

REVISI KETIDAKPASTIAN SISTEM KALIBRASI TERMOMETER INFRAMERAH BERDASARKAN PADA HASIL KARAKTERISASI BENDA-HITAM

REVISION OF UNCERTAINTY OF INFRARED THERMOMETER-BASED CALIBRATION SYSTEM ON BLACK-BODY CHARACTERIZATION

Hidayat Wiriadinata¹, Iip Ahmad Rifai², Arfan Sindhu Tistomo², Melati Azizka Fajria², Dwi Larassati²

¹Pusat Riset Teknologi Pengujian dan Standar, Badan Riset dan Inovasi Nasional

²Direktorat Standar Nasional Satuan Ukuran Termoelektrik dan Kimia, Badan Standardisasi Nasional

Email: hidayat54@gmail.com

ABSTRAK

Komponen yang memiliki kontribusi terbesar pada ketidakpastian sistem kalibrasi termometer inframerah adalah emisivitas media kalibrasi (benda-hitam). Pada penelitian ini telah dilakukan verifikasi terhadap nilai ketidakpastian emisivitas benda-hitam tersebut. Dari penelitian ini diperoleh kenyataan bahwa nilai ketidakpastian emisivitas benda-hitam yang untuk panjang gelombang (8-14) μm besarnya pada $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$ adalah 0,12 $^\circ\text{C}$, dan pada $t = 500\text{ }^\circ\text{C}$ adalah 0,69 $^\circ\text{C}$. Substitusi ketidakpastian ini kedalam persamaan ketidakpastian sistem kalibrasi termometer inframerah menghasilkan ketidakpastian sebesar 2,2 $^\circ\text{C} \sim 2,4\text{ }^\circ\text{C}$ untuk panjang gelombang (8-14) μm dan rentang suhu 50 $^\circ\text{C} - 500\text{ }^\circ\text{C}$.

Kata Kunci : ketidakpastian, kalibrasi, termometer inframerah, benda-hitam

ABSTRACT

The uncertainty component that contributes the greatest to the Infrared Thermometer Calibration System is the calibration medium (black-body). In this study, the value of the black-body emissivity for the wavelength (8-14) μm is 0.12 at $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$, and 0.69 at $t = 500\text{ }^\circ\text{C}$. Substituting this uncertainty in the uncertainty of the infrared thermometer calibration system results in an uncertainty of 2.2 - 2.4 $^\circ\text{C}$ for a wavelength (8-14) μm and a temperature range of 50 - 500 $^\circ\text{C}$

Keywords: *uncertainty, calibration, infrared thermometer, black-body*

1. PENDAHULUAN

Laboratorium Metrologi Suhu Kedepujian SNSU-BSN telah memiliki sebuah sistem kalibrasi termometer inframerah dengan rentang suhu 50 °C – 500 °C. Sistem kalibrasi yang dimaksud tersusun dari variable *black-body* (*variable temperature benda-hitam, VTBB*) sebagai media kalibrasi dan termometer tahanan platina (*platinum resistance thermometer, PRT*) sebagai termometer standar. Sistem kalibrasi ini memiliki karakteristik :

- dapat dioperasikan dengan mudah dan cepat
- memiliki kesalahan pada *VTBB* karena adanya gradien suhu, yang disebabkan termometer inframerah yang dikalibrasi dan PRT mengukur suhu *VTBB* pada titik yang berbeda, yang terlihat pada Gambar 1.
- termometer inframerah mengukur suhu radiasi dari *VTBB* sedangkan PRT mengukur suhu sesungguhnya dari *VTBB*. Pada kondisi ini faktor emisivitas *VTBB* akan masuk dalam perhitungan sehingga untuk memperoleh hasil kalibrasi yang akurat maka harus diketahui nilai emisivitas *VTBB* dan ketidapastiannya.

Termometer inframerah yang dibahas pada tulisan ini adalah termometer *hand held* jenis *direct reading* yaitu termometer

inframerah yang sudah dilengkapi dengan sistem elektronik pengolah data dan display untuk menampilkan hasil olahannya dalam °C atau °F.

Sebelumnya telah dilakukan penelitian untuk menentukan nilai ketidapastian dari *VTBB* yang terbuat dari bahan yang memiliki emisivitas 0.90 ± 0.01 untuk panjang gelombang (8-14) μm . Ketidapastian *VTBB* hanya difokuskan pada nilai emisivitas dari bahannya saja bukan pada nilai emisivitas dari benda-hitam. Ketidapastian benda-hitam karena faktor bahan dapat dihitung berdasarkan pada Persamaan 1. (Nicholas, *et al.*, 2001) berikut ini

$$u_{\varepsilon} = \pm \lambda \left(\frac{T}{1200} \right)^2 \cdot \frac{100 \cdot \Delta\varepsilon}{\varepsilon} \quad [1]$$

dengan :

λ = panjang gelombang termometer inframerah yang dikalibrasi, μm

T = suhu dari radiasi panas yang dipancarkan oleh media kalibrasi (benda-hitam), K

ε = emisivitas dari bahan benda-hitam

$\Delta\varepsilon$ = ketidapastian dari emisivitas bahan benda-hitam.

