



Hidayat Wiriadinata

TERMOMETER INFRAMERAH:

Teori dan Kalibrasi

TERMOMETER INFRAMERAH:

Teori dan Kalibrasi

Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh atau sebagian dari buku ini dalam bentuk atau cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

© Hak cipta dilindungi oleh Undang-Undang No. 28 Tahun 2014

All Rights Reserved

TERMOMETER INFRAMERAH: *Teori dan Kalibrasi*

Hidayat Wiriadinata

LIPi Press

© 2015 Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Pusat Penelitian Metrologi

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Termometer Inframerah: Teori dan Kalibrasi/Hidayat Wiriadinata – Jakarta: LIPI Press, 2015.
xix hlm. + 135 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-979-799-836-3

1. Instrumentasi

2. Pengukuran

530.8

Copy editor : Lani Rachmah
Proofreader : Sonny Heru Kusuma dan Fadly Suhendra
Penata isi : Erna Rumbiati dan Ariadni
Desainer Sampul : Rusli Fazi

Cetakan Pertama : Oktober 2015



Diterbitkan oleh:
LIPI Press, anggota Ikapi
Jln. Gondangdia Lama 39, Menteng, Jakarta 10350
Telp. (021) 314 0228, 314 6942. Faks. (021) 314 4591
E-mail: press@mail.lipi.go.id

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
PENGANTAR PENERBIT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
PRAKATA	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Penggunaan Termometer Inframerah.....	6
BAB 2 EMISI RADIASI PANAS DARI BENDA	11
A. Radiasi Gelombang Elektromagnetik.....	11
B. Benda-Hitam (<i>Blackbody</i>).....	16
C. Benda Nonbenda-Hitam	21
D. Benda-Hitam Praktis	26
BAB 3 TERMOMETER INFRAMERAH	33
A. Konstruksi Termometer Inframerah.....	35
B. Pengaruh Jarak pada Pengukuran.....	39
C. Persamaan Pengukuran Termometer Inframerah.....	44
BAB 4 KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN.....	53
A. Pengertian Dasar	53
B. Persamaan Pengukuran	56
C. Ketidakpastian Jenis A.....	57
D. Ketidakpastian Jenis B.....	64

E.	Menggabungkan Komponen Ketidakpastian	69
F.	Ketidakpastian yang Diperluas dan Faktor Cakupan.....	71
G.	Langkah-Langkah Penentuan Ketidakpastian Pengukuran.....	73
BAB 5 KALIBRASI TERMOMETER INFRAMERAH		75
A.	Kalibrasi dan Ketertelusuran.....	75
B.	Sistem Kalibrasi Termometer Inframerah.....	81
C.	Media Kalibrasi Termometer Inframerah	82
D.	Termometer Standar	84
E.	Persamaan Kalibrasi Termometer Inframerah.....	87
F.	Proses Kalibrasi Termometer Inframerah	90
DAFTAR PUSTAKA		97
LAMPIRAN 1		99
LAMPIRAN 2		113
INDEKS		131
BIOGRAFI PENULIS		135

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Contoh Nilai Emisivitas Benda.....	9
Tabel 3.1	Contoh Spesifikasi Teknis Termometer Inframerah. (<i>Minolta/Land Cyclops Compac 3 Operating Instruction</i>).....	34
Tabel 3.2	Rentang Ukur Termometer Inframerah.....	38
Tabel 4.1	Data Kalibrasi Termometer Inframerah.....	61
Tabel 4.2	Koefisien Polinomial dan Kesalahan Regresi.	62
Tabel 4.3	Koreksi Kalibrasi Termometer Inframerah.....	63
Tabel 4.4	Turunan Parsial Fungsi Sederhana.....	69
Tabel 5.1	Definisi ITS-90 untuk Suhu Standar	77
Tabel 5.2	Contoh Tabel Koreksi.....	80
Tabel L.1	Ketidakpastian Baku Termometer Standar.....	100
Tabel L.2	Ketidakpastian Ohmmeter.....	100
Tabel L.3	Data Hasil Kalibrasi untuk <i>Set-point</i> 50°C.	101
Tabel L.4	Data Hasil Kalibrasi untuk Seluruh <i>Set-point</i> , Standar dalam Ohm.	102
Tabel L.5	Data Hasil Kalibrasi untuk Seluruh <i>Set-point</i> , Standar dalam °C.	102
Tabel L.6	Nilai Koreksi untuk TUT.....	104
Tabel L.7	Nilai Koreksi TUT untuk Rentang Suhu 50°C–500°C.....	108
Tabel L.8	Ketidakpastian t_{exp}	110
Tabel L.9	Ketidakpastian Kalibrasi untuk <i>Set-point</i> 50°C.	110
Tabel L.10	Ketidakpastian Kalibrasi untuk Rentang Suhu 50°C–500°C.....	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Rentang Suhu Its-90 yang Dicapuk Termometer Tahanan Platina.....	2
Gambar 1.2	Skema Pengukuran Suhu dengan Termometer Nonkontak.....	4
Gambar 1.3	Termometer Inframerah.....	5
Gambar 1.4	Pengukuran Suhu Benda yang Bergerak.....	5
Gambar 1.5	Pengukuran Suhu Benda yang Posisinya Sulit Dijangkau.....	6
Gambar 1.6	Penggunaan Termometer Inframerah di Dunia Kuliner....	7
Gambar 1.7	Penggunaan Termometer Inframerah pada Pemeliharaan dan Perbaikan Mesin Mobil.....	7
Gambar 1.8	Penggunaan Termometer Inframerah pada Identifikasi Panas Trafo.....	8
Gambar 2.1	Spektrum Radiasi Gelombang Elektromagnetik.....	11
Gambar 2.2	Fenomena Permukaan pada Benda Padat.....	12
Gambar 2.3	Penggunaan Sistem Koordinat Bola untuk Menggambarkan Radiansi.....	13
Gambar 2.4	Skema Definisi Radiansi.....	14
Gambar 2.5	Representasi Sudut Ruang (<i>Solid Angle</i>).....	15
Gambar 2.6	Besarnya Radiasi Benda-Hitam Tidak Bergantung pada Arah Emisi.....	17
Gambar 2.7	Grafik Radiansi Benda-Hitam terhadap Panjang Gelombang.....	18
Gambar 2.8	Kurva Radiansi dari Benda-Hitam, <i>Graybody</i> , dan Permukaan Biasa.....	24
Gambar 2.9	Rongga Pendekatan Benda-Hitam.....	27
Gambar 2.10	Skema Rongga Benda-Hitam (<i>Blackbody Cavity</i>).....	28

