

SNSU PK.S-02:2021

Panduan Kalibrasi Termometer Digital



SNSU PK.S-02:2021
PANDUAN KALIBRASI TERMOMETER DIGITAL

Penyusun: 1. Suherlan
 2. Ghufron Zaid
 3. Dwi Larassati
 4. Hidayat Wiriadinata
 5. Arfan Sindhu Tistomo
 6. Aditya Achmadi
 7. Iip Achmad Rifai
 8. Melati Azizka Fajria
 9. Arief Gunawan
 10. Effendi
 11. Arlan

Kontributor: 1. Dede Erawan
 2. Achmad Sulaeman

Desain sampul: Bagus Muhammad Irvan - BSN

Direktorat SNSU Termoelektrik dan Kimia
Badan Standardisasi Nasional

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2021

Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Termometer Digital SNSU PK.S-02:2021 diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi termometer digital 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 29 Desember 2021

Hastori
Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran
Badan Standardisasi Nasional

Daftar Isi

	halaman
Penyusun dan Kontributor	i
Lembar Pengesahan	ii
Daftar Isi	iii
1. Pendahuluan	5
2. Ruang Lingkup	5
3. Definisi	5
4. Peralatan	6
5. Pra Kalibrasi	6
5.1 Rekaman Teknis	6
5.2 Penkondisian DUC	6
5.3 Batas Pencelupan	7
5.4 Pembuatan Titik Es	10
6. Proses Kalibrasi	11
7. Analisa Data	13
7.1 Menghitung Koreksi	13
7.2 Persamaan Interpolasi	14
7.3 Evaluasi Ketidakpastian	15
Daftar Pustaka	21

1 Pendahuluan

- 1.1 Petunjuk teknis kalibrasi ini disusun untuk mengharmonisasikan pelaksanaan kalibrasi alat ukur suhu berupa termometer digital (*temperature sensors with display unit*) yang dilakukan oleh laboratorium yang menerapkan SNI ISO/IEC 17025:2017, *Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Laboratorium Kalibrasi*.
- 1.2 Metode kalibrasi yang diuraikan dalam panduan ini mengacu pada beberapa dokumen standar diantaranya MSL Technical Guide 1, EURAMET Calibration Guide No. 8 dan beberapa literatur lain yang relevan dan termutakhir. Evaluasi ketidakpastian pengukuran mengacu kepada dokumen EA-4/02 M:1999, *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration* dan JCGM 100:2008, *Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, atau dokumen lain yang sesuai.

2 Ruang Lingkup

- 2.1 Panduan ini menetapkan prosedur kalibrasi untuk termometer digital secara kontak dengan sensor RTD (*resistance temperature detector*) dan termokopel (tipe *probe* atau kawat) pada rentang ukur -195 °C ~ 1500 °C dengan media kalibrasi suhu bak cairan (*liquid bath: alcohol, water, silicon oil, salt*) dan/atau tungku (*dry well, dry block, etc.*);
- 2.2 Kalibrasi yang dilakukan menggunakan metode perbandingan antara penunjukkan termometer digital dengan penunjukan termometer standar;
- 2.3 Termometer standar yang digunakan dapat berupa termometer digital dengan sensor PRT (*platinum resistance thermometer*) dan/atau *nobel/pure-metal thermocouple* (tipe S, R, B, Pt/Pd, Pt/Au) dengan perbandingan akurasi standar dan DUC (*device under calibration*) 4:1 atau setidaknya lebih baik dari alat yang akan dikalibrasi (DUC);
- 2.4 Panduan ini juga menetapkan prosedur evaluasi ketidakpastian pengukuran dan kalibrasi yang terkait dengan kalibrasi termometer digital.

3 Definisi

- 3.1 Termometer digital adalah sensor suhu (umumnya jenis sensor termoelektrik: RTD dan termokopel) yang dilengkapi dengan unit display elektronik yang terbaca dalam satuan suhu (°C, °F atau satuan suhu lainnya).
- 3.2 Media kalibrasi adalah media sumber/penghasil panas atau dingin dapat berupa bak cairan (alkohol, air, minyak, garam) atau tungku.

4 Peralatan

- 4.1 Termometer standar (PRT, *nobel/pure-metal thermocouple*) dengan indikator (*resistance bridge*, nano-volt meter atau indikator lain yang sesuai) yang terkalibrasi dan tertelusur ke laboratorium kalibrasi terakreditasi;
- 4.2 Media kalibrasi (bak cairan dan/atau tungku) yang sudah diukur/diuji keseragaman (*uniformity*) dan kestabilan (*stability*) suhunya;
- 4.3 Media kalibrasi titik es

5 Pra Kalibrasi

5.1 Rekaman Teknis

Rekaman teknis DUC dilakukan sebelum proses pengukuran dan kalibrasi. Rekaman tersebut umumnya terkait hal-hal sebagai berikut:

- Pabrik pembuat (*manufacturer*), model, nomor seri, daya baca (resolusi), kapasitas/rentang ukur, dan informasi terkait lainnya;
- Rentang ukur/kalibrasi yang diminta serta akurasi yang diharapkan;
- Titik-titik ukur spesifik (jika ada) sesuai kebutuhan pelanggan;
- Penggunaan DUC di lapangan, apakah akan digunakan sebagai termometer acuan atau alat ukur biasa;
- Apakah diperlukan atau akan dilakukan *adjustment* sesuai kebutuhan dan permintaan pelanggan
- Data teknis lain jika diperlukan

5.2 Pengkondisian DUC

Dalam beberapa kasus (jika diperlukan) termometer digital memerlukan pengkondisian sebelum dilakukan proses kalibrasi, diantaranya sebagai berikut:

- Pada termometer digital dengan sensor RTD (misal: Pt-100) dengan tipe sensor lilitan mungkin diperlukan *annealing* (dipanaskan pada titik ukur maksimumnya) untuk memulihkan kondisi lilitan kawat sensor setelah proses transportasi.
- Pada beberapa tipe termokopel (umumnya *nobel/pure-metal thermocouple*) mungkin perlu dilakukan uji ketidakseragaman (*inhomogeneity*) kawat termokopel untuk mengetahui kesalahan dalam pengukuran suhu.