Sebagai contoh penggunaan Persamaan [1] untuk perhitungan ketidapastian standar emisivitas *VTBB* untuk suhu 50 °C – 500 °C dan panjang gelombang (8-14) μm diperlihatkan pada Tabel 1:

Tabel 1. Ketidakpastian standar emisivitas VTBB

$t, ^\circ\text{C}$	$u_{\delta}, ^\circ\text{C}$
50	0.8
100	1.1
150	1.4
200	1.7
250	2.1
300	2.5
350	3.0
400	3.5
450	4.0
500	4.6

Digunakannya panjang gelombang (8-14) μm mengingat kebanyakan termometer inframerah yang dikalibrasi memiliki tanggapan spektral (*spectral response*) sebesar (8-14) μm . Sebagai hasilnya, nilai ketidakpastian dari VTBB adalah 0,8 $^\circ\text{C}$ untuk suhu 50 $^\circ\text{C}$, 1,1 $^\circ\text{C}$ untuk suhu 100 $^\circ\text{C}$ dan 4,6 $^\circ\text{C}$ untuk suhu 500 $^\circ\text{C}$. Bila dalam perhitungan nilai *Calibration Measurement Capabilities* (CMC) sistem kalibrasi, ketidakpastian dari VTBB ditambah dengan ketidakpastian komponen lainnya maka hasilnya untuk suhu 50 $^\circ\text{C}$ sampai dengan 500 $^\circ\text{C}$ adalah antara 2,5 $^\circ\text{C}$ dan 5,6 $^\circ\text{C}$. Sehingga dengan demikian sistem kalibrasi ini memiliki CMC antara 2,5 $^\circ\text{C}$ dan 5,6 $^\circ\text{C}$. Nilai CMC yang besar ini akan merambat ke laboratorium kalibrasi yang menjadi pelanggan dan dikhawatirkan akan berdampak kurang baik pada pelayanan metrologi suhu di masyarakat. Dengan demikian perlu dilakukan verifikasi terhadap perhitungan ketidakpastian

dengan selalu mengacu pada dokumen standar yang sesuai. Pada makalah ini akan diuraikan penelitian untuk menentukan nilai CMC baru sebagai perbaikan dari nilai CMC sistem kalibrasi termometer inframerah sebelumnya.

2. Karakterisasi Benda-hitam

Pada Gambar 1 diperlihatkan skema sistem kalibrasi termometer inframerah untuk rentang suhu 50 $^\circ\text{C}$ - 500 $^\circ\text{C}$. Sistem tersebut tersusun dari media kalibrasi berupa benda-hitam variabel (VTBB) dan PRT (Pt-100) sebagai termometer standar. (Nicholas, et al., 2001).

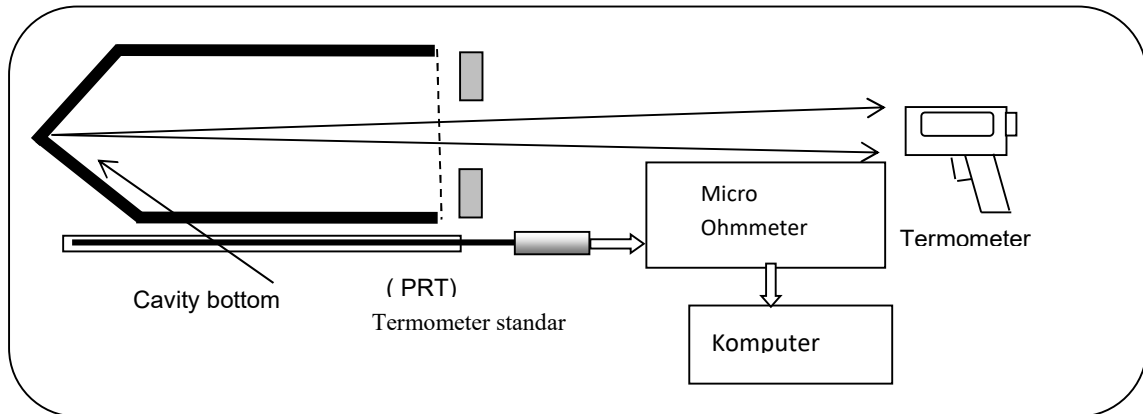
Pada proses kalibrasinya akan diperoleh nilai koreksi yang harus ditambahkan pada nilai suhu yang ditampilkan oleh termometer inframerah yang dikalibrasi. Adapun nilai koreksi tersebut dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 berikut ini : (Saunders, 2008).

