	29,126 003	115,552 376
	29,126 199	115,557 633

Set Point (°C)	$R_{std.terkoreksi}$ (Ω)	$R_{UUT.terkoreksi}$ (Ω)
	29,126 395	115,547 259
	29,126 262	115,542 157
	29,126 037	115,549 728
	29,126 188	115,558 771
	29,126 439	115,547 925
	29,126 302	115,544 580
	29,126 210	115,553 118
Rata-Rata	29,126 224	115,549 740
Std. Dev.	1,37 E-04	5,68 E-03

D.2. Data hasil pengukuran pada seluruh rentang kalibrasi dapat dikumpulkan dan dikelompokkan untuk memudahkan pengolahan lebih lanjut. Seluruh nilai rata-rata dan standar deviasi dari hasil pengukuran termometer standar dan UUT pada setiap titik ukur yang telah terkoreksi akan direkap pada tabel baru. Selanjutnya, hasil pengukuran standar yang telah terkoreksi dapat dikonversi berdasarkan cara pada Lampiran A untuk menentukan nilai suhu (nilai suhu standar). Sebagai contoh, rekapitulasi data hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel D.4.

Tabel D.4. Contoh Rekapitulasi Data Hasil Pengukuran

Set Point (°C)	$R_{std.terkoreksi}$ (Ω)	t_{std} (°C)	$R_{UUT.terkoreksi}$ (Ω)
0	25,140 466	0,004 871	99,989 629
-40	21,097 621	-40,072 508	84,205 402
-20	23,123 794	-20,048 716	92,114 741
20	27,141 569	20,024 525	107,800 724
40	29,126 224	40,001 351	115,549 740
60	31,098 780	59,978 144	123,247 396
80	33,059 671	79,958 832	130,902 491
100	35,009 106	99,945 195	138,510 408
100	35,009 873	99,953 079	138,512 242
125	37,428 838	124,925 771	147,953 838
150	39,830 090	149,907 875	157,325 940
175	42,214 203	174,904 780	166,630 913
200	44,580 352	199,907 173	175,865 031
0	25,140 780	0,008 007	99,989 895

E. Analisis Data

1. Hitung dan catat nilai standar deviasi dari setiap perhitungan rata-rata penunjukan termometer standar dan UUT. Gunakan nilai standar deviasi tersebut untuk mengestimasi ketidakpastian pengukuran berulang.
2. Konversikan nilai rata-rata tahanan termometer standar ke suhu dalam °C menggunakan persamaan ITS-90 (lihat Lampiran A). Dengan demikian, akan

diperoleh nilai suhu standar untuk setiap pengukuran, yang menjadi pasangan nilai UUT yang tercatat dalam satuan ohm.

- Lakukan perhitungan R_0 dari UUT, yaitu nilai rata-rata pengambilan data di titik es sebelum dan sesudah kalibrasi, dengan perhitungan:

$$R_0 = \frac{99,989\ 629 + 99,989\ 895}{2} = 99,989\ 762\ \Omega$$

- Lakukan perhitungan *short-term stability* dari UUT dengan cara membandingkan hasil pembacaan alat sebelum dan sesudah kalibrasi (lihat sub-bab 8.1, point c).

Contoh Perhitungan:

$$\begin{aligned} \text{Short-term stability UUT} &= |R_{0,\text{before}} - R_{0,\text{after}}| \\ &= \frac{99,989\ 629 - 99,989\ 895}{2} \\ &= 0,000\ 133\ \Omega \end{aligned}$$

- Lakukan perhitungan nilai histeresis dari data tahanan UUT pada suhu minimum, maksimum, dan pertengahan rentang kalibrasi (lihat sub-bab 8.2, point f).

Contoh Data:

- $R_{\min} = R_{-40} = 84,205\ 402\ \Omega$
- $R_{\max} = R_{200} = 175,865\ 031\ \Omega$
- $R_{\text{mid } 1} = R_{100\text{m}.1} = 138,510\ 408\ \Omega$
- $R_{\text{mid } 2} = R_{100\text{m}.2} = 138,518\ 242\ \Omega$

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{hys}} &= R_{100\text{m}.1} - R_{100\text{m}.2} \\ &= 138,510\ 408\ \Omega - 138,520\ 208\ \Omega \\ &= -0,009\ 8\ \Omega \end{aligned}$$