- Beberapa tipe indikator suhu (umumnya indikator dengan resolusi tinggi), mungkin memerlukan penyetabil tegangan jala-jala, dll.

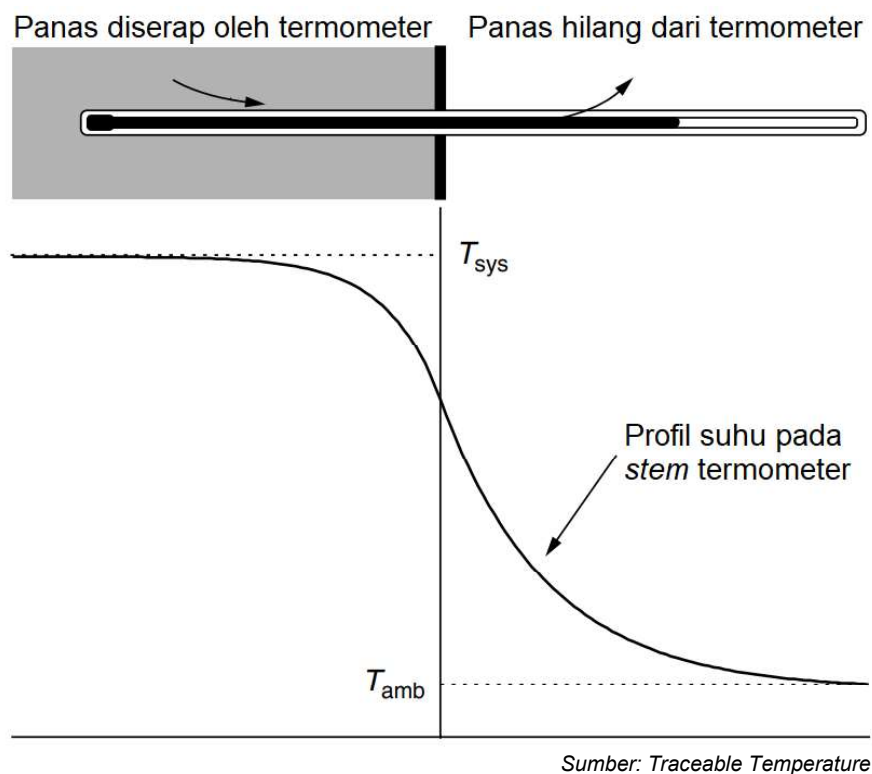
5.3 Batas Pencelupan

Probe ataupun *stem* termometer digital pada umumnya tidak tercelup semua sehingga ada potensi timbulnya kesalahan dalam pencelupan (*immersion error*). Kedalaman pencelupan *probe* sensor termometer digital juga tergantung pada seberapa akurat hasil pengukuran/kalibrasi yang diinginkan/diperlukan. Gambar 1 menampilkan profil distribusi suhu pada *stem* sebuah termometer ketika dicelupkan dalam suatu media suhu. Pada gambar tersebut dapat terlihat bahwa termometer bisa menjadi perantara perpindahan/hilangnya panas dari sebuah media suhu ke lingkungan.

Model matematika sederhana terkait kesalahan akibat pencelupan termometer dapat dilihat pada persamaan 1.

Model Matematika

$$\Delta T_m = (T_{amb} - T_{sys}) K \exp\left(\frac{-L}{D_{eff}}\right) \quad (1)$$



Gambar 1. Profil distribusi suhu pada *stem* termometer

di mana:

ΔT_m = Kesalahan pencelupan

T_{amb} = Suhu lingkungan

T_{sys} = Suhu media

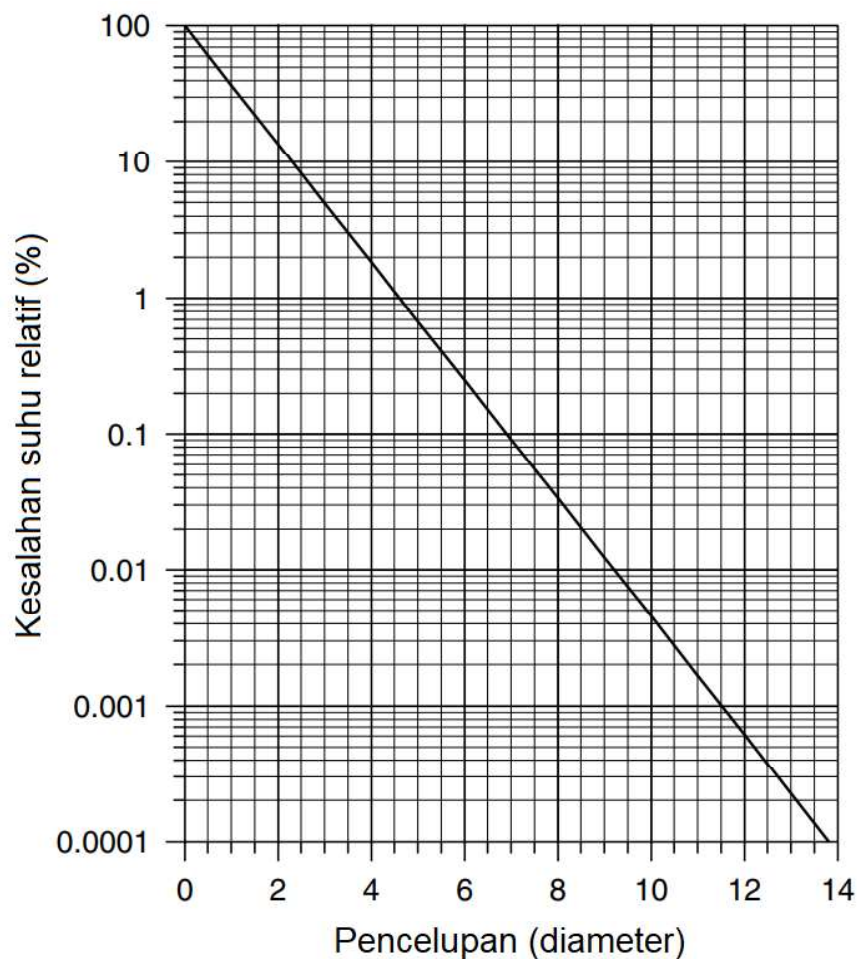
K = Konstanta, $0 \leq K \leq 1$

L = Kedalaman pencelupan

D_{eff} = Diameter efektif *probe*

Untuk kemudahan dalam menentukan batas pencelupan termometer sesuai dengan tingkat akurasi yang diperlukan, dapat juga menggunakan grafik pada Gambar 2. Grafik ini menampilkan hubungan kesalahan relatif suhu dalam % dengan ukuran diameter *probe* sebuah termometer.

Model Grafik



Sumber: Traceable Temperature

Gambar 2. Grafik kesalahan suhu relatif

Contoh kasus:

Diketahui sebuah termometer memiliki diameter *probe* 4 mm dengan panjang elemen sensor 40 mm. Diharapkan kesalahan akibat pencelupan dalam pengukuran tidak lebih dari 0,01 °C pada suhu 100 °C. Tentukan pencelupan minimum dari termometer tersebut.

Penyelesaian:

Pertama, tentukan akurasi relatif dalam % yang diharapkan dalam pengukuran tersebut dengan persamaan berikut:

$$\left| \frac{\Delta T_m}{T_{sys} - T_{amb}} \right| = \frac{0,01}{100 - 20} \approx 0,01 \%$$

Dengan mengacu ke grafik pada Gambar 2, dengan akurasi relatif 0,01%, maka diperoleh nilai $9,4 \times D_{eff}$ atau jika dibulatkan menjadi $10 \times D_{eff}$. Sehingga kedalaman pencelupan dapat dihitung sebagai berikut:

$$L = (10 \times D_{eff}) + L_s = 80 \text{ mm}$$

Panduan Sederhana

Dengan mengacu ke model grafik pada Gambar 2, berikut panduan sederhana pencelupan termometer berdasarkan penggunaannya dalam pengukuran dan kalibrasi:

- Untuk pengukuran kelas industri dengan akurasi 1%, termometer dicelupkan sedalam 5 kali diameter *probe* ditambah dengan panjang elemen sensor seperti pada persamaan berikut:

$$L = (5 \times D_{eff}) + L_s \quad (2)$$

- Untuk pengukuran di lab - lab kalibrasi dengan akurasi 0,01%, termometer dicelupkan sedalam 10 kali diameter *probe* ditambah dengan panjang elemen sensor seperti pada persamaan berikut:

$$L = (10 \times D_{eff}) + L_s \quad (3)$$

- Untuk pengukuran di lab - lab kalibrasi dengan akurasi tinggi 0,0001%, termometer dicelupkan sedalam 15 kali diameter *probe* ditambah dengan panjang elemen sensor seperti pada persamaan berikut:

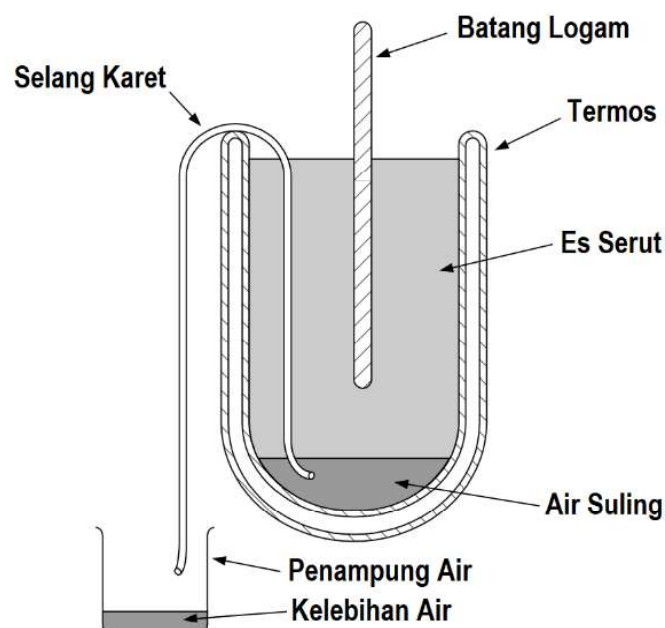
$$L = (15 \times D_{eff}) + L_s \quad (4)$$

5.4 Pembuatan Titik Es

Titik es didefinisikan sebagai suatu kondisi kesetimbangan suhu dari es dan air udara jenuh (*air-saturated water*) yang terjadi pada suhu $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Air udara jenuh adalah suatu kondisi di mana air sudah tidak melarutkan lagi udara disekitarnya karena sudah mencapai titik jenuh. Kondisi ini umumnya terjadi ketika air dan udara mengalami kontak dalam waktu yang cukup lama. Keuntungan menggunakan titik es adalah karena cara pembuatannya cukup sederhana dan sangat murah, dan sepanjang pembuatannya mengikuti metode yang baku, maka pengukuran di titik es bisa mencapai akurasi sampai $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$.