$$t_{\text{koreksi}} = t_{\text{expected}} - t_{\text{uut}}, ^\circ\text{C} \quad [2]$$

dengan

t_{expected} = nilai suhu yang dihitung berdasarkan pada radiasi panas total yang diterima oleh termometer inframerah yang dikalibrasi, lihat Gambar 2, yang diharapkan tampil pada *display* termometer inframerah tersebut.

t_{uut} = nilai suhu yang tampil pada *display* termometer inframerah yang dikalibrasi



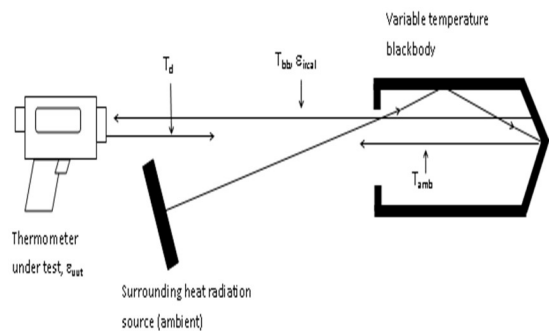
Gambar 1. Sistem kalibrasi termometer inframerah

Pada saat proses kalibrasi, termometer inframerah yang diarahkan ke benda-hitam akan menerima radiasi panas yang bersumber dari benda-hitam (L_{bb}) dan dari sumber radiasi panas yang berasal dari lingkungan (L_{amb}).

Setelah menerima radiasi panas, maka detektor termometer inframerah menjadi panas dan sehingga detektor akan memancarkan radiasi panas yang besarnya sebanding dengan besarnya suhu detektor tersebut yang berarah keluar dari termometer inframerah (L_{td}). Dengan demikian radiasi panas *netto* yang diterima termometer inframerah pada saat dikalibrasi adalah:

$$L_{tot} = L_{bb} + L_{amb} - L_{td}, \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{str}^{-1} \quad [3]$$

total yang diterima oleh termometer inframerah yang dikalibrasi, lihat Gambar 2, yang diharapkan tampil pada *display* termometer inframerah tersebut.



Gambar 2. Skema radiasi panas yang masuk ke termometer inframerah

Dengan demikian radiasi panas t yang diterima termometer inframerah pada saat dikalibrasi adalah :

$$L_{tot} = L_{bb} + L_{amb} - L_{td}, \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{str}^{-1} \quad [4]$$

Dengan adanya radiasi panas yang masuk maka pada output detektor termometer inframerah akan keluar sinyal listrik yang bisa diukur (S_{meas}) yaitu:

$$S_{meas} = \epsilon_{bb} S(T_{bb}) + (1 - \epsilon_{bb}) S(T_{amb}) - S(T_{td}), \text{ A} \quad [5]$$

dengan :

ϵ_{bb} = emisivitas benda-hitam

$S(T_{bb})$ = sinyal respon dari termometer inframerah untuk suhu benda-hitam T_{bb} , A

$$S(T_{bb}) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{bb}+B}\right)-1}, A \quad [6]$$

termometer inframerah yang disebabkan tanggapan spectral termometer inframerah tersebut [2], yaitu :

$$S(T_{amb}) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{amb}+B}\right)-1}, A \quad [7]$$

$$S(T_d) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_d+B}\right)-1}, A \quad [8]$$

$$A = \lambda_0 \left(1 - 6 \frac{\sigma^2}{\lambda_0^2}\right), \lambda_0 = \lambda_2 - \lambda_1 \quad [9]$$

$$\sigma = (\lambda_2 - \lambda_1) / \sqrt{12} \quad [10]$$

$$B = \frac{c_2}{2} \frac{\sigma^2}{\lambda_0^2} \quad [11]$$

Konversi sinyal listrik S_{meas} (*P. Saunders, 2009*) ke besaran suhu T_{exp} , dengan cara :

$$S(T_{exp}) = \frac{S_{meas}}{\varepsilon_{instr}} + S(T_d), A \quad [12]$$

$$= \frac{\varepsilon_{bb}S(T_{bb}) + (1 - \varepsilon_{bb})S(T_{amb}) - (1 - \varepsilon_{instr})S(T_d)}{\varepsilon_{instr}},$$

A [13]

Dengan :