Gambar 2.11	Contoh Rongga Benda-Hitam	28
Gambar 2.12	Skema Benda-Hitam Praktis (<i>Practical Blackbody</i>).....	29
Gambar 2.13	Contoh Benda-Hitam Variabel.	30
Gambar 2.14	Permukaan Kalibrasi Benda-Hitam Variabel.	31
Gambar 2.15	Contoh Radiator Permukaan Datar (<i>Infrared Calibrator</i>).	32
Gambar 3.1	Termometer Inframerah Jenis Kamera.	34
Gambar 3.2	Termometer Inframerah Jenis <i>Handheld</i>	35
Gambar 3.3	Skema Umum Konstruksi Termometer Inframerah.	36
Gambar 3.4	Jendela Atmosfer (<i>Atmospheric Windows</i>).	38
Gambar 3.5	Skema Medan Pandang Termometer Inframerah.....	39
Gambar 3.6	Pengaruh Jarak terhadap Ketelitian Pengukuran.	40
Gambar 3.7	Termometer Inframerah dengan Laser Pemandu Arah.	41
Gambar 3.8	<i>Distance To Spot Size Ratio</i> untuk Menentukan Jarak Ukur Termometer Inframerah.....	42
Gambar 3.9	Skema Penentuan Sudut Medan Pandang.	43
Gambar 3.10	Radiasi Panas yang Diterima Termometer Inframerah.....	45
Gambar 3.11	Pendekatan Kurva Respons Spektral dari Termometer Inframerah.....	48
Gambar 4.1	Pengepasan Kurva Data dengan Fungsi Linier $y = ax + b$	60
Gambar 4.2	Plot Data Kalibrasi Termometer Inframerah.....	62
Gambar 4.3	Fungsi Pengepasan Kurva untuk Plot Data Kalibrasi Termometer Inframerah.	63
Gambar 4.4	Distribusi Segiempat	65
Gambar 4.5	Pengukuran Suhu dengan Termometer Digital Beresolusi 1°C.	66
Gambar 4.6	Distribusi Segitiga	68
Gambar 5.1	Diagram Ketertelusuran Termometer.	76
Gambar 5.2	Kurva Transisi Fase Logam Timah (Sn).....	78
Gambar 5.3	Titik-Tetap Air (<i>Triple Point Of Water</i> , 0,01°C)..	78
Gambar 5.4	Diagram Ketertelusuran Termometer Inframerah.	79
Gambar 5.5	Sistem Kalibrasi dengan Media Kalibrasi Benda-Hitam Variabel.	81
Gambar 5.6	Sistem Kalibrasi dengan Media Kalibrasi Radiator Permukaan Datar.	82
Gambar 5.7	Penempatan Termometer Standar pada Benda-Hitam Variabel.	84

Gambar 5.8	Penempatan Termometer Standar pada Radiator Permukaan Datar.	85
Gambar 5.9	Skema Sistem Kalibrasi dengan Media Benda-Hitam Variabel.	88
Gambar 5.10	<i>Set-Up</i> Kalibrasi Termometer Inframerah.....	92
Gambar L.1	<i>Set-Up</i> Kalibrasi.....	101
Gambar L.2	Penulisan Data pada Microsoft Excel.	105
Gambar L.3	Menu <i>Data Analysis</i>	105
Gambar L.4	<i>Windows Data Analysis</i>	106
Gambar L.5	Memasukkan Data untuk Diolah.	106
Gambar L.6	Data Hasil Regresi.	107

PENGANTAR PENERBIT

Sebagai penerbit ilmiah, LIPI Press mempunyai tanggung jawab untuk menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Penyediaan terbitan ilmiah yang berkualitas adalah salah satu perwujudan tugas LIPI Press untuk ikut serta dalam mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku *Termometer Inframerah: Teori dan Kalibrasi* ini membahas teori dasar yang bisa memberikan pemahaman kepada para pembaca tentang termometer radiasi secara umum dan termometer inframerah secara khusus. Teori dasar ini melingkupi pengertian tentang radiasi panas, benda-hitam (*blackbody*), termometer inframerah, dan dasar-dasar perhitungan ketidakpastian (*uncertainty*). Selain itu, buku ini juga menyajikan secara rinci mengenai teknik mengkalibrasi termometer inframerah dan cara-cara mengolah data kalibrasi beserta perhitungan nilai ketidakpastiannya

Diharapkan buku ini dapat memudahkan para pengguna untuk lebih memahami cara kerja termometer inframerah. Selain itu, khusus untuk para teknisi kalibrasi, diharapkan buku ini dapat membantu kelancaran dalam melakukan kalibrasi termometer inframerah di laboratorium. Sementara itu, untuk berbagai kalangan yang menaruh minat terhadap termometer inframerah, misalnya kalangan industri, dosen dan mahasiswa teknik di perguruan tinggi, buku ini dapat digunakan sebagai salah satu sumber bacaannya.

Semoga buku ini menjadi pelengkap dari minimnya literatur dalam bahasa Indonesia yang secara khusus membahas tentang termometer inframerah. Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak atas proses penerbitan buku ini.

LIPi Press

KATA PENGANTAR

Pusat Penelitian Metrologi LIPI sebagai Pengelola Teknis Ilmiah Standar Nasional untuk Satuan Ukuran (SNSU), selain memiliki tanggung jawab dalam memelihara ketertelusuran peralatan standar nasional ke standar internasional juga mendiseminasikannya ke peralatan standar yang berada pada hierarki di bawahnya. Implementasi dari tanggung jawab tersebut diwujudkan dalam beberapa kegiatan teknis, di antaranya adalah membuat dan mengembangkan sistem kalibrasi untuk mendiseminasikan nilai besaran standar ke masyarakat pengguna dan melakukan pelatihan teknis, baik untuk para pelaksana teknik di industri maupun di laboratorium kalibrasi dan pengujian.

Berkaitan dengan pelatihan, untuk memudahkan para peserta dalam memahami, direncanakan materi pelatihan akan disajikan dalam bentuk buku. Pada buku tersebut akan disampaikan uraian materi secara terperinci sehingga dapat lebih membantu para peserta dalam memahami materi pelatihan. Selain itu, materi dalam bentuk buku akan membuat rentang cakupan penyebaran materi menjadi lebih luas bila dibandingkan penyampaian materi hanya melalui pelatihan atau kursus.

