

SNSU PK.S-03:2022

Panduan Kalibrasi Termometer Infrared



PANDUAN KALIBRASI TERMOMETER INFRARED

Penyusun:

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

Desain sampul: Bagus Muhammad Irvan-BSN

Direktorat SNSU Termoelektrik dan Kimia

Badan Standardisasi Nasional

Hak cipta © Badan Standardisasi Nasional, 2022

Lembar Pengesahan

Panduan Kalibrasi Termometer Infrared SNSU PK.S-03:2022 diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional sebagai upaya untuk mengharmoniskan pelaksanaan kalibrasi termometer infrared 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 30 November 2022



Dr. Zakiyah
Plt. Deputi Bidang Standar Nasional Satuan Ukuran
Badan Standardisasi Nasional

Daftar Isi

	halaman
Penyusun dan Kontributor	1
Lembar Pengesahan	2
Daftar Isi	3
1. Pendahuluan	5
2. Ruang Lingkup	5
3. Prinsip Kalibrasi	5
4. Penggunaan	6
5. Peralatan	6
6. Pra Kalibrasi	12
7. Proses Kalibrasi	15
8. Analisa Data	15
8.1 Menghitung Koreksi	15
8.2 Persamaan Interpolasi	16
9. Sumber Ketidakpastian	18
Daftar Pustaka	28

1. Pendahuluan

- 1.1. Petunjuk teknis kalibrasi ini disusun untuk mengharmonisasikan pelaksanaan kalibrasi alat ukur suhu berupa termometer inframerah atau lebih populer disebut dengan termometer infrared dengan keluaran besaran suhu yang dilakukan oleh laboratorium yang menerapkan SNI ISO/IEC 17025:2017, tentang Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Laboratorium Kalibrasi.

2. Ruang Lingkup

- 2.1. Panduan ini ditujukan untuk alat elektronik yang digunakan dalam pengukuran suhu dengan mendeteksi intensitas radiasi termal yang dipancarkan oleh objek ukur dan diterima oleh sensor alat ukur;
- 2.2. Panduan ini menetapkan prosedur kalibrasi untuk termometer radiasi yang mengukur suhu di bawah 1000 °C pada panjang gelombang kerja di wilayah infrared, dan membaca langsung dalam suhu (*direct-reading in temperature*). Termometer radiasi ini populer dengan nama termometer infrared, dan selanjutnya pada dokumen ini akan disebut sebagai *Unit Under Test* (UUT);
- 2.3. Kalibrasi yang dilakukan menggunakan metode perbandingan antara penunjukan termometer infrared dengan penunjukan standar;
- 2.4. Panduan ini juga menetapkan prosedur evaluasi ketidakpastian pengukuran;
- 2.5. Panduan ini tidak mencakup termometer infrared di atas 1000 °C. Panduan ini juga tidak membahas penggunaan termometer infrared yang tidak menunjukkan suhu secara langsung;

3. Prinsip Kalibrasi

- 3.1. Pelaksanaan kalibrasi adalah dengan membandingkan suhu pembacaan termometer infrared dengan suhu pancaran sumber radiasi panas. Suhu pancaran radiasi panas sesuai dengan rentang spektral dari termometer infrared yang dikalibrasi.
- 3.2. Sumber radiasi panas dapat terdiri dari dua jenis. Idealnya, sumbernya adalah sumber rongga benda-hitam (*blackbody*) yang memiliki emisivitas mendekati satu ($\epsilon \approx 1,00$). Namun, karena bidang pandang (*field of view*) beberapa termometer infrared lebih besar daripada lubang rongga benda-hitam, maka sumber radiasi panas dengan bentuk pelat datar yang memiliki area luas dapat digunakan sebagai pengganti lubang

rongga benda-hitam. Dalam kedua kasus ini, ketertelusuran pengukuran suhu sumber radiasi termal harus diketahui, bersama dengan emisivitas dan ketidakpastian yang dihitung.

- 3.3. Suhu radiasi termal sumber harus tertelusur ke lembaga metrologi nasional seperti Laboratorium Standar Nasional Satuan Ukuran (SNSU) BSN di Indonesia, atau Lembaga metrologi nasional yang diakui lainnya, atau laboratorium kalibrasi yang sudah terakreditasi SNI ISO/IEC 17025:2017.

4. Penggunaan

- 4.1. Dokumen ini memberikan panduan untuk kalibrasi termometer infrared yang akurat, termasuk tata cara pengukuran dan perhitungan ketidakpastian. Panduan ini ditujukan agar pengguna mendapatkan metode yang konsisten, namun tetap fleksibel dalam memilih peralatan kalibrasi. Ketidakpastian yang diperoleh sebagian besar bergantung pada peralatan dan instrumentasi yang digunakan. Oleh karena itu, panduan ini memberikan instruksi rinci dalam evaluasi ketidakpastian untuk mengakomodasi berbagai peralatan dan alat bantu yang mungkin digunakan.
- 4.2. Panduan ini menentukan informasi yang diperlukan dalam menyusun laporan kalibrasi termometer infrared. Informasi-informasi tersebut dimaksudkan untuk membantu pengguna akhir agar dapat melakukan pengukuran yang akurat dan juga mendapatkan informasi yang cukup, sehingga hasil kalibrasi dapat direproduksi di laboratorium tersendiri.

5. Peralatan

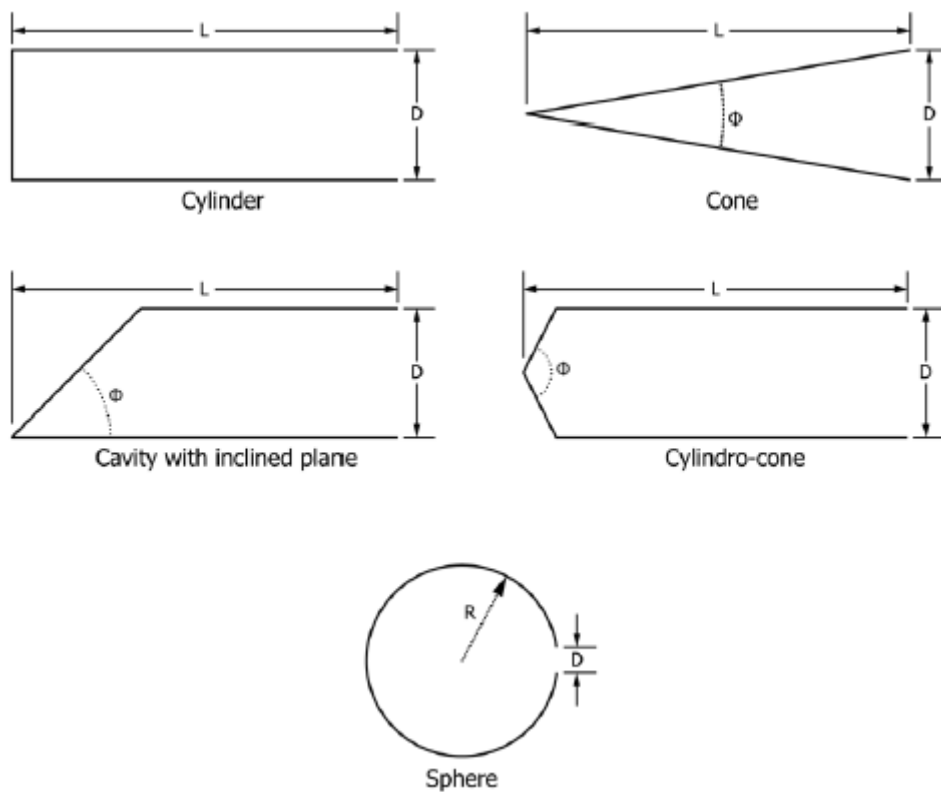
5.1. Sumber Radiasi termal (*Thermal Radiation Source*)

- 5.1.1. Ada dua kelas yang berbeda dari sumber radiasi termal yang dapat digunakan untuk kalibrasi termometer infrared; sumber rongga dan sumber pelat datar. Masing-masing sumber memiliki kelebihan dan kekurangan. Sumber rongga menyediakan sumber radiasi termal yang lebih dapat diprediksi emisivitasnya. Namun, sumber pelat datar biasanya dapat dibuat lebih murah, dan bisa dibuat dengan diameter besar yang cukup untuk mengkalibrasi termometer infrared dengan rasio jarak terhadap diameter sumber (*Distance to spot ratio* atau D:S) kecil.