ε_{instr} = emisivitas thermometer inframerah

Dari Persamaan [13] dapat diperoleh nilai t_{exp} , dalam °C, yaitu :

untuk mengukur gradien, u_{trg}

i. sse (*size of source effect*) dari termometer inframerah yang dikalibrasi, u_{sse}

$S(T_{amb})$ = sinyal respon dari termometer inframerah untuk suhu amb T_{amb} , A

$S(T_d)$ = sinyal respon dari termometer inframerah untuk suhu detektor T_d , A, B parameter

$$t_{exp} = \frac{c_2}{A \ln\left(\frac{1}{S(T_{exp})+1}\right)} - \frac{B}{A} - 273.15, ^\circ\text{C}$$

[14]

Seperti diperlihatkan pada persamaan [1], hasil kalibrasi adalah nilai koreksi dari termometer inframerah yang dikalibrasi yaitu selisih antara t_{exp} dan t_{uit} dan nilai ketidakpastiannya diturunkan berdasarkan pada Gambar 1. Dengan mengacu ke Gambar 1 bisa diturunkan komponen ketidakpastian sistem kalibrasi thermometer inframerah untuk nilai koreksi termometer inframerah, yaitu yang berasal dari :

- termometer standar, u_{std}
- gradient suhu, u_{grad}
- emisivitas media kalibrasi, u_ε
- ohmmeter, u_Ω
- stabilitas media kalibrasi, u_{stb}
- resolusi termometer inframerah yang dikalibrasi, u_{res}
- pengukuran berulang, u_{rep}
- termometer yg digunakan

Bila semua komponen tersebut di atas dimasukan dalam perhitungan ketidakpastian, maka akan diperoleh nilai ketidakpastian 2.4 °C untuk suhu 50 °C

dan 5.6 °C untuk suhu 500 °C, dengan komponen terbesar berasal dari emisivitas media kalibrasi (benda-hitam), sedangkan komponen lainnya nilainya relatif kecil. Sehingga dengan demikian untuk memperbaiki nilai ketidakpastian sistem kalibrasi thermometer inframerah akan

difokuskan dalam menentukan ketidakpastian emisivitas media kalibrasi. Penentuan ini dilakukan melalui karakterisasi benda-hitam untuk memperoleh nilai emisivitas benda-hitam beserta ketidakpastiannya.

Tabel 2. Ketidakpastian system kalibrasi thermometer inframerah sebelum revisi nilai ketidakpastian emisivitas media kalibrasi (benda-hitam)