Untuk maksud tersebut, telah ditulis sebuah buku tentang termometer inframerah oleh seorang peneliti senior di lingkungan Puslit Metrologi LIPI yang memiliki kompetensi sesuai dengan materi yang dituliskannya. Sejak tahun 1993 penulis berkecimpung dalam

metrologi suhu dengan spesialisasi termometri radiasi, sedangkan termometer inframerah merupakan bagian dari termometer radiasi. Selain melakukan penelitian mengenai realisasi skala suhu termometer radiasi standar, penulis juga mengembangkan beberapa sistem kalibrasi termometer radiasi kelas industri, termasuk di dalamnya termometer inframerah sehingga banyak termometer radiasi industri yang datang ke Puslit Metrologi untuk dikalibrasi. Untuk meningkatkan kualifikasi di bidang termometri radiasi, penulis beberapa kali ke *National Metrology Institute of Japan* (NMIJ) Jepang untuk belajar tentang metrologi termometri radiasi dan melakukan kerja sama penelitian. Selain itu, penulis juga mengikuti pelatihan tentang termometri radiasi dari dua ahli termometri radiasi kelas dunia, Dr. Mac Ballico dari NMIA Australia dan Dr. Peter Saunders dari MSL Selandia Baru, yang dilaksanakan di Puslit Metrologi LIPI. Buku ini ditulis berdasarkan pada pengalaman penulis dalam melakukan pengembangan sistem kalibrasi termometer radiasi kelas industri serta dalam melakukan pelayanan kalibrasi termometer inframerah dari industri.

Pada saat ini belum ada literatur dalam bahasa Indonesia yang secara khusus membahas tentang termometer inframerah, dengan demikian mudah-mudahan kehadiran buku ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca, peminat dan pengguna termometer inframerah, khususnya para pelaksana teknis di industri, laboratorium kalibrasi dan pengujian serta para dosen dan mahasiswa teknik di perguruan tinggi.

Puspiptek, Agustus 2015
Kepala Pusat Penelitian Metrologi LIPI

Dr. Mego Pinandito, M.Eng.

PRAKATA

Berdasarkan informasi yang dikeluarkan oleh Komite Akreditasi Nasional-Badan Standardisasi Nasional (KAN-BSN), pada tahun 2014 laboratorium kalibrasi yang telah diakreditasi berjumlah 159 laboratorium dengan jenis lingkup kalibrasi yang bervariasi. Beberapa di antaranya memiliki lingkup kalibrasi suhu, termasuk di dalamnya kalibrasi termometer inframerah. Namun, berdasarkan pengamatan pada saat melakukan *assessment*, laboratorium kalibrasi tersebut pada umumnya belum memiliki SDM yang cukup paham mengenai termometer inframerah. Hal ini dimungkinkan bisa memengaruhi interpretasi kualitas hasil kalibrasi.

Literatur mengenai termometer inframerah yang ditulis dalam bahasa Indonesia, baik berupa buku yang dijual di toko buku maupun yang bisa diunduh dari internet belum ada. Hal ini mungkin menjadi salah satu kendala dalam mempelajari termometer inframerah, baik untuk teknisi di laboratorium kalibrasi maupun para peneliti di universitas/industri.

Kenyataan ini mendorong penulis untuk menulis buku mengenai termometer inframerah dalam bahasa Indonesia. Materi yang disampaikan masih terbatas untuk memenuhi kebutuhan para pelaku kalibrasi termometer inframerah, seperti yang tercermin secara khusus pada bab terakhir buku ini. Namun, teori dasar dari buku ini bisa memberikan pemahaman awal kepada para pembaca yang tertarik tentang termometer radiasi secara umum atau termometer

inframerah secara khusus. Sebagian materi yang disajikan berdasarkan pengalaman penulis dalam melayani permintaan kalibrasi termometer inframerah di bidang industri dari tahun 1990-an hingga sekarang.

Seluruh materi pada buku ini telah disusun sedemikian rupa sehingga diharapkan bisa memudahkan para pembaca untuk memahami isi buku ini. Materi yang pertama disampaikan pada buku ini adalah tentang radiasi panas yang dipancarkan oleh benda. Pemahaman yang benar tentang radiasi panas benda merupakan dasar untuk memahami cara kerja termometer radiasi atau inframerah serta untuk memahami karakteristik benda-hitam praktis. Termometer radiasi dan benda-hitam praktis merupakan dua hal yang berkaitan, khususnya pada proses kalibrasi termometer radiasi. Uraian tentang radiasi panas benda ditulis pada Bab 2 tentang Emisi Radiasi Panas dari Benda.

Uraian selanjutnya adalah termometer inframerah. Pada bab ini diuraikan tentang konstruksi, karakteristik, dan persamaan pengukuran yang dimiliki termometer inframerah pada umumnya. Semua uraian ini disajikan pada Bab 3 tentang Termometer Inframerah.

Sebelum menguraikan materi utama dari tulisan ini, yaitu pembahasan mengenai kalibrasi termometer inframerah, uraian didahului dengan tulisan tentang teori ketidakpastian. Ketidakpastian Pengukuran yang dibahas dalam Bab 4 diharapkan dapat mengantarkan pembaca untuk, memahami persamaan ketidakpastian yang muncul pada uraian tentang kalibrasi termometer inframerah.

Tulisan yang berisi tentang kalibrasi termometer inframerah disajikan pada Bab 5 buku ini. Pada bab ini ditulis beberapa hal penting dalam proses kalibrasi termometer inframerah, di antaranya tentang media kalibrasi, termometer standar, dan persamaan kalibrasi termometer inframerah.

Buku ini penulis persembahkan untuk istri tersayang, Wawat Waliyati, dan rekan-rekan di Laboratorium Metrologi Suhu Puslit Metrologi-LIPI atas dorongan moril dalam upaya penulisan buku ini. Selain itu, buku ini juga penulis persembahkan untuk Dr. Peter

Saunders dari MSL-Selandia Baru sebagai ungkapan rasa terima kasih atas segala saran dan bantuan beliau selama ini.