5.1.2. Idealnya, informasi D:S rasio sumber radiasi termal harus ditentukan oleh produsen termometer infrared. Dalam banyak kasus, informasi ini mungkin tidak tersedia. Dalam kasus ini, uji bidang pandang (*field of view*) termometer harus dilakukan. Pengukuran uji bidang pandang termometer berada di luar cakupan standar ini. Radiasi termal yang berasal dari luar bidang pandang harus diperhitungkan dalam estimasi ketidakpastian yang dikenal dengan ketidakpastian efek ukuran sumber (*Size of Source Effect*).

5.1.3. Sumber Radiasi Termal Dengan Bentuk Rongga (Cavity Source)

5.1.3.1. Sebuah sumber radiasi termal dengan bentuk rongga atau disebut sumber rongga dapat dibangun dalam beberapa bentuk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Secara umum, rasio panjang terhadap diameter bukaan (*aperture*) (L:D) atau rasio jari-jari bola terhadap diameter bukaan (R:D) yang besar akan menghasilkan ketidakpastian yang lebih kecil. Sudut kerucut (Φ) yang lebih kecil juga akan menghasilkan ketidakpastian yang lebih kecil.



Gambar 1. Bentuk cavity source (ASTM E2847-14)

5.1.3.2. Lokasi probe acuan, probe sistem kendali suhu, nilai emisivitas, dan konduktivitas termal dinding rongga merupakan hal-hal yang harus diperhatikan dalam konstruksi sumber rongga. Secara umum, probe acuan atau probe kendali harus sedekat mungkin dengan pusat area dimana termometer infrared akan mengukur, biasanya di bagian dasar rongga. Jika ada pemisahan antara lokasi probe acuan dan

permukaan rongga, dinding rongga dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi akan menghasilkan ketidakpastian yang lebih kecil karena gradien suhu yang dihasilkan lebih kecil.

5.1.3.3. Emisivitas dinding rongga dapat ditingkatkan dengan beberapa cara berbeda. Yaitu dengan menggunakan bahan dengan emisivitas tinggi seperti keramik atau melapisinya dengan cat beremisivitas tinggi. Logam secara umum memiliki emisivitas rendah, namun dapat ditingkatkan dengan mengoksidasi permukaannya. Permukaan yang dicat atau keramik umumnya akan menghasilkan emisivitas yang lebih tinggi daripada permukaan logam yang teroksidasi.

5.1.3.4. Nilai emisivitas sumber panas idealnya disediakan oleh produsen alat. Dalam kasus tidak tersedia nilai tersebut maka nilai emisivitas harus dihitung. Perhitungan nilai emisivitas sumber panas diluar cakupan panduan ini.

5.1.4. Sumber Radiasi Termal Dengan Bentuk Pelat Datar (*Flatplate Source*)

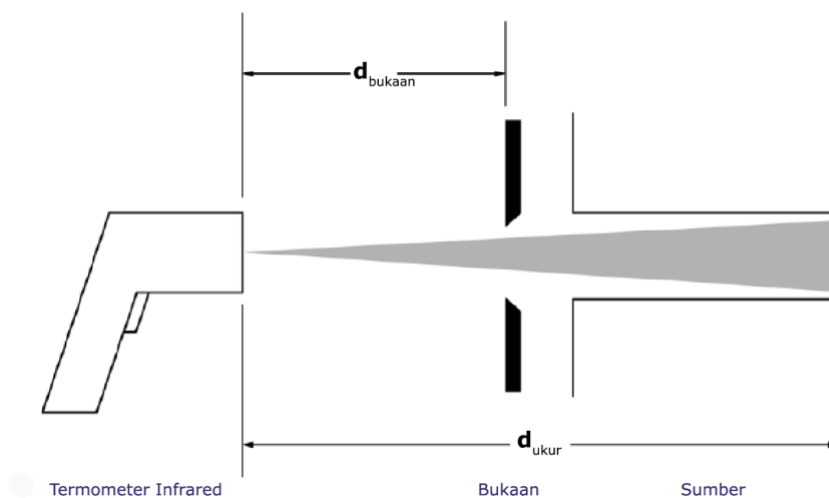
5.1.4.1. Sumber radiasi termal dengan bentuk pelat datar atau disebut sumber pelat datar adalah perangkat yang terdiri dari pelat bundar atau persegi panjang yang dicat. Penentuan nilai emisivitas pada sumber pelat datar cenderung kurang akurat dibanding dengan sumber rongga. Untuk itu lebih cocok dikalibrasi dengan transfer standar berupa termometer radiasi sebagaimana skema II pada gambar 3 di bagian 5.3.3. Namun, transfer standar yang digunakan harus memiliki panjang gelombang yang sama seperti termometer infrared yang diuji.

5.1.4.2. Sumber rongga adalah sumber radiasi termal yang lebih disarankan untuk kalibrasi termometer infrared. Sumber rongga memiliki dua keunggulan utama dibandingkan sumber pelat datar. Pertama, sumber rongga memiliki emisivitas yang lebih baik dimana dapat mendekati nilai satu dengan bentuk geometris tertentu. Kedua, karena nilai emisivitas mendekati satu, efek pantulan dari radiasi termal lingkungan menjadi berkurang. Selain nilai emisivitas, keseragaman suhu pada sumber pelat datar biasanya memberikan kontribusi kesalahan pengukuran lebih besar dibanding dengan sumber rongga. Namun, sumber pelat datar memiliki keunggulan utama dibandingkan sumber rongga, yaitu area ukur yang bisa jauh lebih besar daripada bukaan sumber rongga biasa, memungkinkan untuk pengukuran dengan rasio D:S yang jauh lebih kecil (atau bidang pandang lebih besar).

5.2. Bukaan (*Aperture*)

5.2.1. *Aperture* tambahan (Bukaan) kadang diperlukan pada setup kalibrasi, dipasang

didepan sumber radiasi termal, yang berguna untuk menghambat hamburan (*scatter*) cahaya dari lingkungan. Jika digunakan, suhu dari bukaan harus diperhatikan agar tidak menjadi sumber panas baru, dan harus memiliki emisivitas tinggi agar mengurangi pantulan cahaya dari sekitar. Bukaan harus digunakan jika direkomendasikan oleh produsen termometer infrared. Jika bukaan tambahan digunakan dalam proses kalibrasi, maka hal tersebut harus dinyatakan dalam laporan kalibrasi. Informasi yang harus disertakan adalah jarak bukaan, ukuran bukaan, dan jarak pengukuran. Konfigurasi yang memungkinkan untuk penggunaan bukaan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Contoh skema penggunaan bukaan

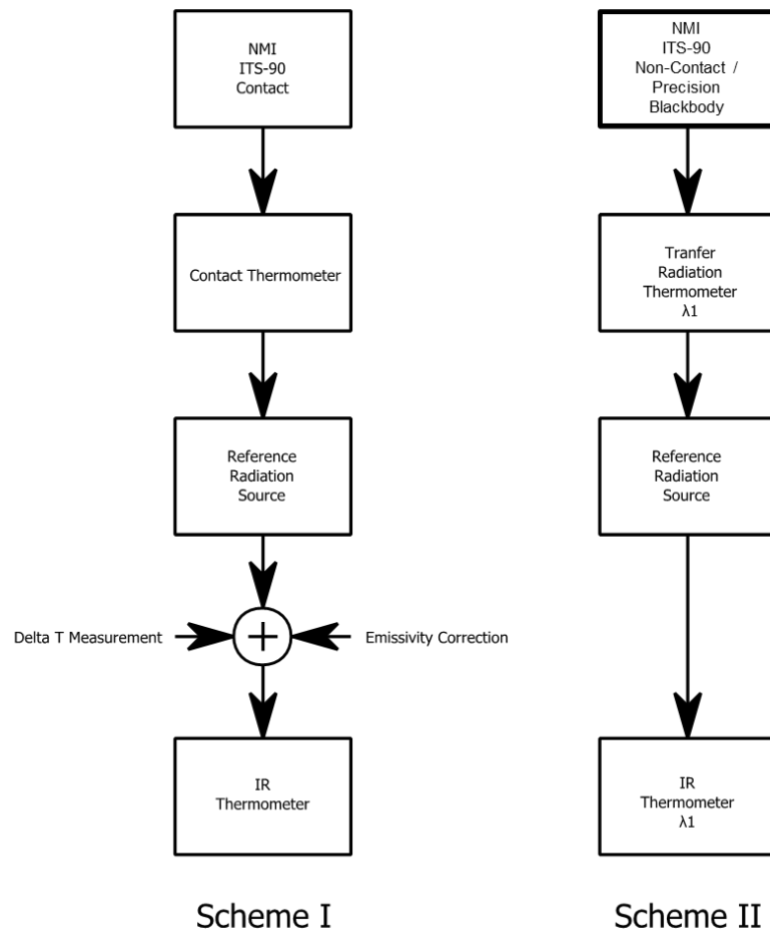
5.2.2. Pada Gambar 2, d_{bukaan} adalah jarak bukaan. Jarak pengukuran ditunjukkan oleh d_{ukur} .