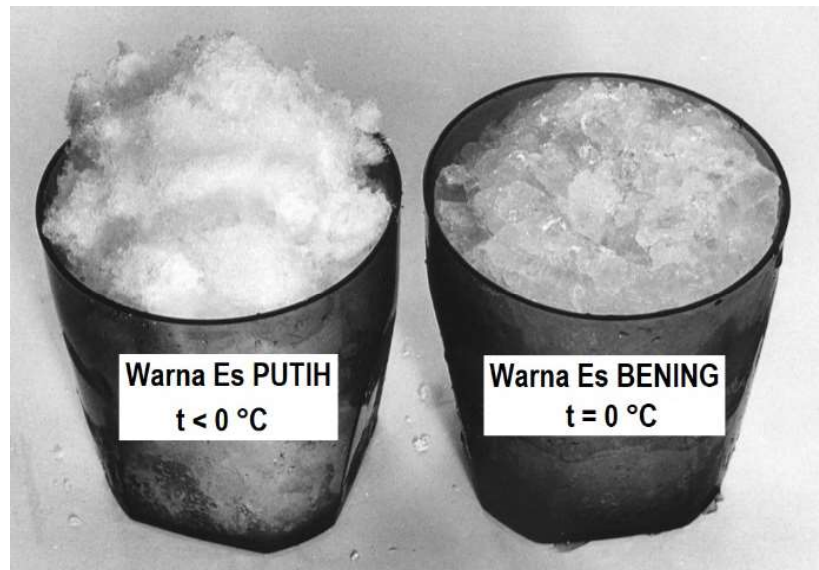
Peralatan

- Termos es dengan kedalaman 30 - 40 cm dan diameter 7 - 10 cm, atau disesuaikan dengan kebutuhan pengukuran.
- Es serut yang terbuat dari air suling (*distillated water*) atau air lainnya dengan resistivitas sekitar $0,5\text{ M}\Omega\cdot\text{m}$.
- Air suling atau air lain sesuai dengan ketentuan sebelumnya
- Selang air dengan bahan lentur (silikon atau karet) dengan diameter sekitar 0,5 cm
- Batang logam atau plastik untuk membuat lubang ukur (*thermo-well*) pada es dengan diameter disesuaikan dengan termometer yang akan dikalibrasi
- Penampung air (ember atau sejenisnya). Set up peralatan dapat dilihat pada Gambar 3.



Sumber: Traceable Temperature

Gambar 3. Media Titik Es



Sumber: Traceable Temperature

Gambar 4. Es serut sebelum (warna putih) dan sesudah tercampur air (warna bening)

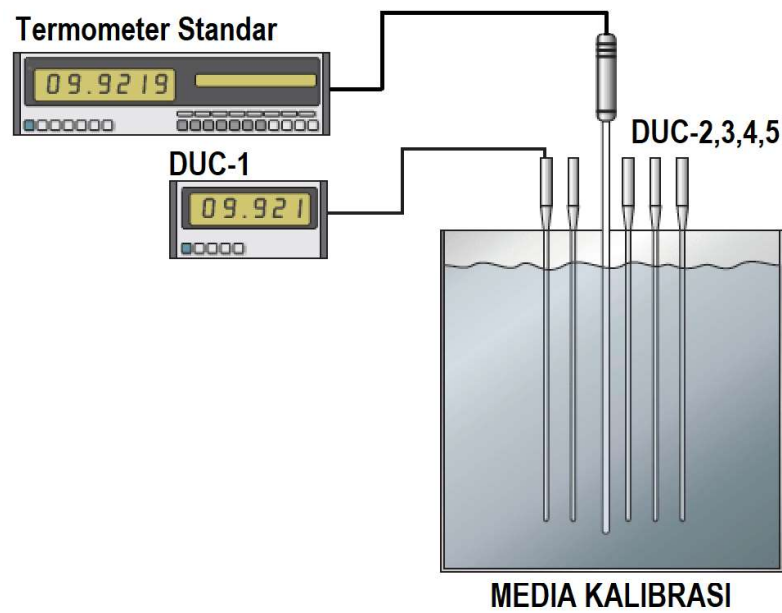
Cara Pembuatan

- Pasang selang pembuangan air pada termos seperti ditunjukkan pada Gambar 3
- Penuhi termos dengan es serut atau cukup diisi sesuai kebutuhan
- Siram dengan cara dicipratkan air suling pada es serut sehingga warna es berubah dari putih menjadi bening (lihat perbedaan warna es yang dimaksud pada Gambar 4)
- Tunggu 15 - 20 menit sampai tercapai kesetimbangan suhu antara es serut dengan air. Pada selang waktu tersebut diharapkan sudah terbentuk campuran es dengan air udara jenuh.