Mudah-mudahan upaya kecil ini dapat menjadi sumbangsih bagi perkembangan metrologi suhu di Indonesia, khususnya termometer inframerah. Selain itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari berbagai pihak untuk perbaikan buku ini. Semoga Allah Swt. meridai upaya penulis ini. Aamin.

Pamulang, Februari 2015

Penulis

BAB 1

Pendahuluan

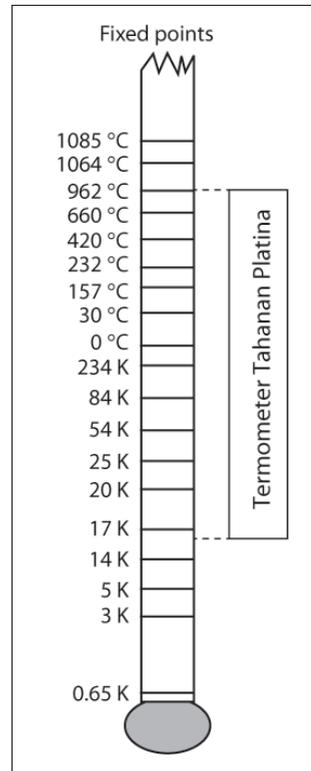
A. LATAR BELAKANG

Sejauh ini suhu merupakan salah satu parameter yang banyak diukur, baik di lingkungan industri, penelitian, maupun pendidikan. Pengukuran suhu yang teliti sering kali menjadi syarat utama terjadinya suatu proses yang diinginkan. Sebagai contoh, suatu pabrik yang memproduksi komponen untuk industri otomotif harus menghasilkan produk berkualitas. Untuk menghasilkan produk seperti itu, selama proses produksi beberapa parameter harus dipantau secara terus-menerus, dan salah satu di antaranya adalah suhu dari komponen tersebut. Untuk memantau suhu komponen digunakan suatu termometer dengan rentang ukur dan ketelitian tertentu, yang disesuaikan dengan kebutuhan yang diperlukan. Bila penunjukan termometer berbeda dari yang seharusnya dan melewati batas ambang toleransi yang berlaku, komponen yang dihasilkan menjadi tidak sesuai dengan spesifikasi komponen yang disyaratkan. Dengan demikian, ada korelasi antara ketelitian pengukuran suhu dan kualitas produksi.

Ketelitian yang ditunjukkan oleh termometer bergantung pada kualitas termometer yang digunakan. Adapun kualitas termometer dapat diketahui secara objektif dengan melihat sertifikat kalibrasinya yang memberikan gambaran seberapa besar nilai koreksi dan nilai ketidakpastiannya. Termometer dengan kualitas yang baik memiliki nilai koreksi dan ketidakpastian yang kecil.

Cara pengukuran suhu yang biasa digunakan ada dua jenis, yaitu cara kontak dan nonkontak. Pada cara kontak, termometer bersentuhan langsung dengan target ukur sehingga terjadi aliran panas secara konduksi dari target ukur ke termometer. Untuk memperoleh hasil pengukuran yang teliti harus dibuat suatu kontak termal yang baik antara termometer dan target ukur sehingga yang terukur oleh termometer hanya suhu target ukur saja, tidak disertai dengan suhu benda yang lain. Karena bersentuhan langsung dengan target ukur, hasil pengukuran dari termometer dapat menggambarkan secara teliti suhu yang sesungguhnya dari target ukur, namun kemungkinan dapat menyebabkan terjadinya kontaminasi pada sensor termometer terutama bila sering dipakai pada kemampuan ukur maksimumnya. Hal ini dapat menyebabkan menurunnya kemampuan ukur termometer kontak, bahkan dapat pula menyebabkan kerusakan pada termometer tersebut.

Termometer yang bekerja berdasarkan cara kontak disebut termometer kontak, beberapa di antaranya adalah termometer gelas (*liquid in glass thermometer*), termokopel, dan termometer tahanan platina. Di antara ketiga termometer kontak tersebut, termometer tahanan platina merupakan termometer yang paling teliti sehingga dijadikan sebagai termometer interpolasi pada ITS-90 (*The International Temperature Scale of 1990*) untuk rentang suhu antara 17 K dan 962°C, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1 (Nicholas dan White 2005).



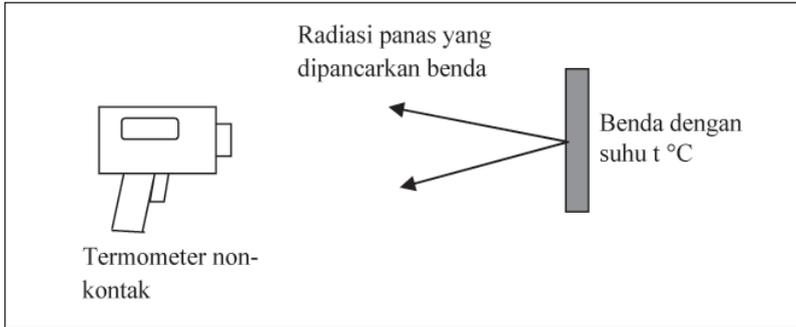
Gambar 1.1 Rentang Suhu ITS-90 yang Dicakup Termometer Tahanan Platina.

Dengan demikian, untuk pengukuran suhu yang teliti biasanya digunakan termometer tahanan platina. Sebagai contoh, Pt-100 adalah termometer tahanan platina yang populer di kalangan industri karena ketelitiannya yang tinggi. Akhir-akhir ini, penggunaan termometer tahanan platina meningkat dibandingkan termometer gelas karena pengukurannya lebih sederhana dan hasilnya dapat disimpan serta diolah secara elektronik. Namun, termometer tahanan platina memiliki kelemahan, yaitu rentang ukur yang relatif sempit sehingga tidak bisa digunakan sebagai kalibrator untuk termometer yang memiliki rentang ukur di atas suhu 962°C . Sebagai contoh, termometer tahanan platina tidak bisa digunakan untuk mengkalibrasi seluruh rentang ukur dari termokopel tipe S, karena rentang ukur termokopel tipe-S adalah $0\text{-}1760^{\circ}\text{C}$.