Set-point : 500 °C.										
Component	Unit	Distribution	U	Divisor	V_i	u_i	C_i	$u_i C_i$	$(u_i C_i)^2$	$(u_i C_i)^2 / V_i$
-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
$t_{exp}; U_{exp}$	°C	Normal	0,16	1	1,00E+99	0,1597955	1	0,1597955	0,025534615	6,52E-103
Ohmmeter; $u_{ohmmeter}$	°C	Normal	0,005	2	1,00E+99	0,0025	1	0,0025	0,00000625	3,91E-110
Gradient radiation source; u_{grad}	°C	Rectangular	0,8	1,732	1,00E+99	0,4618938	1	0,4618938	0,21334585	4,55E-101
Therm. used for meas. gradient rad. source	°C	Normal	0,61	2	1,00E+99	0,3026549	1	0,3026549	0,0916	8,39E-102
Homogeneity radiation source; u_{hom-bb}	°C	Rectangular	0,5	1,732	1,00E+99	0,2886836	1	0,2886836	0,083338223	6,95E-102
Stability radiation source; u_{stb-bb}	°C	Rectangular	0,1	1,732	1,00E+99	0,0577367	1	0,0577367	0,003333529	1,11E-104
Emiss. of rad. source as func.tion of UUT wavelength; u_{emiss}	°C	Rectangular	4,58	1,732	1,00E+99	2,6416744	1	2,6416744	6,978443539	4,87E-98
Resolution of UUT; u_{res}	°C	Rectangular	0,5	1,732	1,00E+99	0,2886836	1	0,2886836	0,083338223	6,95E-102
Measurement repeatability; u_{repeat}	°C	Normal	0,01	1	4	0,01	1	0,01	0,0001	2,50E-09
SSE of UUT; u_{sse}	°C	Rectangular	1,5	1,732	1,00E+99	0,8660508	1	0,8660508	0,750044003	5,63E-100
Regression; u_{reg}	°C	Normal	0,191	1,0	6	0,1912581	1	0,1912581	0,036579678	2,23E-04
Sums									8,265663908	2,23E-04
The combined standard uncertainty, u_c (°C)									2,875006767	
Effective degrees of freedom, V_{eff}									3,06E+05	
Coverage factors, k-student's for V_{eff} and CL 95 %									1,96	
Expanded uncertainty, $U = k u_c$ (°C)									5,6	
Ketidakpastian tunggal :										
Gradien suhu = 0,8 °C										
Radiation thermometer (50 °C ~ 500 °C)										
$\lambda = (8 - 14) \mu m \epsilon = 1$										
Stabilitas = 0,1 °C										
Homogenitas = 0,5 °C										
Mathematical model of the measurement	: $t_{koreksi} = t_{exp} - t_{uut}$									
Calibration Range	: (50 ~ 500)°C									
Set-point : 50 °C.										
Component	Unit	Distribution	U	Divisor	V_i	u_i	C_i	$u_i C_i$	$(u_i C_i)^2$	$(u_i C_i)^2 / V_i$
-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
$t_{exp}; U_{exp}$	°C	Normal	0,16	2	1,00E+99	0,0798078	1	0,0798078	0,006369293	4,06E-104
Ohmmeter; $u_{ohmmeter}$	°C	Normal	0,005	2	1,00E+99	0,0025	1	0,0025	0,00000625	3,91E-110
Gradient radiation source; u_{grad}	°C	Rectangular	0,8	1,732	1,00E+99	0,4618938	1	0,4618938	0,21334585	4,55E-101
Therm. used for meas. gradient rad. source	°C	Normal	0,6053098	2	1,00E+99	0,3026549	1	0,3026549	0,0916	8,39E-102
Homogeneity radiation source; u_{hom-bb}	°C	Rectangular	0,5	1,732	1,00E+99	0,2886836	1	0,2886836	0,083338223	6,95E-102
Stability radiation source; u_{stb-bb}	°C	Rectangular	0,1	1,732	1,00E+99	0,0577367	1	0,0577367	0,003333529	1,11E-104
Emiss. of rad. source as func.tion of UUT wavelength; u_{emiss}	°C	Rectangular	0,80	1,732	1,00E+99	0,4628791	1	0,4628791	0,214257035	4,59E-101
Resolution of UUT; u_{res}	°C	Rectangular	0,5	1,732	1,00E+99	0,2886836	1	0,2886836	0,083338223	6,95E-102
Measurement repeatability; u_{repeat}	°C	Normal	0,01	1	4	0,01	1	0,01	0,0001	2,50E-09
SSE of UUT; u_{sse}	°C	Rectangular	1,5	1,732	1,00E+99	0,8660508	1	0,8660508	0,750044003	5,63E-100
Regression; u_{reg}	°C	Normal	0,191	1	6	0,1912581	1	0,1912581	0,036579678	2,23E-04
Sums									1,482312081	2,23E-04
The combined standard uncertainty, u_c (°C)									1,217502395	
Effective degrees of freedom, V_{eff}									9,85E+03	
Coverage factors, k-student's for V_{eff} and CL 95 %									1,96	
Expanded uncertainty, $U = k u_c$ (°C)									2,4	

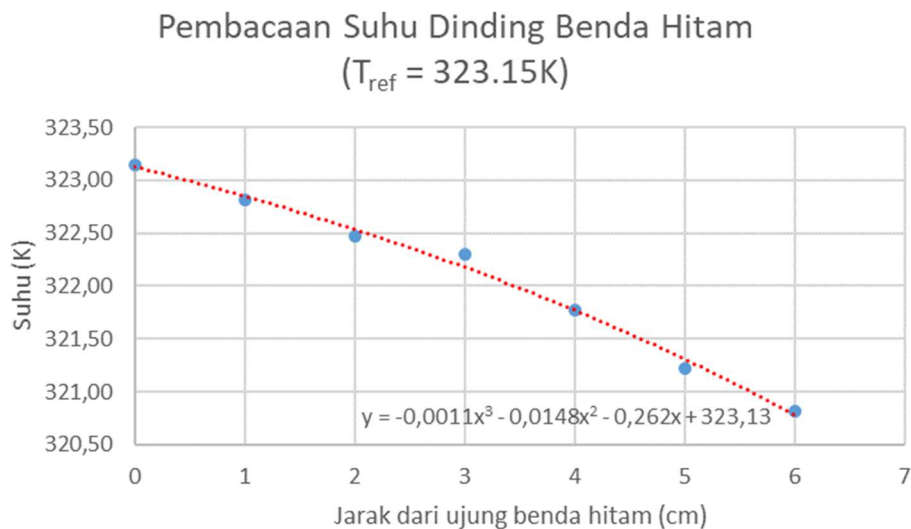
Adapun nilai ketidakpastian tersebut akan menjadi komponen yang mengganti komponen ketidakpastian emisivitas sebelumnya, u_e .