5.3. Standar Transfer (*Transfer Standard*)

5.3.1. Sumber radiasi termal harus dikalibrasi dengan *transfer standard* yang tertelusur secara metrologis ke lembaga metrologi nasional seperti SNSU BSN, atau lembaga metrologi nasional di negara lain.

5.3.2. Kalibrasi sumber radiasi termal dapat dilakukan oleh laboratorium kalibrasi yang berkompeten. Interval kalibrasi dapat ditentukan oleh laboratorium kalibrasi, dengan memperhatikan ketidakpastian kalibrasi yang dapat muncul dikarenakan pergeseran nilai (*measurement drift*) dari sumber radiasi termal, ketika digunakan untuk kalibrasi termometer infrared.

5.3.3. Terlepas dari apakah sumber rongga atau sumber pelat datar digunakan, ada dua pendekatan untuk mengkalibrasi sumber: melalui skema kalibrasi kontak (Gambar 3, Skema I) dan skema kalibrasi radiometrik (Gambar 3, Skema II).



Gambar 3. Skema Ketertelusuran Kalibrasi Termometer Infrared (ASTM E2847-14)

5.3.4. Pada Gambar 3, panah menunjukkan jalur ketertelusuran ke Satuan Sistem Internasional (SI) melalui Lembaga Metrologi Nasional (NMI). Sumber radiasi termal acuan adalah sumber rongga atau sumber benda hitam yang digunakan untuk mengkalibrasi termometer infrared. Dalam Skema I, ditunjukkan bahwa pengukuran ΔT dan koreksi emisivitas harus ditambahkan ke dalam perhitungan suhu. Pengukuran ΔT didasarkan pada perbedaan suhu antara termometer acuan dengan dinding rongga. Koreksi emisivitas dihitung apabila sumber radiasi termal tidak memiliki emisivitas yang sama dengan pengaturan emisivitas termometer infrared. Simbol λ_1 mengacu pada panjang gelombang dan lebar pita (*bandwidth*) dari termometer radiasi transfer dan termometer infrared.

5.3.5. Dalam kedua skema tersebut, standar transfer tertelusur ke lembaga metrologi nasional.

5.3.6. Dalam Skema I, termometer kontak digunakan sebagai standar transfer. Salah satu

sumber ketidakpastian terbesar yang harus diperhatikan adalah dari ketidakpastian emisivitas. Hal ini terutama terjadi saat menggunakan sumber radiasi panas pelat datar.

5.3.7. Dalam Skema II, termometer radiasi digunakan sebagai standar transfer. Dalam skema ini, ketidakpastian dari emisivitas dan pertukaran panas sumber jauh lebih kecil dibandingkan dengan skema I. termometer radiasi harus beroperasi pada rentang spektral yang sama dengan termometer infrared yang akan dikalibrasi. Setiap perbedaan dalam rentang spektral akan menghasilkan ketidakpastian tambahan. Misalnya, jika sumber radiasi termal dikalibrasi dengan termometer radiasi 8 hingga 14 μm , sedangkan termometer infrared yang dikalibrasi memiliki respons spektral 7 hingga 14 μm , maka perbedaan lebar pita ini harus diperhitungkan dalam perhitungan ketidakpastian, karena suhu pancaran akan berbeda.

5.4. Alat Pemantau Kondisi Lingkungan

5.4.1. Suhu dan kelembapan lingkungan harus dipantau selama kalibrasi untuk memastikan bahwa suhu dan kelembapan lingkungan berada dalam batas laboratorium. Pemantauan ini harus dilakukan dengan menggunakan alat ukur yang telah dikalibrasi.

5.5. Perangkat Pemasangan (*Mounting Device*) Termometer

5.5.1. Termometer infrared dapat dipasang pada tripod atau perlengkapan pemasangan serupa. Tripod sangat berguna agar jarak dan sudut pengambilan kalibrasi tidak berubah-ubah yang dapat menyebabkan kesalahan pengambilan data.

5.6. Perangkat Pengukur Jarak

5.6.1. Jarak antara sumber radiasi termal dan termometer infrared merupakan faktor penting dalam kalibrasi. Jarak pengukuran harus ditetapkan sebelum kalibrasi sesuai dengan *distance to spot ratio* termometer infrared yang dikalibrasi. Jarak pengukuran ini bersama dengan ukuran target harus dicatat pada laporan kalibrasi.

5.7. Kalibrasi Di Bawah titik embun (*Dew-Point*) atau titik beku (*Frost-Point*)

5.7.1. Ketika kalibrasi dimana titik ukur sumber radiasi termal di bawah titik embun atau titik beku, untuk mencegah penumpukan es diperlukan pembersihan (*purging*) di sekitar permukaan/bukaan sumber panas dengan gas kering seperti nitrogen, udara kering, ataupun menggunakan vakum. Rekomendasi desain atau metode khusus untuk pembersihan (*purging*) di luar cakupan panduan ini.

6. Pra Kalibrasi

6.1. Rekaman Teknis

6.1.1. Pembuatan rekaman teknis UUT dilakukan sebelum proses pengukuran dan kalibrasi.

Rekaman tersebut mencakup 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;
- Data teknis lain jika diperlukan.

6.2. Pengecekan UUT pra kalibrasi

6.2.1. Termometer infrared memerlukan pengkondisian dan pengecekan sebelum dilakukan proses kalibrasi, berikut contoh langkah pra kalibrasi untuk sistem dengan acuan berupa termometer kontak:

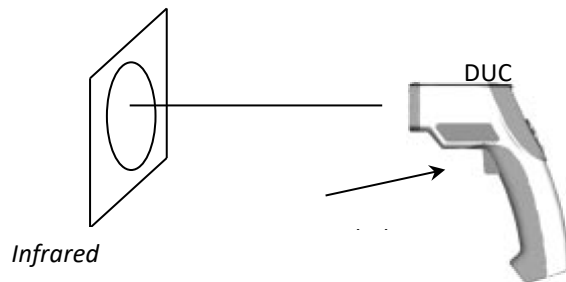
6.2.1.1. Periksa lensa objektif termometer yang sedang diuji (UUT). Jika lensa terkena debu atau minyak, bersihkan dengan hati-hati, dan hilangkan debu menggunakan blower udara. Setelah itu, bersihkan minyak menggunakan kertas tisu halus dan pembersih lensa (alkohol).

6.2.1.2. Jika UUT bertenaga baterai, periksa apakah baterai terisi daya, jika daya rendah, ganti dengan baterai baru.

6.2.1.3. Periksa fungsi UUT dalam mengukur radiasi termal dan fungsi tombol emisivitas:

- UUT diarahkan dan difokuskan pada permukaan tengah sumber radiasi termal, bisa berupa sumber benda hitam (*Variable Temperature Blackbody Source* atau VTBS).
- Nyalakan VTBS pada suhu sekitar 60°C.
- Tekan tombol *on/off* UUT, dan jika:
 - Tampilan UUT menunjukkan nilai suhu, hal ini menunjukkan bahwa UUT masih berfungsi dengan baik dalam mengukur radiasi termal,
 - Jika nilai emisivitas UUT diubah dengan menekan tombol emisivitas UUT dan suhu pada tampilan UUT juga berubah, hal ini menunjukkan bahwa tombol emisivitas UUT masih berfungsi dengan baik.
 - Jika UUT tidak memiliki tombol emisivitas, atau emisivitas UUT tetap, pengujian dilakukan dengan memvariasikan jarak UUT ke VTBS dan ketika

suhu pada tampilan UUT berubah maka ini menandakan UUT masih berfungsi dengan baik.