6 Proses Kalibrasi

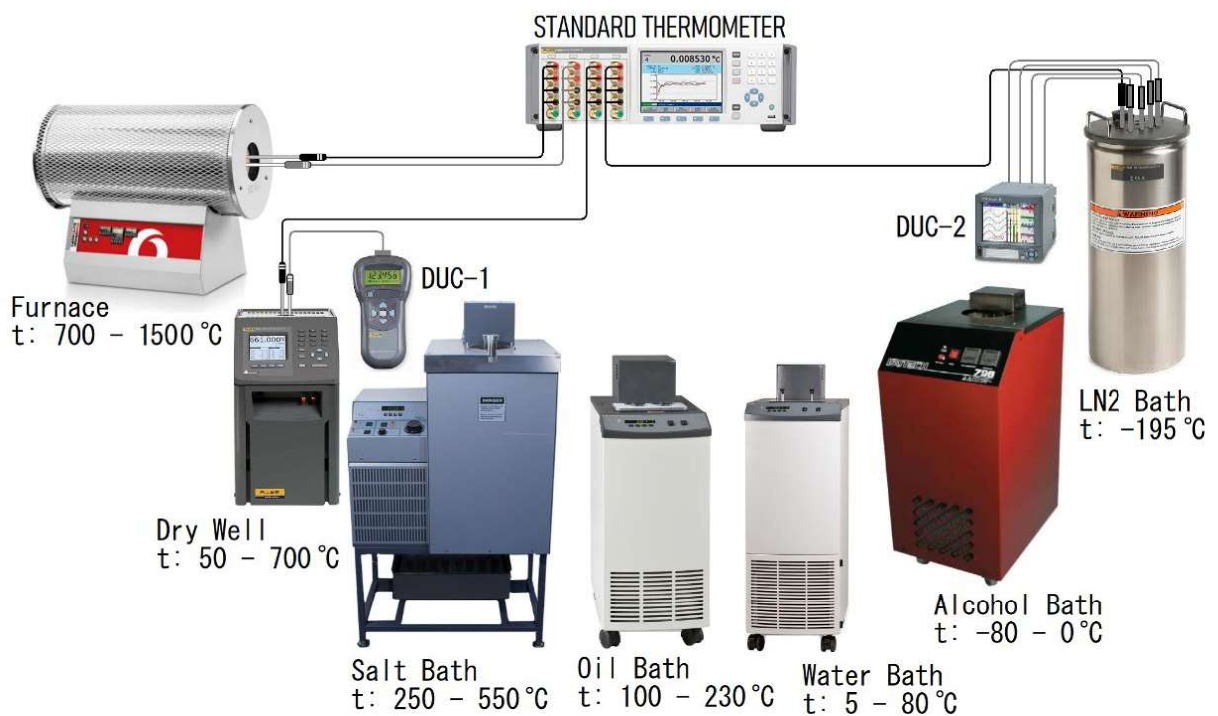
Secara umum proses kalibrasi termometer digital mirip dengan kalibrasi termometer tipe lainnya, diantara langkah - langkah kerjanya adalah sebagai berikut:

- Siapkan media kalibrasi di titik es seperti telah dijelaskan pada bab sebelumnya, kemudian ukur dan rekam koreksi penunjukan termometer pada titik es.
- Set-up termometer standar dan DUC pada media kalibrasi seperti pada Gambar 5
- Set suhu media kalibrasi sesuai titik dan rentang ukur yang diperlukan dimulai dari titik ukur suhu terendah
- Tunggu sampai suhu media kalibrasi stabil (setimbang termal), kemudian rekam pembacaan termometer standar dan DUC sekurangngnya 5 kali, atau sesuai kebutuhan dan kondisi data.



Gambar 6. Set-up kalibrasi termometer digital

- Ulangi Langkah 3 dan 4 untuk titik ukur suhu lainnya
- Ulangi Langkah 1 untuk mengukur *drift (thermal-cycling drift)* termometer pada titik es
- Jika diperlukan, pindah set-up kalibrasi ke media suhu lain sesuai titik dan rentang ukur yang diperlukan seperti Gambar 6.



Sumber: Katalog Carbolite, Isotech dan Fluke

Gambar 6. Set-up kalibrasi sesuai media kalibrasi dan rentang suhunya

7 Analisa Data

7.1 Menghitung Koreksi

- Hitung rata-rata pembacaan termometer standar dan DUC dalam satuan suhu (misal °C)
- Hitung koreksi (K) dengan mengurangkan pembacaan suhu DUC (t_{DUC}) dari termometer standar (t_{STD}) dengan persamaan berikut:

$$K = t_{STD} - t_{DUC} \quad (5)$$

- Jika dilakukan pembulatan terhadap koreksi (K_{RND}), maka dihitung juga *residual errors* (RE) sebagai akibat dari pembulatan tersebut dengan persamaan berikut:

$$RE = K_{RND} - K \quad (6)$$

Tabel 1 menampilkan contoh data kalibrasi termometer digital dan bagaimana koreksi DUC dihitung.