3. Hasil dan pembahasan

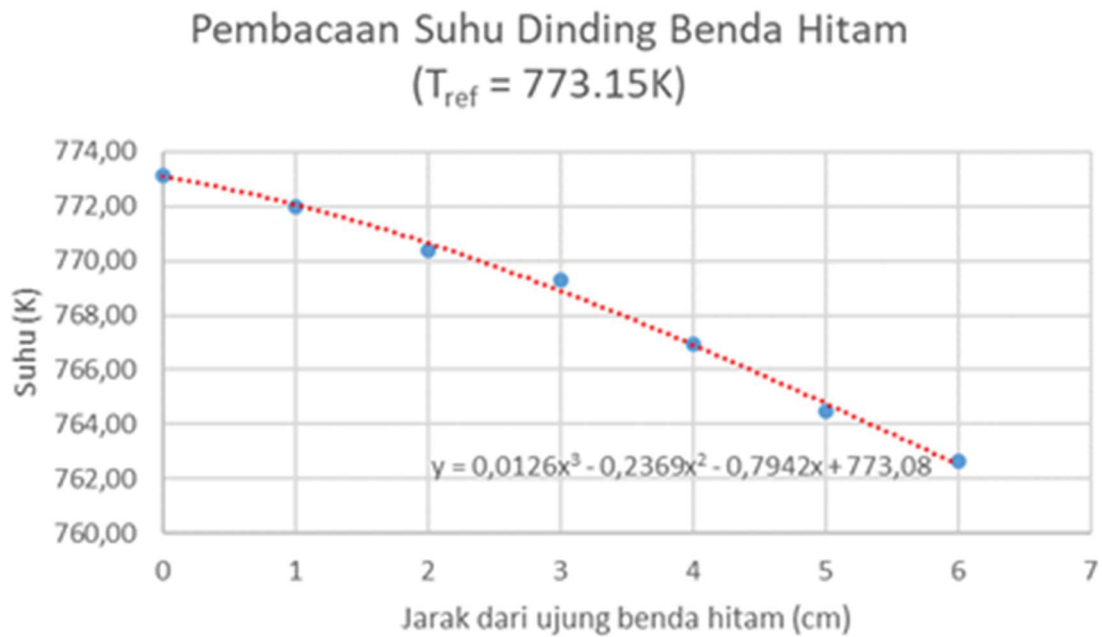
Karakterisasi blackbody Adalah sesuatu yang biasa saat ini bahwa emisivitas benda-hitam dievaluasi melalui perhitungan terhadap distribusi suhu dari dinding bagian dalam benda-hitam tersebut. (Y. Duan, dkk, 2003). Perhitungan tersebut berdasarkan pada Metoda Monte Carlo yang sudah di implementasikan dalam bentuk software

Aplikasi Steep 3. Benda hitam yang diteliti memiliki bentuk rongga silinder dengan diameter 65 mm dengan panjang 120 mm.

Untuk memperoleh distribusi suhu dari dinding benda-hitam dilakukan pengukuran suhu pada dinding bagian dalam benda-hitam dengan menggunakan sensor termokopel. Pengukuran dilakukan sepanjang dinding benda-hitam untuk setiap interval jarak sepanjang 1 cm. Besar kecilnya daya pancar benda-hitam dinyatakan dengan parameter emisivitas.



Gambar 3. Pembacaan Suhu Dinding Benda Hitam



Gambar 4. Pembacaan Suhu Dinding Benda Hitam

Selanjutnya, berdasarkan distribusi suhu benda-hitam tersebut melalui penggunaan software Steep3 telah dihitung nilai Emisivitas benda-hitam dan ketidakpastiannya. Panjang gelombang radiasi panas yang dipancarkan oleh benda-hitam adalah (8-14) μm sehingga panjang gelombang tengahnya adalah 11 μm . Pada Gambar 2 diperlihatkan hasil perhitungan nilai emisivitas benda-hitam dan ketidakpastiannya pada panjang gelombang 11 μm untuk suhu 50 $^{\circ}\text{C}$, 250 $^{\circ}\text{C}$ dan 500 $^{\circ}\text{C}$.