Perhitungan histeresis hanya bisa dilakukan jika suhu standar pada saat pengukuran $R_{100\text{m}.1}$ dan $R_{100\text{m}.2}$ sama. Jika terdapat perbedaan suhu standar, maka nilai histeresis harus dikoreksi. Contohnya, jika selisih suhu standar sebesar $0,02\ ^\circ\text{C}$ dari kedua nilai standar, sehingga $t_{\text{std}_m1} - t_{\text{std}_m2} = -0,02\ ^\circ\text{C}$, maka koreksi histeresis dihitung dengan mengalikan selisih tersebut dengan sensitivitas UUT, misalnya, $2,5\ ^\circ\text{C}/\text{ohm}$. Dengan demikian, nilai koreksi adalah:

$$\text{Koreksi} = \frac{-0,02}{2,5} = -0,008\ \Omega$$

Setelah koreksi, nilai histeresis menjadi:

$$\text{Hys}_{\text{baru}} = -0,009\ 8\ \Omega - (-0,008\ \Omega) = -0,001\ 8\ \Omega.$$

Estimasi ketidakpastian dilakukan dengan mengabsolutkan nilai tersebut sebagai *full width* dari distribusi rectangular.

6. Koefisien persamaan kalibrasi UUT dihitung menggunakan metode regresi dengan model Callendar-Van Dusen (Persamaan D.1). Model ini digunakan untuk menentukan hasil kalibrasi UUT. Cara lengkap menghitung koefisien dijelaskan pada Lampiran C, dengan bantuan aplikasi *spreadsheet*. Format data yang digunakan untuk perhitungan dapat dilihat pada Tabel D.5.

Tabel D.5. Data Hasil Kalibrasi untuk Diregresi

Set Point	Tahanan UUT (R_t)	Suhu Standar (t)	$R_t - R_0$	$R_0 t$	$R_0 t^2$	$R_0 (t-100) t^3$
0	99,989 762	0,006 439	0,00	0,64	4,15 E-03	0,00 E+00
-40	84,205 402	-40,072 508	-15,78	-4006,84	1,61 E+05	9,01 E+08
-20	92,114 741	-20,048 716	-7,88	-2004,67	4,02 E+04	9,67 E+07
20	107,800 724	20,024 525	7,81	2002,25	4,01 E+04	0,00 E+00
40	115,549 740	40,001 351	15,56	3999,73	1,60 E+05	0,00 E+00
60	123,247 396	59,978 144	23,26	5997,20	3,60 E+05	0,00 E+00
80	130,902 491	79,958 832	30,91	7995,06	6,39 E+05	0,00 E+00
100	138,510 408	99,945 195	38,52	9993,50	9,99 E+05	0,00 E+00
100	138,512 242	99,953 079	38,52	9994,28	9,99 E+05	0,00 E+00
125	147,953 838	124,925 771	47,96	12491,30	1,56 E+06	0,00 E+00
150	157,325 940	149,907 875	57,34	14989,25	2,25 E+06	0,00 E+00
175	166,630 913	174,904 780	66,64	17488,69	3,06 E+06	0,00 E+00
200	175,865 031	199,907 173	75,88	19988,67	4,00 E+06	0,00 E+00
100 (Hysteresis)	139,520 208	99,953 079	39,53	9994,28	9,99 E+05	0,00 E+00
0	99,989 762	0,006 439	0,00	0,64	4,15 E-03	0,00 E+00

7. Hasil perhitungan regresi dapat dilihat pada Tabel D.6, yang mencakup nilai koefisien A , B dan C . Selain itu, tabel tersebut juga menunjukkan nilai *standar error estimate* (SEE), yang digunakan untuk memperkirakan ketidakpastian akibat kesalahan regresi.

Tabel D.6. Hasil Regresi Data Kalibrasi

C	B	A	SEE
-1.164E-11	-5.9E-07	0.003913	0.002183

8. Untuk memudahkan penggunaan hasil kalibrasi, dibuat tabel yang menunjukkan hubungan antara keluaran PRT Pt-100 (dalam ohm) dan suhu (dalam °C). Perhitungan dilakukan menggunakan koefisien A , B , C , dan R_0 pada Persamaan D.1. Hasilnya disajikan dalam Tabel D.7.

Tabel D.7. Hasil Kalibrasi Penunjukkan Suhu vs Tahanan

t_{90} (°C)	0	-5	-10	-15
-40	84,234 611			
-20	92,139 529	90,168 806	88,194 530	86,216 528
0	99,989 762	98,031 856	96,070 923	94,106 855

t_{90} (°C)	0	5	10	15
0	99,989 762	101,944 718	103,896 738	105,845 822
20	107,791 970	109,735 182	111,675 458	113,612 798
40	115,547 203	117,478 671	119,407 204	121,332 800
60	123,255 461	125,175 186	127,091 975	129,005 828
80	130,916 745	132,824 726	134,729 772	136,631 881
100	138,531 055	140,427 292	142,320 594	144,210 960
120	146,098 390	147,982 884	149,864 442	151,743 064
140	153,618 750	155,491 501	157,361 315	159,228 194
160	161,092 137	162,953 143	164,811 214	166,666 349
180	168,518 548	170,367 811	172,214 139	174,057 530
200	175,897 986			

9. Menentukan Nilai Komponen Budget Ketidakpastian

Untuk menghitung ketidakpastian pengukuran, model matematis dan analisisnya mengikuti Bab 8 pada bagian utama Panduan ini. Contoh analisis ketidakpastian disajikan oleh Tabel D.8.