Pada kondisi tertentu, pengukuran suhu dengan cara kontak ternyata tidak dapat dilakukan, yaitu bila target ukur bergerak atau bergetar sehingga termometer tidak bisa membuat kontak termal yang baik dengan target ukur tersebut. Selain itu, ada beberapa kondisi lain yang menyebabkan termometer kontak tidak bisa digunakan dengan baik, di antaranya,

1. Posisi target ukur yang sulit dijangkau.
2. Suhu target ukur terlalu tinggi sehingga bila diukur dengan termometer kontak, kemungkinan akan menyebabkan termometer tersebut rusak.
3. Suhu suatu benda perlu diketahui tanpa harus disentuh dengan termometer, karena dengan disentuh termometer, benda tersebut akan berubah sifatnya atau terkontaminasi.

Bila cara kontak tidak dimungkinkan, sebagai gantinya bisa digunakan cara nonkontak. Cara termometer nonkontak bekerja berdasarkan kenyataan bahwa setiap benda yang suhunya di atas 0 K ($-273,15^{\circ}\text{C}$) akan mengemisikan radiasi panas yang besarnya sebanding dengan suhu benda tersebut.



Gambar 1.2 Skema Pengukuran Suhu dengan Termometer Nonkontak

Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1.2, benda dengan suhu $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ akan memancarkan radiasi panas yang besarnya sebanding dengan suhu $t\text{ }^{\circ}\text{C}$. Termometer nonkontak akan mengukur radiasi panas tersebut dan mengubahnya menjadi besaran suhu yang ditampilkan pada layar peraga (*display*) termometer tersebut. Termometer yang bekerja secara nonkontak tersebut adalah termometer radiasi. Adapun termometer radiasi yang umum digunakan di lingkungan industri memiliki spesifikasi yang berbeda dengan termometer radiasi yang digunakan di lingkungan laboratorium. Beberapa ciri spesifik dari termometer radiasi industri ini di antaranya sebagai berikut.

1. Umumnya berbentuk *handheld* dengan dilengkapi *display* yang menampilkan nilai suhu dalam $^{\circ}\text{C}$ atau $^{\circ}\text{F}$ (*direct reading thermometer*).
2. Detektor radiasi panas yang digunakan pada umumnya termal detektor dengan kepekaan berada pada daerah inframerah (*infrared*), misalnya antara $8\text{ }\mu\text{m}$ dan $14\text{ }\mu\text{m}$.
3. Memiliki ketelitian antara 0,1% dan 1% dari nilai pembacaan.

Termometer radiasi industri tersebut pada umumnya bekerja pada daerah panjang gelombang inframerah, sehingga termometer ini lebih sering disebut termometer inframerah. Contoh termometer inframerah ditunjukkan pada Gambar 1.3.

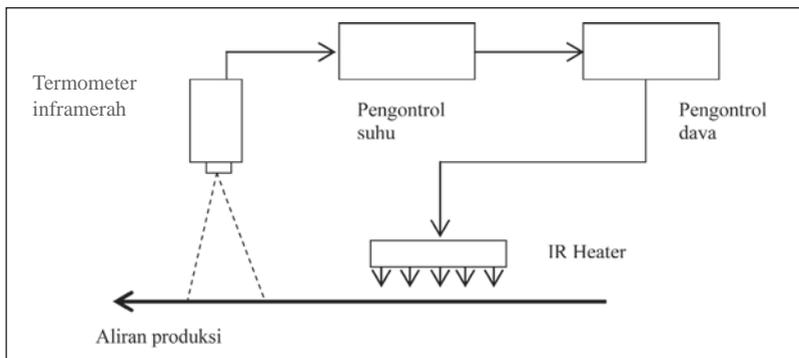
Contoh berikut adalah aplikasi cara nonkontak untuk kondisi apabila cara kontak tidak bisa digunakan. Pada Gambar 1.4 ditunjukkan proses pengeringan suatu produk di industri. Besar kecilnya panas yang diberikan pada produk bergantung suhu produk tersebut sehingga besarnya suhu produk harus selalu dipantau agar panas yang diberikan sesuai dengan



Sumber: Fluke 1995

Gambar 1.3 Termometer Inframerah

tingkat kekeringan produk yang diinginkan. Bila pada pemantauan suhu digunakan termometer kontak maka tidak ada kontak termal yang baik antara termometer dan produk tersebut sehingga hasil pemantauannya menjadi tidak teliti. Hal ini akan menyebabkan besarnya panas yang diberikan pada produk tidak sesuai dengan tingkat kekeringan yang dibutuhkan oleh produk tersebut. Selain itu, dengan adanya kontak langsung antara termometer dan produk yang bergerak dapat menyebabkan terjadinya kerusakan, baik pada produk tersebut maupun pada termometer. Dengan demikian, pada kondisi seperti ini termometer yang cocok digunakan adalah termometer nonkontak, misalnya termometer inframerah.



Gambar 1.4 Pengukuran Suhu Benda yang Bergerak

Contoh lainnya adalah pengukuran suhu suatu benda yang berada pada lokasi yang sulit dijangkau (Gambar 1.5). Karena suatu alasan, suhu sambungan kawat listrik tegangan tinggi perlu diketahui, namun sambungan tersebut berada pada menara jaringan listrik yang tingginya belasan meter di atas tanah. Satu hal yang menyulitkan bila diukur dengan menggunakan termometer kontak karena lokasinya yang sulit dijangkau dan berbahaya. Cara mengukur yang lebih mudah dan aman adalah dengan menggunakan termometer nonkontak.



Sumber: De Witt 1985

Gambar 1.5 Pengukuran Suhu Benda yang Posisinya Sulit Dijangkau

B. PENGGUNAAN TERMOMETER INFRAMERAH

Termometer inframerah, khususnya di negara maju, sudah digunakan untuk berbagai keperluan, misalnya untuk memantau panas makanan di dapur suatu restoran (Gambar 1.6), membantu mekanik dalam pemeliharaan dan perbaikan mesin (Gambar 1.7), memantau suhu trafo di industri (Gambar 1.8), dan mendeteksi adanya sambungan yang lepas pada suatu sistem elektrik.



Sumber: Fluke 1995

Gambar 1.6 Penggunaan Termometer Inframerah di Dunia Kuliner



Gambar 1.7 Penggunaan Termometer Inframerah pada Pemeliharaan dan Perbaikan Mesin Mobil



Gambar 1.8 Penggunaan Termometer Inframerah pada Identifikasi Panas Trafo

Penggunaan termometer inframerah di Indonesia sudah lazim, khususnya untuk suhu di bawah 600°C . Indikatornya dapat dilihat dengan banyaknya permintaan kalibrasi termometer inframerah pada Puslit Metrologi-LIPI. Kecenderungan ini dirasakan pula oleh laboratorium kalibrasi sehingga beberapa laboratorium memasukkan pelayanan kalibrasi termometer inframerah pada lingkup kalibrasi yang dimilikinya.