Tabel 3. Nilai emisivitas benda-hitam

Panjang Gelombang	Emisivitas				u
	Isothermal	323.15K	523.15K	773.15K	
8	0,9998	0,9997	0,9985	0,9967	0,0015
11	0,9998	0,9989	0,9986	0,9972	0,0015
14	0,9998	0,9989	0,9988	0,9975	0,0015

Dari penelitian ini, dengan menggunakan software aplikasi Steep3, didapatkan nilai emisivitas dan ketidakpastiannya dari benda-hitam sebagai fungsi suhu dan panjang gelombang, seperti dapat dilihat pada Tabel 3. Panjang gelombang berkaitan dengan tanggapan spektral (*spectral response*) termometer *infrared*, yaitu (8-14) μm dengan panjang gelombang tengah 11 μm . Nilai emisivitas benda-hitam dan ketidakpastiannya pada panjang gelombang tengah 11 μm untuk

suhu 50 °C (323,15 K) adalah $\varepsilon = 0.9989$
 $u_\varepsilon = 0,015$ dan untuk suhu 500 °C (773,15
 K) adalah $\varepsilon = 0.9989$ $u_\varepsilon = 0,015$.

Dengan menggunakan persamaan:

$$u = \pm \lambda \cdot \left(\frac{T}{1200} \right)^2 \cdot \frac{100 \cdot \Delta \varepsilon}{\varepsilon} \quad [15]$$

ketidakpastian emisivitas benda-hitam
 dikonversi ke besaran suhu menjadi :

$u_{50} = 0.12$ °C, $u_{500} = 0.69$ °C. Bila nilai
 ketidakpastian tersebut dimasukan
 kedalam perhitungan ketidakpastian yaitu
 dengan mengganti nilai u_ε yang lama.
 Sehingga nilai ketidakpastian sistem
 kalibrasi termometer inframerah untuk
 rentang suhu (50 -500) °C menjadi 2,2 °C
 $\sim 2,4$ °C untuk tingkat kepercayaan 95%
 dan faktor cakupan $k = 2$. Lihat Gambar 4.

Tabel 4. Ketidakpastian system kalibrasi thermometer inframerah setelah revisi nilai ketidakpastian emisivitas media kalibrasi (benda-hitam)

Radiation thermometer (50 °C ~ 500 °C)											Ketidakpastian tungku :	
											Gradien suhu = 0,8 °C	
											Stabilitas = 0,1 °C	
											Homogenitas = 0,5 °C	
Mathematical model of the measurement : $t_{\text{koreksi}} = t_{\text{exp}} - t_{\text{out}}$												
Calibration Range : (50 ~ 500)°C												
Set-point : 50 °C.												
Component	Unit	Distribution	U	Divisor	V_i	u_i	C_i	u_{C_i}	$(u_{C_i})^2$	$(u_{C_i})^4/V_i$		
$t_{\text{exp}}, u_{\text{exp}}$	°C	Normal	0,16	2	1,00E+99	0,07980785	1	0,079807849	0,006369293	4,06E-104		
Ohmmeter; u_{ohmmeter}	°C	Normal	0,005	2	1,00E+99	0,0025	1	0,0025	0,00000825	3,91E-110		
Gradient radiation source; u_{grad}	°C	Rectangular	0,8	1,732	1,00E+99	0,46189376	1	0,461893764	0,21334585	4,55E-101		
Therm. used for meas. gradient rad. source	°C	Normal	0,605309838	2	1,00E+99	0,30265492	1	0,302654919	0,0916	8,39E-102		
Homogeneity radiation source; $u_{\text{hom-bb}}$	°C	Rectangular	0,5	1,732	1,00E+99	0,2886836	1	0,288683603	0,083338223	6,95E-102		
Stability radiation source; $u_{\text{stb-bb}}$	°C	Rectangular	0,1	1,732	1,00E+99	0,05773672	1	0,057736721	0,003333529	1,11E-104		
Emiss. of rad. source as func.tion of UUT wavelength; u_{emiss}	°C	Rectangular	0,12	1,732	1,00E+99	0,06928406	1	0,069284065	0,004800282	2,30E-104		
Resolution of UUT; u_{res}	°C	Rectangular	0,5	1,732	1,00E+99	0,2886836	1	0,288683603	0,083338223	6,95E-102		
Measurement repeatability; u_{repeat}	°C	Normal	0,01	1	4	0,01	1	0,01	0,0001	2,50E-09		
SSE of UUT; u_{sse}	°C	Rectangular	1,5	1,732	1,00E+99	0,86605081	1	0,866050808	0,750044003	5,63E-100		
Regression; u_{reg}	°C	Normal	0,191	1	6	0,19125814	1	0,191258144	0,036579678	2,23E-04		
Sums								1,272855328		2,23E-04		
The combined standard uncertainty, u_c , (°C)								1,128208903				
Effective degrees of freedom, ν_{eff}								7,26E+03				
Coverage factors, k-student's for ν_{eff} and CL 95 %								1,96				
Expanded uncertainty, $U = k u_c$, (°C)								2,2				
Set-point : 500 °C.												
Component	Unit	Distribution	U	Divisor	V_i	u_i	C_i	u_{C_i}	$(u_{C_i})^2$	$(u_{C_i})^4/V_i$		
$t_{\text{exp}}, u_{\text{exp}}$	°C	Normal	0,16	1	1,00E+99	0,15979554	1	0,159795541	0,025534615	6,52E-103		
Ohmmeter; u_{ohmmeter}	°C	Normal	0,005	2	1,00E+99	0,0025	1	0,0025	0,00000625	3,91E-110		
Gradient radiation source; u_{grad}	°C	Rectangular	0,8	1,732	1,00E+99	0,46189376	1	0,461893764	0,21334585	4,55E-101		
Therm. used for meas. gradient rad. source	°C	Normal	0,61	2	1,00E+99	0,30265492	1	0,302654919	0,0916	8,39E-102		
Homogeneity radiation source; $u_{\text{hom-bb}}$	°C	Rectangular	0,5	1,732	1,00E+99	0,2886836	1	0,288683603	0,083338223	6,95E-102		
Stability radiation source; $u_{\text{stb-bb}}$	°C	Rectangular	0,1	1,732	1,00E+99	0,05773672	1	0,057736721	0,003333529	1,11E-104		
Emiss. of rad. source as func.tion of UUT wavelength; u_{emiss}	°C	Rectangular	0,69	1,732	1,00E+99	0,39838337	1	0,398383372	0,158709311	2,52E-101		
Resolution of UUT; u_{res}	°C	Rectangular	0,5	1,732	1,00E+99	0,2886836	1	0,288683603	0,083338223	6,95E-102		
Measurement repeatability; u_{repeat}	°C	Normal	0,01	1	4	0,01	1	0,01	0,0001	2,50E-09		
SSE of UUT; u_{sse}	°C	Rectangular	1,5	1,732	1,00E+99	0,86605081	1	0,866050808	0,750044003	5,63E-100		
Regression; u_{reg}	°C	Normal	0,191	1,0	6	0,19125814	1	0,191258144	0,036579678	2,23E-04		
Sums								1,44592968		2,23E-04		
The combined standard uncertainty, u_c , (°C)								1,202468162				
Effective degrees of freedom, ν_{eff}								9,37E+03				
Coverage factors, k-student's for ν_{eff} and CL 95 %								1,96				
Expanded uncertainty, $U = k u_c$, (°C)								2,4				