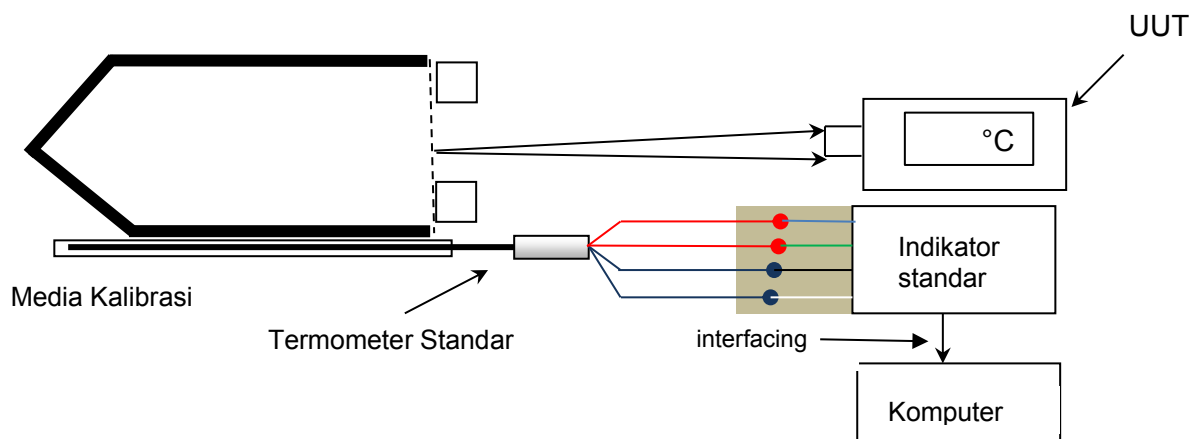


Gambar 4. Pemeriksaan pengukuran radiasi dari UUT



Gambar 5. Tombol kompensasi emisivitas dari UUT

6.2.1.4. Sebagai contoh, untuk sistem dengan termometer acuan berupa termometer kontak, atur sistem kalibrasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

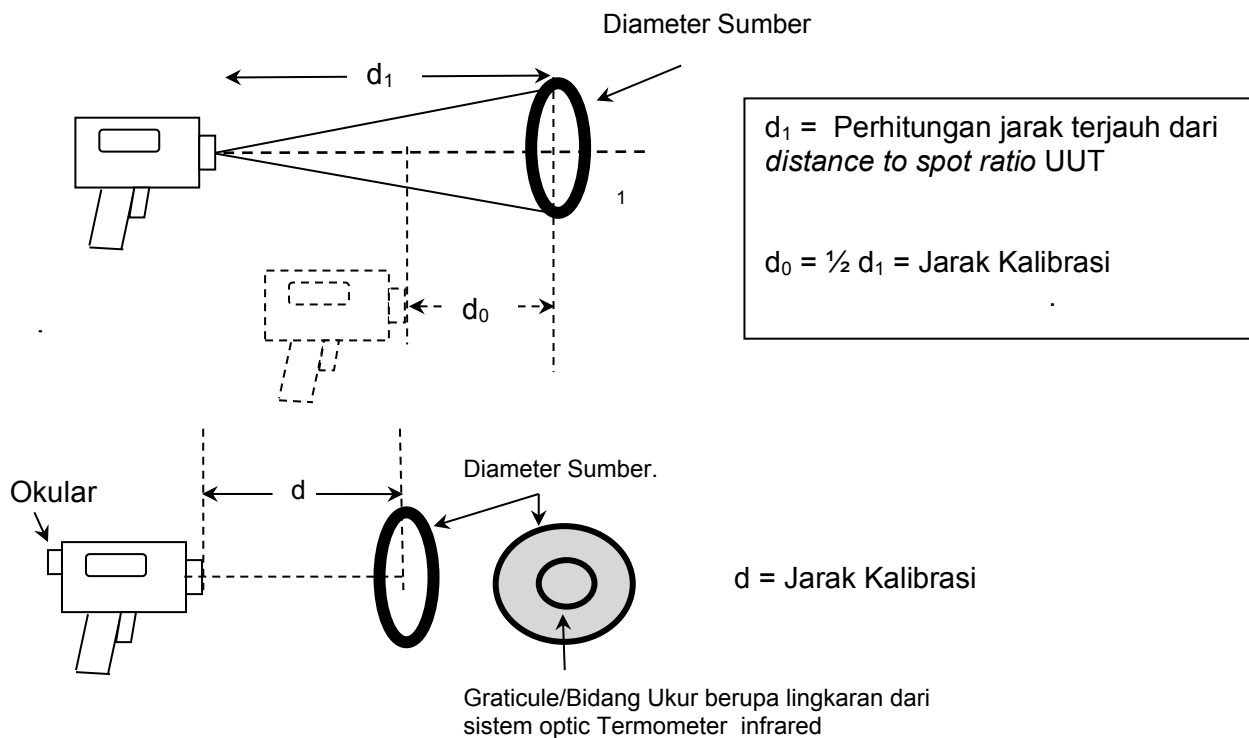


Gambar 6. Contoh Skema sistem kalibrasi.

6.2.1.5. Nyalakan komputer dan jalankan aplikasi/perangkat lunak untuk merekam data termometer standar yang digunakan.

6.2.1.6. Jika UUT memiliki fasilitas untuk pengaturan emisivitas, maka sesuaikan emisivitas UUT sama dengan emisivitas sumber radiasi termal.

6.2.1.7. Jika UUT memiliki lensa *ocular*/okular maka jarak kalibrasi ditetapkan dengan melihat melalui lensa okular. Jarak kalibrasi idealnya adalah saat *graticule*/bidang ukur berupa lingkaran di lensa okular setengah dari diameter sumber radiasi termal. Jika UUT tidak memiliki lensa okular maka jarak kalibrasi idealnya adalah setengah dari jarak terjauh perhitungan *distance to spot ratio* UUT. Penjelasan hal tersebut bisa dilihat di Gambar 7.



Gambar 7. Penempatan UUT di depan media kalibrasi

6.2.1.8. Periksa kesesuaian kondisi ruangan yang mencakup nilai suhu dan kelembapan dengan ketentuan yang telah ditetapkan Laboratorium.

7. Proses Kalibrasi

7.1. Berikut adalah langkah-langkah proses kalibrasi termometer infrared dengan acuan termometer kontak (skema I):

7.1.1. Set suhu media kalibrasi sesuai dengan titik dan rentang ukur yang diperlukan dimulai dari titik ukur suhu terendah.

- 7.1.2.** Catat tanggal kalibrasi, kondisi ruangan, emisivitas sumber radiasi termal, jarak kalibrasi, set-point dan identitas UUT (nama, pabrik, jenis UUT, nomor seri, Faktor Jarak, emisivitas dan respon spektral).
- 7.1.3.** Pengaturan emisivitas termometer infrared harus sama dengan pengaturan emisivitas sumber radiasi termal. Beberapa termometer infrared tidak memiliki pengaturan emisivitas. Apabila kedua emissivitas tidak dapat diubah dan tidak sama, koreksi emisivitas secara matematis harus dilakukan.
- 7.1.4.** Setelah suhu VTBS stabil, maka lakukan pengukuran sebagai berikut,
- Catat output standar termometer
 - Catat suhu radiasi termal yang ditampilkan pada indikator suhu UUT
- Tentukan jumlah pengulangan data pengukuran agar tidak kurang dari 5 kali pengulangan. Lebih banyak jumlah pengukuran dapat memperkecil kontribusi terhadap ketidakpastian.
- 7.1.5.** Naikkan suhu VTBS untuk titik kalibrasi berikutnya dengan menggunakan seting kontrol pada suhu VTBS.
- 7.1.6.** Lakukan langkah 7.1.1 sampai 7.1.5 sampai titik kalibrasi tertinggi
- 7.1.7.** Setelah kalibrasi selesai, atur benda hitam pada suhu ruangan dan matikan setelah mencapai suhu tersebut.
- 7.1.8.** Catat kondisi ruangan.

8. Analisa Data

8.1. Menghitung Koreksi

- 8.1.1.** Berikut contoh analisa data pada sistem yang menggunakan sumber suhu variabel benda hitam (*Variable Temperature Blackbody Source* atau VTBS) dengan diameter bukaan 65 mm dan Semi Standard Platinum Resistance Thermometer (Pt-100) sebagai termometer standar (ST). Di semua titik ukur kalibrasi, termometer standar diletakan pada lubang sesuai Gambar 6.
- 8.1.2.** Penentuan pembacaan UUT yang diharapkan, t_{exp} , dengan menggunakan hasil pengukuran ST, pengaturan emisivitas UUT, emisivitas benda hitam, suhu ruang dan suhu detektor UUT, adalah sebagai berikut: ,

$$S_{TUT}(T_{exp}) = \frac{\varepsilon_{bb}S_{TUT}(T_{bb}) + (1 - \varepsilon_{bb})S_{TUT}(T_{amb}) - (1 - \varepsilon_{TUT})S_{TUT}(T_d)}{\varepsilon_{TUT}} \quad (1)$$

dimana

ε_{bb} = emisivitas benda hitam,

ε_{TUT} = emisivitas UUT

T_{bb} = suhu benda hitam,

$$S_{TUT}(T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{TUT}T + B_{TUT}}\right) - 1} \quad (2)$$

A, dan B adalah parameter yang terkait dengan responsivitas spektral termometer yang diuji (UUT), dan c_2 adalah konstanta radiasi kedua.