Penggunaan termometer inframerah merupakan suatu hal yang masih membingungkan, baik pada saat digunakan pengukuran suhu maupun saat dikalibrasi. Pada umumnya, kebingungan tersebut muncul ketika melihat hasil ukur termometer inframerah yang selalu berubah-ubah bila jarak ukurnya juga berubah sehingga muncul pertanyaan tentang jarak yang benar antara termometer inframerah dan objek ukur agar diperoleh hasil ukur yang benar. Kebingungan ini akan hilang bila beberapa parameter sudah dipahami perannya pada

pengukuran suhu, di antaranya emisivitas dan jarak ukur. Termometer inframerah akan menunjukkan hasil ukur yang salah bila emisivitas termometer tersebut tidak diubah sama dengan emisivitas benda yang diukur. Dengan demikian, sebelum melakukan pengukuran, emisivitas target ukur harus terlebih dahulu diketahui. Bila emisivitas target ukur telah diketahui maka emisivitas termometer inframerah diubah menjadi sama dengan emisivitas target ukur tersebut. Nilai emisivitas suatu benda bisa diperoleh dari tabel emisivitas benda yang tercantum pada buku manual termometer inframerah tersebut. Pada Tabel 1.1 diperlihatkan contoh emisivitas dari beberapa logam untuk termometer inframerah produk dari Raytek. Nilai emisivitas pada tabel suatu termometer inframerah hanya berlaku untuk termometer inframerah tersebut. Apabila nilai emisivitas suatu target ukur tidak terdapat pada tabel maka emisivitas target ukur tersebut harus diketahui dengan cara diukur.

Tabel 1.1 Contoh Nilai Emisivitas Benda

Jenis Bahan	Respons Spektral, μm			
	1,0	5,0	7,9	8–14
Asbes	0,9	0,9	0,95	0,95
Aspal	n.r.	0,9	0,95	0,95
Basalt	n.r.	0,7	0,7	0,7
Karbon				
Tidak dioksidasi	0,8–0,95	0,8–0,9	0,8–0,9	0,8–0,9
Grafit	0,8–0,9	0,7–0,9	0,7–0,8	0,7–0,8
Karborundum	n.r.	0,9	0,9	0,9
Keramik	0,4	0,85–0,95	0,95	0,95
Tanah liat	n.r.	0,85–0,95	0,95	0,95
Beton	0,65	0,9	0,95	0,95
Kain	n.r.	0,95	0,95	0,95
Gelas				
Piring	n.r.	0,98	0,85	0,85

n.r. = tidak direkomendasikan (*not recommended*)

Sumber: Raytek. tt.

Selanjutnya, dalam melakukan pengukuran, termometer inframerah harus ditempatkan pada jarak yang sesuai dengan medan pandang dari sistem optik yang dimiliki oleh termometer inframerah tersebut. Medan pandang termometer inframerah merupakan suatu hubungan yang tetap antara jarak ukur dan ukuran target ukur, yang dinyatakan dengan nilai perbandingan antara jarak ukur dan diameter target ukur atau biasa disebut *distance to spot size* (lihat Bab 3. Termometer Inframerah). Besarnya perbandingan tersebut bergantung pada sistem optik termometer inframerah, ada termometer inframerah yang memiliki *distance to spot size* 10:1 dan ada pula yang memiliki *distance to spot size* 30:1. Dengan diketahui besarnya *distance to spot size* dari suatu termometer inframerah maka untuk target ukur yang ukurannya telah diketahui dapat ditentukan jarak ukur termometer inframerah terhadap target ukur tersebut.

Dengan memahami peran dari kedua parameter tersebut terhadap kinerja termometer inframerah diharapkan akan membantu pengguna dalam mengoperasikan termometer inframerah dengan baik dan benar.

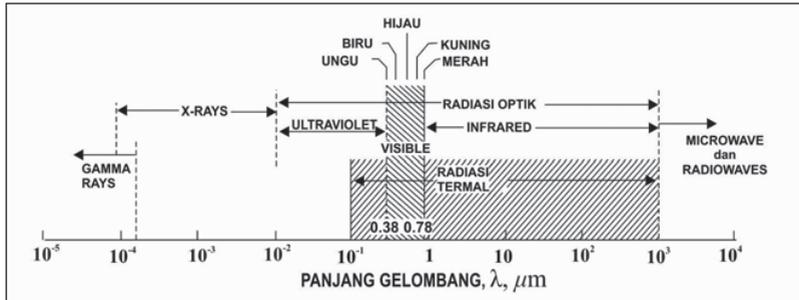
Bab 2

Emisi Radiasi Panas dari Benda

A. RADIASI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK

Setiap benda yang bersuhu di atas 0 kelvin ($0\text{ K} = -273,15^\circ\text{C}$) akan mengemisikan energi internalnya (*sensible internal energy*) ke semua arah. Emisi energi ini disebut radiasi. Ada dua teori yang menerangkan tentang fenomena radiasi dari benda. Satu teori memandang radiasi sebagai perambatan sekumpulan partikel yang disebut foton atau *quanta*. Sementara itu, pada pandangan yang lain, radiasi dianggap sebagai perambatan gelombang elektromagnetik sehingga disebut sebagai radiasi elektromagnetik. Walaupun memiliki sudut pandang yang berbeda, selama ini kedua teori tersebut telah digunakan untuk menggambarkan emisi dan perambatan radiasi.

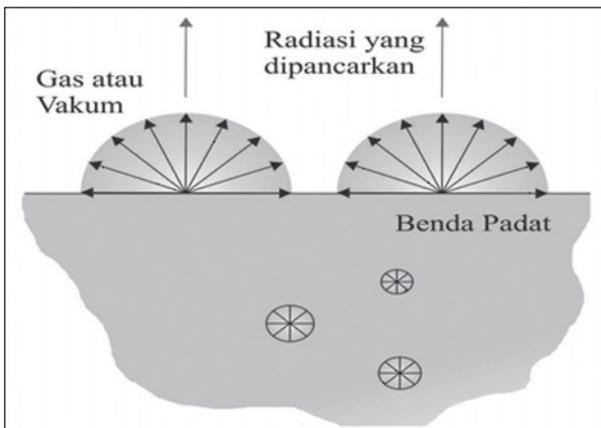
Pada saat radiasi dianggap sebagai gelombang elektromagnetik, radiasi dari suatu benda yang bersuhu T dianggap mengemisikan radiasi pada semua panjang gelombang dari 0 sampai dengan ∞ .