5. KESIMPULAN

Ketidakpastian yang besar dari system kalibrasi termometer inframerah disebabkan oleh besarnya ketidakpastian media kalibrasi. Setelah ketidakpastian media kalibrasi di revisi dengan nilai yang sebenarnya, maka ketidakpastian dari system kalibrasi termometer inframerah bila dibandingkan dengan ketidakpastian yang tercantum pada ASTM E2847-14 adalah 2.614 °C untuk kalibrasi termometer inframerah untuk setpoint 800 °C maka nilainya tersebut sebanding dengan yang ada dalam naskah standar.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada rekan-rekan di laboratorium Metrologi Suhu atas dukungannya, terutama untuk Pak Iip Ahmad Rifai dan Pak Acep Sujita.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. DeWitt D.P., Nutter, Gene D. (1988). Theory and Practice of Radiation Thermometers. Singapore.
2. Saunders, P. (2008). Calibration and use of low-temperature direct-reading radiation thermometers. *Measurement Science and Technology*, 20(2), 025104
3. Saunders, P. (2009). MSL Technical Guide 22. *Measurement Standards Laboratory of New Zealand*.
4. Saunders, P. (2020), Uncertainties in benda-hitam corrections for low-temperature radiation thermometers, *Metrologia*, Volume 57, Number 2
Published 25 March 2020 • © 2020 BIPM & IOP Publishing Ltd
5. Nicholas, J. V., White, D. R., Traceable Temperatures, (2001). An introduction to temperature measurement and calibration
6. H. Wiriadinata. (2009). Sistem Kalibrasi Termometer Inframerah untuk rentang 50 °C – 500 °C, *Instrumentasi Volume 33 Nomor 1 Januari – Juni 2009*, 19 – 25
7. H. Wiriadinata. (2015). Termometer Inframerah, Teori dan Kalibrasi. , LIPI Press, Jakarta
8. Duan, Y. , Yuan, Z. (2003). A New Method of Evaluating the Effective Spectral Emissivity of Benda-hitam Radiators without Measuring the Temperature Distribution, *Temperature : Its Measurement and Control in Science and Industry, Volume 7*. Edited by Dean C. Ripple