8.2. Persamaan Interpolasi

8.2.1. Dalam banyak kasus, persamaan interpolasi diperlukan untuk mengestimasi koreksi pembacaan UUT pada titik-titik ukur yang tidak dikalibrasi. Misalnya pada Tabel 1, suhu 50 °C, 75 °C, 100 °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.

Tabel 1. Data Hasil Kalibrasi

Koreksi, °C	t, °C
1.08193071	49.20
1.92213197	73.26
2.88123131	97.20
4.09435785	120.80
4.48789792	145.30
5.52264050	169.10
4.84730520	194.54
5.30391745	218.94
6.72856496	242.30
6.72423263	267.10
7.12167276	291.56

8.2.2. Berikut secara umum langkah-langkah dalam menentukan persamaan interpolasi:

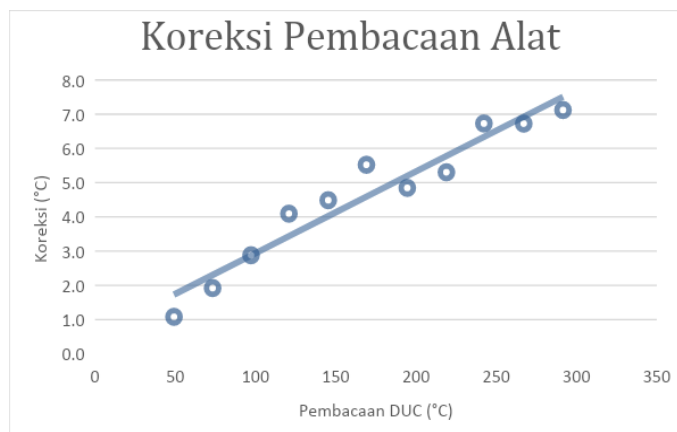
8.2.1. Tentukan model persamaan interpolasi, umumnya persamaan *polynomial* pangkat 3 atau lebih rendah (tergantung kualitas dari *curve fitting* yang dihasilkan), persamaannya adalah sebagai berikut:

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

8.2.2. 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:

$$K = a_1 \times t_{UUT} + a_2 \times t_{UUT}^2 + a_3 \times t_{UUT}^3 \quad (4)$$

- 8.2.3.** 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.
- 8.2.4.** Ketidakpastian akibat kesalahan pada interpolasi (*interpolation error*) dapat dievaluasi sebagai ketidakpastian Tipe A. Untuk dapat dievaluasi sebagai Tipe A, jumlah pengukuran/titik ukur (N) sekurangnya 2 kali lebih banyak dari jumlah koefisien (k) yang akan dihitung ($N \geq k \times 2$). Dalam kasus jumlah titik ukur tidak terpenuhi ($N < k \times 2$).
- 8.2.5.** Untuk menyelesaikan persamaan polinomial 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 atau *standard errors* (SE), derajat kebebasan atau *degree of freedom* (ν), dan parameter statistik lainnya. Gambar 8 menampilkan contoh kasus bagaimana persamaan interpolasi dilakukan pada hasil pengukuran.



Gambar 8. Data kalibrasi dan persamaan interpolasi polinomial pangkat 3

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

- $a_0 = -2.4357 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $a_1 = 0.082835886$
- $a_2 = -0.000315255 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- $a_3 = 4.96548\text{E-}07 \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$
- $SE = 0.48 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $\nu = 7$

9. Sumber Ketidakpastian

9.1. Ringkasan

9.1.1. Biasanya, sumber ketidakpastian yang paling umum dalam metode kalibrasi termometer infrared adalah: (1) estimasi emisivitas sumber kalibrasi, (2) ukuran sumber termometer infrared, (3) gradien suhu pada sumber radiasi termal, (4) Kurang tepatnya *alignment* (penjajaran posisi) termometer infrared terhadap sumber radiasi termal, (5) suhu kalibrasi sumber radiasi termal, (6) suhu lingkungan sekitar dan (7) suhu yang dipantulkan. Urutan prevalensi ketidakpastian ini dapat bervariasi, tergantung pada penggunaan prosedur yang tepat dan jenis sumber radiasi termal yang digunakan. Kontribusi ketidakpastian ini dapat berubah secara signifikan dalam perhitungan ketidakpastian secara keseluruhan tergantung pada suhu sumber radiasi termal, metode kalibrasi sumber radiasi termal, karakteristik optik, karakteristik detektor dan filter termometer infrared. Ketidakpastian utama dalam panduan ini tercantum dalam Tabel 2.

Tabel 2 Beberapa Komponen utama ketidakpastian

Tanda	Komponen Ketidakpastian
Ketidakpastian Sumber Radiasi Termal:	
U1	Suhu Kalibrasi
U2	Emisivitas Sumber
U3	Radiasi Lingkungan yang Dipantulkan
U4	Pertukaran Panas Sumber
U5	Kondisi Lingkungan
U6	Keseragaman Sumber
Ketidakpastian Infrared Termometer:	
U7	<i>Size-of-Source Effect</i>
U8	Suhu Lingkungan
U9	<i>Atmospheric Absorption</i>
U10	<i>Noise</i>
U11	Resolusi Alat

9.1.2. Komponen Ketidakpastian

9.1.3. 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. Meskipun berada diluar cakupan dokumen ini untuk menyediakan pengujian dan metode untuk menentukan setiap elemen ketidakpastian, format yang dijabarkan disini sudah memberikan kerangka dasar untuk perhitungan ketidakpastian. Setiap perhitungan ketidakpastian pengukuran juga harus mengikuti pedoman perhitungan ketidakpastian lain seperti “*U.S. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*” atau “*Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*”.

9.2. Persamaan Pengukuran

9.2.1. Persamaan pengukuran ditunjukkan pada Persamaan 5. Ketidakpastian pada suhu kalibrasi diperhitungkan dengan mengevaluasi T_s . Ketidakpastian karena radiasi *ambien*/lingkungan yang dipantulkan diperhitungkan dengan mengevaluasi $S(T_w)$. Efek ketidakpastian karena emisivitas sumber diperhitungkan dengan mengevaluasi ϵ_s .

$$S(T_{MEAS}) = S(T_s) + \frac{(1 - \epsilon_{ins})}{\epsilon_{ins}} [S(T_w) - S(T_d)] + \frac{(\epsilon_s(\lambda) - \epsilon_{ins})}{\epsilon_{ins}} [S(T_s) - S(T_w)] \quad (5)$$

dimana:

$S(T)$ = implementasi Persamaan Sakuma-Hattori

ϵ_s = emisivitas permukaan yang diukur

ϵ_{ins} = pengaturan emisivitas instrumen

T_{MEAS} = suhu pembacaan termometer infrared

T_s = suhu radiasi yang diharapkan dari sumber radiasi termal

T_w = suhu radiasi yang dipantulkan (dinding)

T_d = suhu detektor

9.2.2. Ketidakpastian karena Suhu Terpantul (*Reflected Temperature*)

9.2.2.1. Untuk mengevaluasi ketidakpastian suhu pantul, Persamaan 5 diturunkan untuk mendapatkan Persamaan 6. Nilai ini kemudian digunakan dalam Persamaan 7 untuk mendapatkan ketidakpastian pengukuran suhu akibat suhu yang terpantul U_{REFL} .

$$\frac{\partial S(T_{meas})}{\partial S(T_w)} = \frac{1 - \epsilon_s}{\epsilon_{instr}} \quad (6)$$

$$U_{REFL}(T_{meas}) = \frac{\partial T_{meas}}{\partial T}(T_w) = \frac{\partial S(T_{meas})}{\partial S(T_w)} \frac{\frac{\partial S(T_w)}{\partial T}}{\frac{\partial S(T_{meas})}{\partial T}} U(T_w) \quad (7)$$

9.2.3. Ketidakpastian karena Emisivitas

9.2.3.1. Untuk mengevaluasi ketidakpastian emisivitas sumber, Persamaan 5 diturunkan sehingga mendapatkan Persamaan 8. Nilai dari persamaan tersebut kemudian digunakan dalam Persamaan 9 untuk mendapatkan ketidakpastian dalam besaran suhu dikarenakan emisivitas sumber.

$$\frac{\partial S(T_{meas})}{\partial \epsilon_s} = \frac{1}{\epsilon_{instr}} [S(T_s) - S(T_w)] \quad (8)$$

$$U_{\epsilon}(T_{meas}) = \frac{\partial T_{meas}}{\partial \epsilon_s} U(\epsilon_s) = \frac{\frac{\partial S(T_{meas})}{\partial \epsilon_s}}{\frac{\partial S(T_{meas})}{\partial T}} U(\epsilon_s) \quad (9)$$

9.3. Ketidakpastian Terkait Sumber Radiasi Termal

9.3.1. Ketidakpastian yang dijabarkan di 9.4-9.12 berhubungan dengan sumber radiasi termal

9.4. Suhu Kalibrasi

9.4.1. Dalam Skema I, ini adalah ketidakpastian pembacaan suhu yang ditentukan oleh ketertelusuran termometer kontak (U_{Texp} dibahas lengkap di bagian 9.5). Dalam Skema II, ini adalah ketidakpastian pembacaan suhu pancaran sebagaimana ditentukan oleh ketertelusuran radiometrik.