Tabel 1. Contoh data kalibrasi termometer digital

No	Termometer Standar	DUC	Koreksi dibulatkan	Residual Errors
	t_{STD} (°C)	t_{DUC} (°C)	K_{RND} (°C)	RE (°C)
1	0,0000	0,000	0,000	0,0000
2	-19,9504	-19,960	0,010	0,0004
3	-7,4467	-7,460	0,013	-0,0003
4	5,0430	5,045	-0,002	0,0000
5	17,5320	17,535	-0,003	0,0000
6	30,0153	30,015	0,000	-0,0003
7	42,4994	42,500	-0,001	-0,0004
8	54,9758	54,975	0,001	0,0002
9	67,5422	67,550	-0,008	-0,0002
10	80,0084	80,005	0,003	-0,0004
11	92,4734	92,490	-0,017	-0,0004
12	104,9527	104,970	-0,017	0,0003
13	117,4225	117,440	-0,017	0,0005
14	129,8958	129,915	-0,019	0,0002
15	142,3688	142,390	-0,021	0,0002
16	154,8518	154,860	-0,008	0,0002
17	167,3067	167,305	0,002	0,0003
18	179,7642	179,755	0,009	-0,0002
19	0,0000	0,005	-0,005	0,0000

7.2 Persamaan Interpolasi

Dalam banyak kasus persamaan interpolasi diperlukan untuk mengestimasi koreksi pembacaan DUC pada titik - titik ukur yang tidak dikalibrasi. Misal pada Tabel 1, suhu -15 °C, 10 °C, 20 °C, dan beberapa suhu lainnya merupakan titik-titik ukur yang tidak dilakukan pengukuran pada saat kalibrasi, namun nilai - nilai koreksinya dapat diestimasi dengan persamaan interpolasi. Berikut secara umum langkah - langkah dalam menentukan persamaan interpolasi:

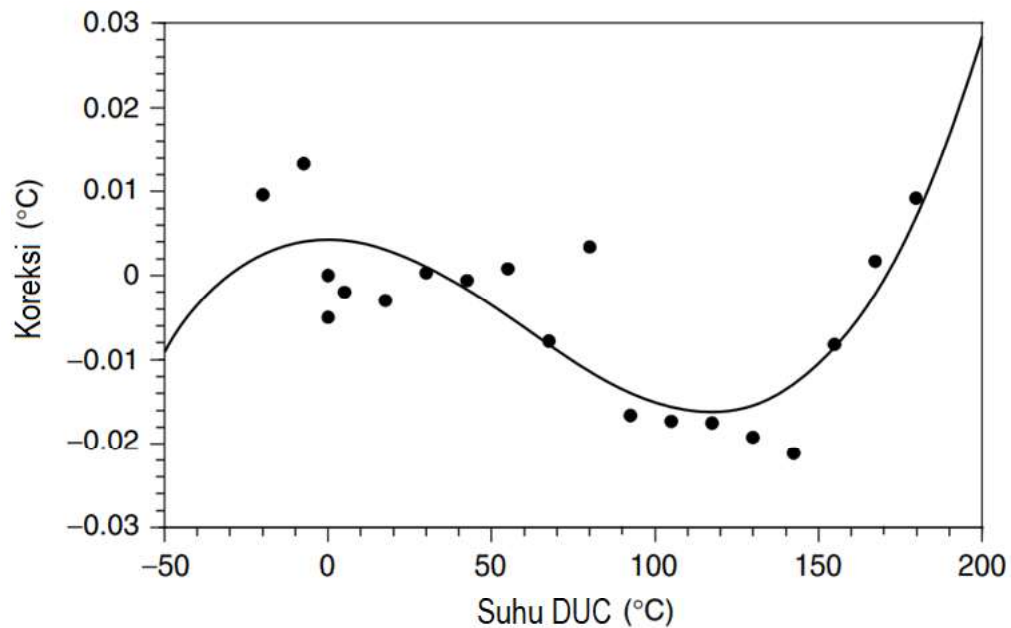
- Tentukan model persamaan interpolasi, umumnya persamaan *polynomial* pangkat 3 atau lebih rendah (tergantung kualitas dari *curve fitting* yang dihasilkan), sebagai berikut:

$$K = a_0 + a_1 \times t_{DUC} + a_2 \times t_{DUC}^2 + a_3 \times t_{DUC}^3 \quad (7)$$

- Hitung koefisien - koefisien persamaan a_0 , a_1 , a_2 dan a_3 dengan model penyelesaian persamaan 4 variable. Dalam kasus koefisien a_0 di-nol-kan ($a_0 = 0$), maka persamaan diselesaikan dengan persamaan 3 variable, sebagai berikut:

$$K = a_1 \times t_{DUC} + a_2 \times t_{DUC}^2 + a_3 \times t_{DUC}^3 \quad (8)$$

- Untuk dapat menyelesaikan model persamaan 4 variable diperlukan sekurangnya 4 pengukuran pada titik ukur suhu berbeda, dan untuk dapat menyelesaikan persamaan 3 variable diperlukan sekurangnya 3 pengukuran yang berbeda.
- Ketidakpastian akibat kesalahan pada interpolasi (*interpolation error*) dapat dievaluasi sebagai ketidakpastian Tipe A atau Tipe B. Untuk dapat dievaluasi sebagai Tipe A, jumlah pengukuran/titik ukur (N) sekurangnya 2 kali lebih banyak dari jumlah koefisien (k) yang akan dihitung ($N \geq k + 2$). Dalam kasus jumlah titik ukur tidak terpenuhi ($N < k + 2$), maka dievaluasi sebagai ketidakpastian Tipe B. Hal ini dimungkinkan jika ketidakpastian tersebut tidak dominan (tidak mempengaruhi nilai ketidakpastian akhir).
- Untuk menyelesaikan persamaan *polynomial* dapat menggunakan fungsi-fungsi yang tersedia di Microsoft Excel seperti LINEST dan fungsi - fungsi lain pada *regression tools*. Selain dapat menghitung nilai koefisien, fungsi - fungsi tersebut juga menghasilkan parameter-parameter statistik lainnya seperti kesalahan baku (*standard errors*), derajat kebebasan (*degree of freedom*), dll.
- Tabel 1 dan Gambar 7 menampilkan contoh kasus bagaimana persamaan interpolasi dilakukan pada hasil pengukuran.