Tabel D.8. Komponen Ketidakpastian pada Kalibrasi Termometer Tahanan Platina dengan Metode Perbandingan

Sumber Ketidakpastian	Satuan	Simbol	Distribusi	U	Pembagi	v'	u _i	c _i	u _{c,i}	(u _{c,i}) ²	(u _{c,i}) ⁴ /v _i
A. STANDAR DAN INDIKATORNYA											
U1	Sertifikat standar	δ_{is}	Normal	0,00957	2	60	5,E-03	1	5,E-03	2,E-05	9,E-12
U2	Drift jangka panjang standar	$\delta_{isl.drift}$	Kotak	0,00022	1,73	60	1,E-04	10	1,E-03	2,E-06	4,E-14
U3	Drift jangka pendek standar	$\delta_{iss.drift}$	Kotak	0,00031	1,73	60	2,E-04	10	2,E-03	3,E-06	2,E-13
U4	Pengulangan pembacaan std.	δ_{srep}	Kotak	0,00012	3,16	9	4,E-05	10	4,E-04	1,E-07	2,E-15
U5	Sertifikat indikator kanal 1	δR_s	Normal	0,00052	2	60	3,E-04	10	3,E-03	7,E-06	8,E-13
U6	Drift indikator kanal 1	δR_{sdrift}	Kotak	0,00013	1,73	60	8,E-05	10	8,E-04	6,E-07	5,E-15
U7	Daya baca indikator kanal 1	δR_{sres}	Kotak	5,E-07	1,73	60	3,E-07	10	3,E-06	8,E-12	1,E-24
U8	SEE regresi indikator kanal 1	δR_{sSEE}	Normal	0,00016	1	5	2,E-04	10	2,E-03	3,E-06	2,E-12
B. UUT DAN INDIKATORNYA											
U9	Repeatability of UUT	$\delta UUTrep$	Kotak	0,00659	3,16	9	2,E-03	2,5	5,E-03	3,E-05	8,E-11
U10	Short-term Stability UUT in 0°C	$\delta UUTstab$	Kotak	0,00013	1,73	60	8,E-05	2,5	2,E-04	4,E-08	2,E-17
U11	Self-heating UUT	δSH	Kotak	0,004	1,73	60	2,E-03	1	2,E-03	5,E-06	5,E-13
U12	Hysteresis UUT	δH	Kotak	0,0018	1,73	60	1,E-03	1	1,E-03	1,E-06	2,E-14
U13	Sertifikat indikator kanal 2	δR_U	Normal	0,0012	2	60	6,E-04	2,5	2,E-03	2,E-06	8,E-14
U14	Drift indikator kanal 2	δR_{Udrift}	Kotak	0,00012	1,73	60	7,E-05	2,5	2,E-04	3,E-08	2,E-17
U15	Daya baca indikator kanal 2	δR_{Ures}	Kotak	5,E-07	1,73	60	3,E-07	2,5	7,E-07	5,E-13	5,E-27
U16	SEE regresi indikator kanal 2	δR_{USEE}	Normal	0,00019	1	5	2,E-04	2,5	5,E-04	2,E-07	1,E-14
C. MEDIA KALIBRASI											
U17	Stabilitas media	$\delta Mstab$	Kotak	0,003	1,73	60	2,E-03	1	2,E-03	3,E-06	2,E-13
U18	Ketidakteragaman media	δM_{unif}	Kotak	0,008	1,73	60	5,E-03	1	5,E-03	2,E-05	8,E-12
U19	Suhu titik es	δM_{ice}	Kotak	0,02	1,73	60	1,E-02	1	1,E-02	1,E-04	3,E-10
D. REGRESI KOEFISIEN PERSAMAAN CVD											
U20	SEE regresi persamaan CVD	$\delta CVDSEE$	Normal	0,00227	1	10	2,E-03	2,5	6,E-03	3,E-05	1,E-10
Jumlah										3,E-04	5,E-10
Ketidakpastian Gabungan, u_c, (°C)											0,0162554
Derajat Kebebasan Efektif, v_{eff}											138,94407
Faktor Cakupan dari v_{eff} dan Tingkat Kepercayaan 95 %											1,98
Ketidakpastian Terentang, U = k.u.c., (°C)											0,033