9.5. u_{Texp} (termometer kontak sebagai *reference*)

9.5.1. Penentuan u_{Texp}

$$\begin{aligned} S(T_{meas}) &= \frac{\epsilon_{bb}S(T_{bb}) + (1 - \epsilon_{bb})S(T_{amb}) - (1 - \epsilon_{inst})S(T_{det})}{\epsilon_{inst}} \\ &= S(T_{bb}) + \frac{(1 - \epsilon_{inst})}{\epsilon_{inst}} [S(T_{amb}) - S(T_{det})] + \frac{(\epsilon_{bb} - \epsilon_{inst})}{\epsilon_{inst}} [S(T_{bb}) - S(T_{amb})] \quad (10) \end{aligned}$$

Dengan demikian, suhu yang diukur hanya akan sama dengan suhu sumber radiasi termal ketika ($T_{amb}=T_{det}$ atau $\mathcal{E}_{instr} = 1$) dan ($T_{bb} = T_{amb}$ atau $\mathcal{E}_{instr} = \mathcal{E}_{bb}$). Meskipun ada beberapa situasi dimana kedua kondisi ini dapat dipenuhi, secara umum suhu yang diukur oleh termometer radiasi tidak sesuai dengan suhu sumber radiasi termal. Jadi, untuk membandingkan pembacaan termometer dengan termometer acuan, "koreksi sumber radiasi termal" perlu diterapkan. Koreksi ini berbeda berdasarkan jenis termometer acuan, termometer acuan ini bisa berupa termometer kontak atau termometer radiasi.

Ketika kalibrasi dilakukan dengan menggunakan termometer kontak sebagai acuan, suhu benda hitam T_{bb} diberikan langsung oleh pembacaan termometer acuan, T_{ref} , dengan asumsi tidak ada gradien suhu antara termometer acuan dan permukaan radiasi, atau bahwa setiap gradien tersebut telah dikoreksi. Jadi, pembacaan yang diharapkan, T_{exp} , pada perangkat di bawah kalibrasi (UUT).

$$S(T_{exp}) = \frac{\mathcal{E}_{bb}S(T_{ref}) + (1 - \mathcal{E}_{bb})S(T_{amb}) - (1 - \mathcal{E}_{instr})S(T_{det})}{\mathcal{E}_{inst}} \quad (11)$$

dan pembacaan sebenarnya pada UUT harus dibandingkan dengan T_{exp} , bukan T_{ref} . Karena T_{exp} hanya akan sama dengan T_{ref} dalam kondisi spesifik yang diberikan setelah persamaan (11). Setara dengan itu, koreksi benda hitam $\Delta T_{bb} = T_{exp} - T_{ref}$ harus diterapkan pada pembacaan termometer acuan sebelum membuat perbandingan dengan UUT.

Ketidakpastian nilai T_{exp} timbul dari ketidakpastian besaran yang muncul pada persamaan (7): nilai terukur T_{ref} dan T_{amb} , dan nilai taksiran T_{det} dan \mathcal{E}_{bb} . Selain itu, ketidakpastian muncul dari asumsi nilai A dan B, yang menentukan fungsi S(T). Perhatikan bahwa karena hampir semua termometer radiasi modern memiliki pengaturan emisivitas instrumental digital, dan koreksi emisivitas diterapkan oleh algoritma internal, tidak ada ketidakpastian yang timbul dari nilai \mathcal{E}_{instr} yang telah ditetapkan.

Untuk beberapa sumber radiasi termal pelat datar, tampilan suhu disesuaikan dalam istilah "suhu radiometrik", dengan mempertimbangkan emisivitas pelat dan pantulan sekitar, sehingga tampilan menunjukkan pembacaan UUT yang diharapkan (yaitu, koreksi benda hitam yang ditunjukkan oleh persamaan (10) telah, pada dasarnya, dibangun ke dalam sumber radiasi termal). Analisis ketidakpastian yang dijelaskan disini juga berlaku untuk perangkat ini, tetapi beberapa asumsi mungkin harus dibuat tentang nilai beberapa ketidakpastian jika tidak tersedia dari pabrikan.

Koefisien sensitivitas untuk masing-masing komponen ketidakpastian dapat ditentukan dengan diferensiasi implisit dari persamaan (10). Jika pertama kita mendefinisikan fungsi $P(T)$, sehingga:

$$P(T) = 1 - \exp\left(\frac{-c_2}{AT + B}\right) \quad (12)$$

maka koefisien sensitivitasnya adalah:

$$\frac{\partial T_{exp}}{\partial \varepsilon_{bb}} = \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial \varepsilon_{bb}} / \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial T_{exp}} = \frac{(AT_{exp} + B)^2 [S(T_{ref}) - S(T_{amb})] P(T_{exp})}{\varepsilon_{instr} c_2 AS(T_{exp})},$$

$$\frac{\partial T_{exp}}{\partial T_{ref}} = \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{ref})} \cdot \frac{\partial S(T_{ref})}{\partial T_{ref}} / \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial T_{exp}} = \frac{\varepsilon_{bb} (AT_{exp} + B)^2 S(T_{ref}) P(T_{exp})}{\varepsilon_{instr} (AT_{ref} + B)^2 S(T_{exp}) P(T_{ref})},$$

$$\frac{\partial T_{exp}}{\partial T_{amb}} = \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{amb})} \cdot \frac{\partial S(T_{ref})}{\partial T_{amb}} / \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial T_{exp}} = \frac{(1 - \varepsilon_{bb}) (AT_{exp} + B)^2 S(T_{amb}) P(T_{exp})}{\varepsilon_{instr} (AT_{amb} + B)^2 S(T_{exp}) P(T_{amb})},$$

$$\frac{\partial T_{exp}}{\partial T_{det}} = \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{det})} \cdot \frac{\partial S(T_{ref})}{\partial T_{det}} / \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial T_{exp}} = \frac{(1 - \varepsilon_{bb}) (AT_{exp} + B)^2 S(T_{det}) P(T_{exp})}{\varepsilon_{instr} (AT_{det} + B)^2 S(T_{exp}) P(T_{det})},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{exp}}{\partial A} &= \left[\frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{ref})} \cdot \frac{\partial S(T_{ref})}{\partial A} + \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{amb})} \cdot \frac{\partial S(T_{amb})}{\partial A} + \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{det})} \cdot \frac{\partial S(T_{det})}{\partial A} \right] / \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial T_{exp}} \\ &= \frac{(AT_{exp} + B)^2 P(T_{exp})}{\varepsilon_{instr} AS(T_{exp})} \left[\frac{\varepsilon_{bb} S(T_{ref}) T_{ref}}{(AT_{ref} + B)^2 P(T_{ref})} + \frac{(1 - \varepsilon_{bb}) S(T_{amb}) T_{amb}}{(AT_{amb} + B)^2 P(T_{amb})} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1 - \varepsilon_{instr}) S(T_{det}) T_{det}}{(AT_{det} + B)^2 P(T_{det})} \right] - \frac{T_{exp}}{A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{exp}}{\partial B} &= \left[\frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{ref})} \cdot \frac{\partial S(T_{ref})}{\partial B} + \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{amb})} \cdot \frac{\partial S(T_{amb})}{\partial B} + \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial S(T_{det})} \cdot \frac{\partial S(T_{det})}{\partial B} \right] / \frac{\partial S(T_{exp})}{\partial T_{exp}} \\ &= \frac{(AT_{exp} + B)^2 P(T_{exp})}{\varepsilon_{instr} AS(T_{exp})} \left[\frac{\varepsilon_{bb} S(T_{ref}) T_{ref}}{(AT_{ref} + B)^2 P(T_{ref})} + \frac{(1 - \varepsilon_{bb}) S(T_{amb}) T_{amb}}{(AT_{amb} + B)^2 P(T_{amb})} \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1 - \varepsilon_{instr}) S(T_{det}) T_{det}}{(AT_{det} + B)^2 P(T_{det})} \right] - \frac{1}{A} \end{aligned}$$