Gambar 7. Data kalibrasi dan persamaan interpolasi *polynomial* pangkat 3

Dengan menggunakan fungsi LINEST pada Microsoft Excel maka diperoleh nilai - nilai koefisien, kesalahan baku dan derajat kebebasan dari persamaan *polynomial* pangkat 3 sebagai berikut:

$$a_0 = 4,407\ 946\ \text{E-}03\ \text{°C}$$

$$a_1 = -8,898\ 932\ \text{E-}06\ -$$

$$a_2 = -4,350\ 795\ \text{E-}06\ \text{°C}^{-1}$$

$$a_3 = 2,497\ 160\ \text{E-}08\ \text{°C}^{-2}$$

$$SE = 0,007\ \text{°C}$$

$$\vartheta = 15$$

7.3 Evaluasi Ketidakpastian

Mengacu ke dokumen JCGM 100:2008 (*Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), dan dokumen lainnya, maka evaluasi ketidakpastian dibagi menjadi Tipe A dan Tipe B, sedangkan sumber ataupun komponen - komponen ketidakpastiannya tergantung pada model dan *set-up* pengukuran atau kalibrasi. Berikut beberapa contoh komponen ketidakpastian pada kalibrasi termometer digital:

- Pembacaan Termometer Standar

Ketidakpastian baku Tipe B pada pembacaan termometer standar (u_{STD}) diperoleh dari sertifikat kalibrasi dan nilainya dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{STD} = \frac{U}{k} = \frac{U}{2} \quad (9)$$

- **Drift Termometer Standar**

Long-term drift dari termometer standar dapat dievaluasi dengan beberapa metode, salah satunya dengan meng-assess pergeseran nilai pembacaan suhu (ΔT_{DTS}) dari beberapa sertifikat sebelumnya. Ketidakpastian baku Tipe B (u_{DTS}) dari komponen ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{DTS} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times \Delta T_{DTS}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

- **Pengukuran Berulang**

Ketidakpastian baku Tipe A (u_{REP}) dari pengukuran berulang dievaluasi dari simpangan baku (SD) koreksi pembacaan DUC terhadap termometer standar. Untuk sejumlah data n , nilai ketidakpastian pat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{REP} = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

- **Daya Baca DUC**

Ketidakpastian akibat keterbatasan daya baca atau resolusi (R) indikator DUC (u_{RES}) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{RES} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times R}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

- **Pembulatan**

Dalam kasus nilai koreksi pembacaan DUC dibulatkan di bawah kemampuan daya baca indikator (misal jumlah digit koreksi dibatasi nilai ketidakpastian akhir), maka kesalahan akibat pembulatan (*rounding error*) tersebut perlu dievaluasi. Ketidakpastian dari komponen ini (u_{RND}) dapat diestimasi dari *maximum residual error* (RE_{MAX}) dan dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{RND} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times RE_{MAX}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

- **Drift DUC**

Drift DUC umumnya diestimasi sebagai *thermal-cycling drift*, yaitu pergeseran nilai pengukuran di titik es sebelum dan sesudah kalibrasi (ΔT_{DDUC}). Ketidakpastian baku Tipe B (u_{DDUC}) dari komponen ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{DDUC} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times \Delta T_{DDUC}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

- **Self-heating Sensor (Kasus RTD)**

Untuk termometer digital dengan sensor RTD, umumnya terjadi kenaikan suhu sensor akibat pemanasan internal (*self-heating*). Besarnya kenaikan suhu (ΔT_{SHT}) dapat diinvestigasi salah satunya dengan metode pengukuran tahanan sensor pada dua arus eksitasi berbeda (misal 1 mA dan $\sqrt{2}$ mA). Ketidakpastian Tipe B dari komponen ini (u_{SHT}) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{SHT} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times \Delta T_{SHT}}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

Dalam kasus pengukuran dua arus tidak bisa dilakukan, maka nilai kenaikan suhu akibat pemanasan internal untuk RTD Pt-100 dapat diestimasi sebesar 2 – 4 mK, sedangkan untuk RTD Pt-25 umumnya nilainya lebih kecil.

- **Inhomogeneity Kawat (Kasus Termokopel)**

Untuk termometer digital dengan sensor termokopel, terdapat ketidakpastian akibat ketidakseragaman kawat termokopel (*inhomogeneity*). Untuk mengetahui perbedaan pengukuran suhu karena kesalahan ini (ΔT_{INH}), umumnya dilakukan pengukuran/uji ketidakseragaman kawat termokopel pada suhu sekitar 200 °C di dalam media suhu minyak silikon. Ketidakpastian baku Tipe B dari komponen ini (u_{INH}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$u_{INH} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times \Delta T_{INH}}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Dalam kasus uji keseragaman kawat termokopel tidak dapat dilakukan, maka untuk termokopel baru, nilai ketidakseragaman kawat termokopel dapat mengacu ke dokumen EURAMET Calibration Guide No. 8 sebagai berikut:

- Termokopel Tipe K dan N: 0,1 % dari suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- Termokopel Tipe R dan S: 0,02 % dari suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- Termokopel Tipe B: 0,05 % dari suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- Termokopel Pt/Au dan Pt/Pd: 0,01 % dari suhu ($^{\circ}\text{C}$)
- Termokopel tipe lain: 0,25 % dari suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Untuk kasus termokopel bukan baru, nilai ketidakseragaman kawat disesuaikan dengan penggunaan. Usia dan frekuensi penggunaan termokopel khususnya di suhu tinggi ($t \geq 600$ $^{\circ}\text{C}$) menjadi pertimbangan teknis dalam penentuan nilai tersebut.