Gambar 2.1 Spektrum Radiasi Gelombang Elektromagnetik

Pada Gambar 2.1 ditunjukkan pembagian (*subdivision*) radiasi pada spektrum gelombang elektromagnetik. Bagian dari radiasi elektromagnetik yang berada pada rentang panjang gelombang antara $0,1 \mu\text{m}$ sampai dengan $1.000 \mu\text{m}$ dikenal sebagai radiasi panas (*thermal radiation*) (DeWitt dan Nutter 1988).

Pada bab ini yang akan dibahas hanyalah salah satu bagian dari gelombang elektromagnetik, yaitu tentang radiasi panas sehingga apa yang diuraikan dalam bab ini tidak berlaku pada radiasi elektromagnetik yang lain. Elektron, atom dan molekul semua benda padat, cair, dan gas di atas suhu nol mutlak ($-273,15^\circ\text{C}$) bergerak dengan kecepatan konstan sehingga radiasi diemisikan dengan kecepatan konstan. Demikian pula halnya dalam penyerapan atau transmisi melalui seluruh volume materi. Radiasi merupakan suatu fenomena volumetrik (*volumetric phenomenon*). Namun, untuk benda padat yang tidak transparan (*opaque*) seperti logam, kayu, dan batu, radiasi dianggap sebagai suatu fenomena permukaan (*surface phenomenon*) karena radiasi yang diemisikan hanya oleh molekul-molekul pada permukaan, yaitu molekul yang bisa keluar dari bagian dalam benda padat dan menempati permukaan benda padat tersebut. Lihat Gambar 2.2 (Yunus 2002).

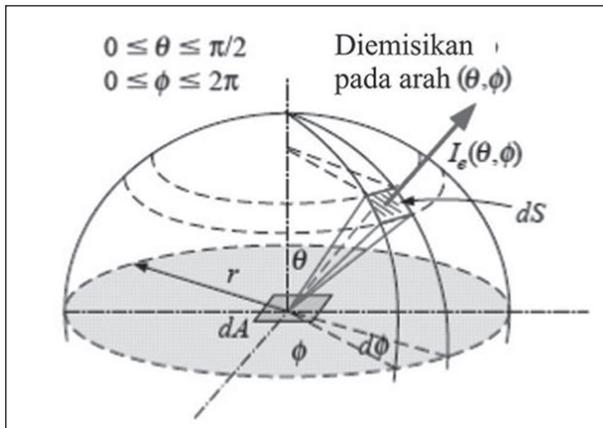


Gambar 2.2 Fenomena Permukaan pada Benda Padat

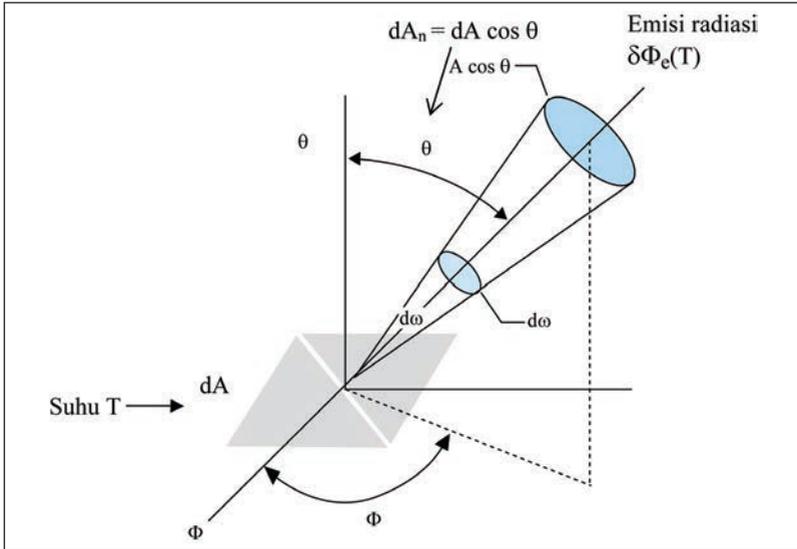
Perlu dicatat bahwa karakteristik radiasi dari suatu permukaan dapat diubah seluruhnya dengan melapisi permukaan tersebut dengan beberapa lapisan tipis (*coating*), namun besarnya radiasi akan berbeda untuk arah yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan suatu kuantitas yang menggambarkan besarnya radiasi yang diemisikan pada arah tertentu dalam ruang. Kuantitas ini adalah intensitas radiasi yang dalam termometri radiasi biasa disebut radianansi dengan simbol L_e .

Karena radiasi diemisikan pada ruang setengah bola, arah radiasi yang melewati sebuah titik paling tepat digambarkan dalam koordinat bola dengan sudut zenith θ dan sudut azimut ϕ , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Besarnya radianansi didefinisikan sebagai laju (*rate*) energi radiasi yang diemisikan permukaan pada suhu T , dan merambat melalui satu satuan luas tegak lurus pada arah rambatan, per satuan sudut ruang (*solid angle*) yang dibentuk oleh arah berkas radiasi.