Ketidakpastian gabungan dalam nilai T_{exp} yang dihitung adalah

$$\begin{aligned} u(T_{exp}) &= \left[\left(\frac{\partial T_{exp}}{\partial \varepsilon_{bb}} u(\varepsilon_{bb}) \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{exp}}{\partial T_{ref}} u(T_{ref}) \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{exp}}{\partial T_{amb}} u(T_{amb}) \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{exp}}{\partial T_{det}} u(T_{det}) \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial T_{exp}}{\partial A} u(A) \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{exp}}{\partial B} u(B) \right)^2 + 2R_{A,B} \frac{\partial T_{exp}}{\partial A} \frac{\partial T_{exp}}{\partial B} u(A) u(B) \right]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Untuk suhu rendah, persamaannya bisa kita sederhanakan sebagai berikut:

$$S_{TUT}(T_{exp}) = S_{UUT}(T_{bb}) + \left[\frac{(\varepsilon_{bb} - \varepsilon_{UUT})}{\varepsilon_{UUT}} \cdot (S_{UUT}(T_{bb}) - S_{UUT}(T_{amb})) \right] \quad (13)$$

$$S_{TUT}(T_{exp}) = \left[\frac{(\varepsilon_{bb})}{\varepsilon_{UUT}} S_{UUT}(T_{bb}) + \frac{(1 - \varepsilon_{bb})}{\varepsilon_{UUT}} S_{UUT}(T_{amb}) \right] \quad (14)$$

$$\frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{tut}T_{exp} - B_{tut}}\right) - 1} = \frac{\varepsilon_{bb}}{\varepsilon_{tut}} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{tut}T_{exp} - B_{tut}}\right) - 1} + \frac{1 - \varepsilon_{bb}}{\varepsilon_{tut}} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{A_{tut}T_{exp} - B_{tut}}\right) - 1}$$

Persamaan $u(T_{exp})$ diturunkan secara implisit dan diperoleh:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{exp}}{\partial T_{bb}} &= \frac{\varepsilon_{bb}}{\varepsilon_{uut}} \left[\frac{\ln\left\{\frac{S_{tut}(T_{bb}) + 1}{S_{tut}(T_{bb})}\right\}}{\ln\left\{\frac{S_{tut}(T_{exp}) + 1}{S_{tut}(T_{exp})}\right\}} \right]^2 \frac{S_{tut}(T_{bb})}{S_{tut}(T_{exp})} \frac{S_{tut}(T_{bb}) + 1}{S_{tut}(T_{exp}) + 1} \\ \partial T_{exp1} &= \frac{\varepsilon_{bb}}{\varepsilon_{uut}} \left[\frac{\ln\left\{\frac{S_{tut}(T_{bb}) + 1}{S_{tut}(T_{bb})}\right\}}{\ln\left\{\frac{S_{tut}(T_{exp}) + 1}{S_{tut}(T_{exp})}\right\}} \right]^2 \frac{S_{tut}(T_{bb})}{S_{tut}(T_{exp})} \frac{S_{tut}(T_{bb}) + 1}{S_{tut}(T_{exp}) + 1} \partial T_{bb} \\ \frac{\partial T_{exp}}{\partial T_{amb}} &= \frac{(1 - \varepsilon_{bb})}{\varepsilon_{uut}} \left[\frac{\ln\left\{\frac{S_{tut}(T_{amb}) + 1}{S_{tut}(T_{amb})}\right\}}{\ln\left\{\frac{S_{tut}(T_{exp}) + 1}{S_{tut}(T_{exp})}\right\}} \right]^2 \frac{S_{tut}(T_{amb})}{S_{tut}(T_{exp})} \frac{S_{tut}(T_{amb}) + 1}{S_{tut}(T_{exp}) + 1} \\ \partial T_{exp2} &= \frac{(1 - \varepsilon_{bb})}{\varepsilon_{uut}} \left[\frac{\ln\left\{\frac{S_{tut}(T_{amb}) + 1}{S_{tut}(T_{amb})}\right\}}{\ln\left\{\frac{S_{tut}(T_{exp}) + 1}{S_{tut}(T_{exp})}\right\}} \right]^2 \frac{S_{tut}(T_{amb})}{S_{tut}(T_{exp})} \frac{S_{tut}(T_{amb}) + 1}{S_{tut}(T_{exp}) + 1} \partial T_{amb} \quad (16) \end{aligned}$$

Nilai $u_{T_{exp}}$ diperoleh dengan menyelesaikan Persamaan $u_{T_{exp}} = \text{sqrt}(u_{T_{exp1}}^2 + u_{T_{exp2}}^2)$

9.6. Drift

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

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

9.7. Emisivitas Sumber

- 9.7.1. Skema kalibrasi I - sumber pelat datar. Dalam hal ini, emisivitas permukaan ditentukan oleh beberapa metode khusus atau perbandingan radiometrik. Metode pengujian untuk menentukan emisivitas tidak masuk dalam lingkup panduan ini.
- 9.7.2. Skema kalibrasi I - sumber rongga. Dalam Skema Kalibrasi I dengan sumber rongga, emisivitas dapat dihitung dengan pemodelan, atau dengan ketidakpastian emisivitas yang disediakan oleh pabrikan sumber.
- 9.7.3. Skema kalibrasi II. Untuk Skema Kalibrasi II, emisivitas mungkin masih bervariasi dari waktu ke waktu atau bergantung pada *bandwidth* spektral. Namun, ketidakpastian ini berkurang secara signifikan dibandingkan dengan yang ada di Skema I.

9.8. Radiasi Lingkungan yang Dipantulkan (*Reflected Ambient Radiation*)

- 9.8.1. Radiasi yang dipantulkan kadang-kadang disebut sebagai radiasi latar (*background radiation*). Penyebab efeknya kadang-kadang disebut sebagai *background temperature*. Ketidakpastian ini menjadi sesuatu yang harus lebih diperhatikan ketika mengkalibrasi instrumen dengan sumber pelat datar daripada dengan sumber rongga. Ketidakpastian ini juga menjadi sesuatu yang harus diperhatikan ketika mengukur objek pada suhu di bawah suhu ruang.

9.9. Pertukaran Panas Sumber:

- 9.9.1. Pertukaran panas sumber adalah ketidakpastian karena perbedaan antara sensor kontrol sumber atau suhu pembacaan dengan suhu permukaan sumber yang sebenarnya. Ketidakpastian ini disebabkan oleh aliran panas antara lokasi sensor dan permukaan sumber. Jika sumber pelat datar dikalibrasi dengan radiometrik (skema II), ketidakpastian ini dapat diminimalkan.

9.10. Kondisi Lingkungan:

- 9.10.1. Ketidakpastian kondisi lingkungan dikarenakan oleh pengaruh faktor konveksi, meskipun faktor lain mungkin berperan. Untuk sumber pelat datar, efek konveksi minimal. Untuk sumber rongga, efek konveksi seharusnya lebih kecil. Namun, jika sumber udara paksa (*source of forced air*) dekat dengan sumbernya, ketidakpastian ini mungkin lebih menjadi masalah. Pada dasarnya, ketika sumber udara paksa ditempatkan dekat dengan permukaan, pola keseragaman permukaan dapat berubah. Ini mungkin merupakan ketidakpastian yang sangat sulit untuk ditentukan. Kondisi aliran udara harus diperbesar untuk mendapatkan gambaran yang benar tentang efek ini.

9.11. Keseragaman Suhu Sumber

- 9.11.1. Ketidakpastian keseragaman sumber adalah ketidakpastian karena suhu non-

homogenitas pada permukaan sumber radiasi termal. Karena termometer infrared menghitung rata-rata suhu didalam bidang pandangnya, ketidakpastian ini dihitung dengan mempertimbangkan seberapa besar keseragaman akan menyebabkan perbedaan pengukuran antara pengukuran titik kecil di pusat sumber dan titik yang lebih besar sesuai dengan termometer infrared yang sedang diuji.