- Keseragaman Suhu Media Kalibrasi

Keseragaman (*uniformity*) suhu media kalibrasi (ΔT_{UNI}) diperoleh dari hasil pengukuran/uji keseragaman suhu. Nilai ketidakpastian baku Tipe B (u_{UNI}) dari komponen ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{UNI} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times \Delta T_{UNI}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

- Kestabilan Suhu Media Kalibrasi

Kestabilan (*stability*) suhu media kalibrasi (ΔT_{STB}) diperoleh dari hasil pengukuran/uji kestabilan suhu. Nilai ketidakpastian baku Tipe B (u_{STB}) dari komponen ini dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{STB} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times \Delta T_{STB}}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

- Persamaan Interpolasi

Ketidakpastian akibat kesalahan pada persamaan interpolasi (*interpolation error*) diestimasi dari nilai kesalahan bakunya (*SE: Standard Error*). Nilai ketidakpastian (u_{INT}) dari komponen ini adalah sebagai berikut:

$$u_{INT} = \frac{SE}{1} \quad (19)$$

Tabel 2. Contoh *budget* ketidakpastian kalibrasi termometer digital

Komponen Ketidakpastian	Simbol u_x	Nilai Estimasi a_i	Distribusi Data D_i	Faktor Pembagi k_i	Ketidakpastian Baku u_i
Termometer standar	u_{STD}	0,004	Normal	2	0,002
Drift Term. standar	u_{DTS}	0,002	Segi-empat	$\sqrt{3}$	0,001
Pengukuran berulang	u_{REP}	0,01	t-student	N	0,002
Daya baca DUC	u_{RES}	0,001	Segi-empat	$\sqrt{3}$	0,000
Pembulatan	u_{RND}	0	Segi-empat	$\sqrt{3}$	0,000
Drift DUC	u_{DDUC}	0,005	Segi-empat	$\sqrt{3}$	0,001
<i>Self-heating</i> (RTD)	u_{SHT}	0,004	Segi-empat	$\sqrt{3}$	0,001
<i>Inhomogeneity</i> (TC)	u_{INH}	0	Segi-empat	$\sqrt{3}$	0,000
Keseragaman media	u_{UNI}	0,008	Segi-empat	$\sqrt{3}$	0,002
Kestabilan media	u_{STB}	0,004	Segi-empat	$\sqrt{3}$	0,001
Interpolasi	u_{INT}	0,007	Normal	1	0,007
Ketidakpastian baku gabungan (u_c)					0,008
Ketidakpastian yang dibentangkan (U), tingkat kepercayaan 95%, $k=2$					0,016

- Ketidakpastian Gabungan

Ketidakpastian baku gabungan (u_c) merupakan akar dari jumlah kuadrat semua komponen ketidakpastian dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_c = \sqrt{u_{STD}^2 + u_{DTS}^2 + u_{REP}^2 + u_{RES}^2 + u_{RND}^2 + u_{DDUC}^2 + u_{SHT}^2 + u_{UNI}^2 + u_{STB}^2 + u_{SE}^2} \quad (20)$$

Ketidakpastian akhir adalah ketidakpastian yang dibentangkan (*expanded uncertainty*) pada tingkat kepercayaan 95% dengan faktor cakupan $k=2$ dihitung dengan persamaan berikut:

$$U = k \times u_c \quad (21)$$

Contoh *budget* ketidakpastian untuk kalibrasi termometer digital dapat dilihat pada Tabel 2. Dalam tabel ini ketidakpastian akibat pembulatan koreksi di-nol-kan karena jumlah digit koreksi sama dengan daya baca indikator DUC (3 digit: 0,001 °C), sehingga ketidakpastiannya sudah masuk dalam ketidakpastian akibat keterbatasan daya baca indikator. Dalam contoh ini, sensor yang digunakan adalah RTD sehingga tidak ada komponen ketidakpastian karena *inhomogeneity* termokopel.

Daftar Pustaka

1. SNI ISO/IEC 17025:2017, *Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Laboratorium Kalibrasi*, BSN – 2018.
2. MSL Technical Guide 1, *The Ice Point*, Version 3, July 2019.
3. EURAMET Calibration Guide No. 8, *Guidelines on the Calibration of Thermocouples*, Version 3.0, February 2019.
4. EA-4/02 M:1999, *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, European Cooperation for Accreditation – 1999.
5. JCGM 100:2008, *Evaluation of Measurement Data: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, JCGM BIPM – 2008.
6. ASTM E563 – 11 (Reapproved 2016), *Standard Practice for Preparation and Use of an Ice-Point Bath as a Reference Temperature*, ASTM – 2016.
7. R E Bentley, *Resistance and Liquid in Glass Thermometry*, Handbook of Temperature Measurement Volume 2, NML-CSIRO, May 1998.
8. J V Nicholas and D R White, *Traceable Temperature: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration*, John Wiley & Sons Inc., 2001.
9. CCT – BIPM, *Classification of Services in Thermometry*, January 2021.
10. I Yang, Suherlan, K S Gam and Y G Kim, *Interpolating equation of industrial platinum resistance thermometers in temperature range between 0 °C and 500 °C*, Meas. Sci. Technol. Vol 26 – 035104, 2015.
11. Carbolite, Isotech and Fluke Catalogs and Product Guides