9.11.2. 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:

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

9.12. Kestabilan Suhu Sumber

9.12.1. 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:

$$u_{STB} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times \Delta T_{STB}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

9.13. Ketidakpastian Terkait Termometer infrared:

9.13.1. Ketidakpastian yang dijabarkan di **9.14-9.20** berhubungan dengan termometer infrared yang dikalibrasi

9.14. Efek Ukuran Sumber (*Size-of-Source Effect*)

9.14.1. Ketidakpastian efek ukuran sumber (SSE) disebabkan oleh setiap radiasi yang diukur dari sumber atau sekitarnya yang tidak diperhitungkan oleh ketidakpastian keseragaman sumber di 9.12. Sebagian besar efek ketidakpastian SSE disebabkan oleh hamburan optik. Ketidakpastian ini akan menjadi besar jika diameter sumber lebih kecil dari bidang pandang termometer infrared. Pengaruh SSE dapat dikarakterisasi dengan mengubah-ubah jarak ukur thermometer radiasi terhadap sumber radiasi termal dan menggambarkannya dalam suatu grafik perubahan nilai thermometer infrared terhadap sudut pandang terhadap sumber, dimana sudut pandang tersebut merupakan rasio antara jarak ukur dan diameter sumber. Sehingga koreksi karena SSE dapat diberikan berdasarkan kurva yang telah dibuat tersebut. Namun untuk kepraktisan, SSE dapat dijadikan sebagai sumber ketidakpastian. Untuk mengukur ketidakpastian karena SSE dapat dilakukan dengan melihat perubahan hasil pengukuran UUT ketika mengukur pada jarak kalibrasi (d_0) sebagaimana dijelaskan pada 6.2.1.7, dibandingkan dengan pengukuran pada jarak $d_0/2$. Setengah dari

perbedaan nilai hasil pengukuran di kedua posisi tersebut dijadikan estimasi untuk ketidakpastian karena SSE dengan distribusi kotak (rectangular).

9.15. Suhu Lingkungan

9.15.1. Suhu lingkungan adalah ketidakpastian yang terkait dengan seberapa baik suhu detektor memperhitungkan perubahan suhu lingkungan yang dipantulkan. Termometer infrared yang sedang diuji harus diberi waktu yang cukup untuk mencapai suhu stabil. Ini sangat penting setelah termometer infrared dimasukkan ke dalam lingkungan baru. Pengaruh suhu lingkungan dan perubahan suhu detektor pada pengukuran radiometrik harus ditentukan untuk setiap model khusus termometer infrared yang diuji.

9.16. Penyerapan Atmosfer

9.16.1. Ketidakpastian yang terkait dengan penyerapan atmosfer biasanya sangat rendah. Bagaimanapun, mereka harus diperhitungkan. Perhitungan yang diuraikan dalam standar ini didasarkan pada dokumen *Bureau international des poids et mesures (BIPM)*.

9.17. Gangguan Sinyal (*Noise Signal*)

9.17.1. Kebisingan/gangguan sinyal (*Noise Signal*) adalah sinyal yang tidak diinginkan yang dialami oleh sistem pengukuran termometer infrared. Sumber *noise* dapat berasal dari sumber listrik dan fisik. Ketidakpastian ini dapat diambil dari spesifikasi termometer infrared atau ditentukan dengan eksperimen.

9.18. Resolusi tampilan

9.18.1. Ketidakpastian resolusi adalah kontribusi ketidakpastian karena kesalahan kuantisasi pembacaan termometer infrared.

9.18.2. Untuk menghitung ketidakpastian resolusi tampilan, ambil resolusi tampilan dan bagi dua. Hasil ini memiliki distribusi persegi panjang. Gunakan praktek standar untuk menentukan ketidakpastian yang diperluas dari distribusi persegi panjang. Ketidakpastian akibat keterbatasan daya baca atau resolusi (R) indikator UUT (u_{RES}) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$u_{RES} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{1/2 \times R}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

9.19. Pengukuran Berulang

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

$$u_{REP} = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

9.20. Ketidakpastian Interpolasi

9.20.1. 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:

$$u_{INT} = \frac{SE}{1} \quad (21)$$

9.21. Model Matematika

9.21.1. Persamaan koreksi:

$$\text{koreksi} = t_{\text{exp}} - t \quad (22)$$

Ketidakpastian kombinasi untuk koreksi : $u_{\text{corr}}^2 = u_{t_{\text{exp}}}^2 + u_t^2$

Dimana:

t_{exp} = nilai suhu yang diharapkan (*expectation*) muncul di layar termometer infrared yang terkalibrasi dengan panjang gelombang dan emisivitas tertentu

t = nilai suhu yang muncul pada tampilan termometer infrared yang terkalibrasi

9.21.2. Ketidakpastian standar kombinasi total

$$U^2 = u_{t_{\text{exp}}}^2 + u_{\text{media}}^2 + u_{UUT}^2 \quad (23)$$

9.21.3. Ketidakpastian Terkait Sumber

$$u_{\text{media}}^2 = u_{\text{tem}}^2 + u_{\text{emiss}}^2 + u_{\text{rar}}^2 + u_{\text{she}}^2 + u_{\text{ac}}^2 + u_{\text{uni-bb}}^2 + u_{\text{stb-bb}}^2 + u_{\text{ohmmeter}}^2 + u_{\text{dts}}^2 + u_{\text{grad}}^2 \dots$$

- u_{tem} = ketidakpastian suhu kalibrasi.
- u_{emiss} = ketidakpastian karena estimasi emisivitas media kalibrasi
- u_{rar} = ketidakpastian karena radiasi lingkungan yang dipantulkan
- u_{she} = ketidakpastian karena pertukaran panas sumber
- u_{ac} = ketidakpastian karena kondisi sekitar
- $u_{\text{uni-bb}}$ = ketidakpastian karena ketidakseragaman suhu media kalibrasi.
- $u_{\text{stb-bb}}$ = ketidakpastian karena stabilitas suhu media kalibrasi.
- Ketidakpastian tambahan untuk ketertelusuran termometer kontak
 - u_{dts}^2 = ketidakpastian *drift* termometer kontak standar
 - u_{ohmmeter}^2 = ketidakpastian karena ohm-meter yang digunakan
 - u_{grad} = ketidakpastian karena perbedaan antara suhu media kalibrasi dan suhu termometer standar
 - $u_{\text{therm-grad}}$ = ketidakpastian karena ketidakpastian termometer yang digunakan untuk mengukur gradien suhu media kalibrasi.

9.21.4. Ketidakpastian dari termometer infrared:

$$u_{UT}^2 = u_{sse}^2 + u_{amb}^2 + u_{aa}^2 + u_{no}^2 + u_{repeat}^2 + u_{res}^2 + u_{repeat}^2 + u_{interpolasi}^2 \quad (24)$$

- u_{sse} = ketidakpastian dari *size of source effect*
- u_{amb} = ketidakpastian dari suhu lingkungan
- u_{amb} = ketidakpastian karena penyerapan atmosfer
- u_{no} = ketidakpastian dari *noise*
- u_{res} = ketidakpastian dari resolusi termometer yang dikalibrasi
- $u_{repeat} = ESDM = SD/\sqrt{n}$
- $u_{interpolasi}$ = ketidakpastian dari perhitungan interpolasi

Daftar Pustaka

1. Saunders, P., & Manoi, A. (2020). Uncertainties in blackbody corrections for low-temperature radiation thermometers
2. Manoi, A., & Saunders, P. (2017). Size-of-source Effect in Infrared Thermometers with Direct Reading of Temperature
3. Saunders, P., MSL, Technical Guide 22 -Calibration of Low Temperature Infrared Thermometers, Measurement Standards Laboratory of New Zealand, 2008, <http://msl.irl.cri.nz/training-and-resources/technical-guides>.
4. Sapritsky, V. I., & Prokhorov, A. V. Spectral effective emissivities of nonisothermal cavities calculated by the Monte Carlo method
5. ASTM E2847-14 Standard Test Method for Calibration and Accuracy Verification of Wideband Infrared Thermometers.
6. IEC/TS 62492-1, Industrial process control devices -Radiation thermometers -Part 1: Technical data for radiation thermometers, IEC, Geneva, Switzerland, 2008. Available from International Electrotechnical Commission (IEC), 3, rue de Varembe, P.O. Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland, <http://www.iec.ch>.
7. DeWitt, D. P., and Nutter, G. D., eds., 1988, "Theory and Practice of Radiation Thermometry," John Wiley and Sons, New York, NY.
8. VDI 3511 Blatt 4.4 / Part 4.4, Technische Temperaturemessung Strahlungsthermometrie Kalibrierung von Strahlungsthermometern, Temperature measurement in industry Radiation thermometry Calibration of radiation thermometers.
9. Fischer, J., Saunders, P., Sadli, M., Battuello, M., Park, C. W., Yuan, Z., Yoon, H., Li, W., van der Ham, E., Sakuma, F., Yamada, Y., Ballico, M., Machin, G., Fox, N., Hollandt, J., Ugur, S., Matveyev, M., Bloembergen, P., "Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point", CCT-WG5 working document CCT-WG508-03, BIPM, Sèvres, France, May 2008. Available from the BIPM website, <http://www.bipm.org>.
10. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM 100, BIPM, Sèvres, France, May 2008. Available from the BIPM website, <http://www.bipm.org>. (7) U. S. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, National Conference of Standards Laboratories, Boulder, CO, 1997.
11. J. V. Nicholas, D. R. White., (2005) Traceable Temperatures: An Introduction to Temperature Measurement and Calibration. England: John Wiley & Sons. Inc.