Gambar 2.3 Penggunaan Sistem Koordinat Bola untuk Menggambarkan Radianansi



Gambar 2.4 Skema Definisi Radiansi

Definisi radiansi dapat digambarkan secara skematis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 (DeWitt dan Nutter 1988). Bila $\delta\Phi_e(T)$ adalah jumlah laju energi yang dipancarkan permukaan dA , dalam satuan watt maka besarnya radiansi adalah

$$L_e(\theta, \phi, T) = \frac{\delta\Phi_e(T)}{dA_n \cdot d\omega} = \frac{\delta\Phi_e(T)}{dA \cdot \cos\theta \cdot d\omega} \quad (2.1)$$

dengan:

dA_n = bidang yang tegak lurus arah rambatan

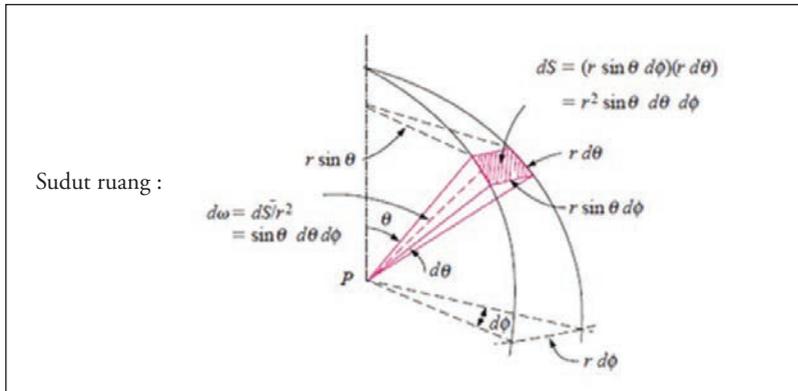
$d\omega$ = sudut ruang, steradian.

$\cos\theta$ = sudut ruang, steradian.

Dari Persamaan (2.1) terlihat bahwa besarnya radiansi merupakan fungsi dari arah (θ, ϕ) dan suhu (T). Berdasarkan definisinya, satuan dari radiansi adalah $W \cdot m^{-2} \cdot str^{-1}$, dan $|a|$, yaitu besarnya luas permukaan bola yang ditembus oleh emisi radiasi dibagi dengan kuadrat panjang jari-jari bola tersebut. Gambar 2.5 memperlihatkan representasi sudut ruang yang dilengkapi dengan beberapa nilai di-

mensi yang bisa digunakan untuk menghitung besarnya sudut ruang. Bila mengacu pada Gambar 2.5 maka besarnya sudut ruang adalah

$$d\omega = \frac{dS}{r^2} = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi \quad (2.2)$$



Gambar 2.5 Representasi Sudut Ruang (*Solid Angle*)

Bila Persamaan (2.2) disubstitusikan ke Persamaan (2.1) maka rumus radiansi menjadi

$$L_e(\theta, \phi, T) = \frac{\delta \Phi_e(T)}{dA \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\phi} \quad (2.3)$$

Variasi radiasi panas terhadap panjang gelombang adalah ekspresi besarnya radiasi panas pada panjang gelombang tertentu atau per unit panjang gelombang dalam suatu interval tertentu. Secara umum, untuk menekankan ketergantungan suatu besaran pada panjang gelombang maka besaran tersebut disebut besaran spektral. Kata “spektral” digunakan untuk menunjukkan “pada panjang gelombang tertentu”. Dengan demikian, radiansi spektral pada interval $d\lambda$ di sekitar panjang gelombang λ dari suatu permukaan dA yang bersuhu T dan mengemisikan radiasi dengan laju $\delta\Phi_e(T)$ pada arah (θ, ϕ) adalah

$$L_e(\theta, \phi, \lambda, T) = \frac{\delta \Phi_e(T)}{dA_n \cdot d\omega \cdot d\lambda} = \frac{\delta \Phi_e(T)}{dA_n \cdot \cos\theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (2.4)$$

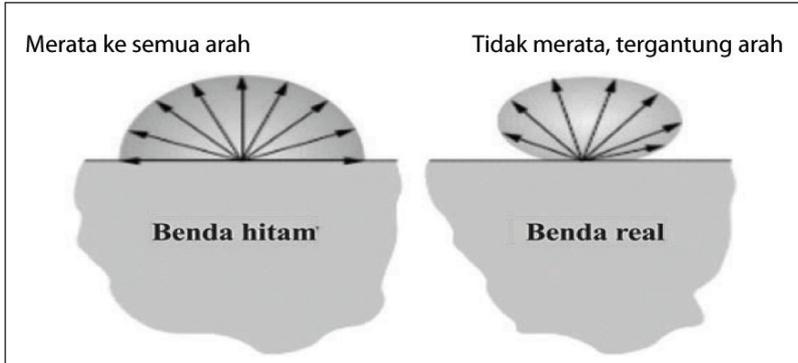
sehingga radiansi spektral memiliki satuan $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{str}^{-1}$.

Jumlah energi radiasi yang diemisikan dari suatu permukaan pada panjang gelombang bergantung pada jenis material serta kondisi dari permukaan tersebut. Dengan demikian, benda yang berbeda akan mengemisikan jumlah radiasi per satuan luas permukaan yang berbeda pula, bahkan pada benda-benda yang memiliki suhu yang sama. Oleh karena itu, wajar jika ingin mengetahui jumlah radiasi maksimum yang dapat diemisikan oleh permukaan pada suhu tertentu. Untuk memuaskan keingintahuan ini, perlu didefinisikan suatu benda imajiner yang memiliki sifat ideal, yang disebut benda-hitam (*blackbody*), yang dapat digunakan sebagai acuan untuk sifat radiasi permukaan riil.

B. BENDA-HITAM (*BLACKBODY*)

Benda-hitam adalah permukaan ideal/teoretis yang memiliki sifat-sifat tertentu (DeWitt dan Nutter 1988), yaitu

1. Menyerap seluruh radiasi yang jatuh padanya, untuk semua panjang gelombang dan arah datangnya radiasi (*perfect absorber*).
2. Pada suhu dan panjang gelombang yang sama, benda-hitam mengemisikan radiasi lebih besar daripada benda riil (*perfect emitter*).
3. Radiasi panas yang diemisikan memiliki besar yang sama pada setiap arah pancaran (*isotropically diffuse emitter*), seperti yang diperlihatkan secara skematis pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Besarnya Radiasi Benda-Hitam Tidak Bergantung pada Arah Emisi

Karena radiasi benda-hitam tidak bergantung pada arah emisi maka radiansi spektral ke semua arah besarnya sama sehingga nilainya hanya bergantung pada suhu dan panjang gelombang, dan simbol radiansi $L_e(\theta, \phi, \lambda, T)$ diubah menjadi $L_b(\lambda, T)$, dengan indeks b menunjukkan benda-hitam (*blackbody*) sebagai sumber radiasi panas. Dengan menggunakan mekanika kuantum, Mac Planck telah merumuskan hubungan antara suhu benda-hitam dan radiasi panas yang diemisikannya (Nicholas dan White 2005), seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2.5).

$$L_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2.5)$$

dengan:

λ = panjang gelombang radiasi panas, μm

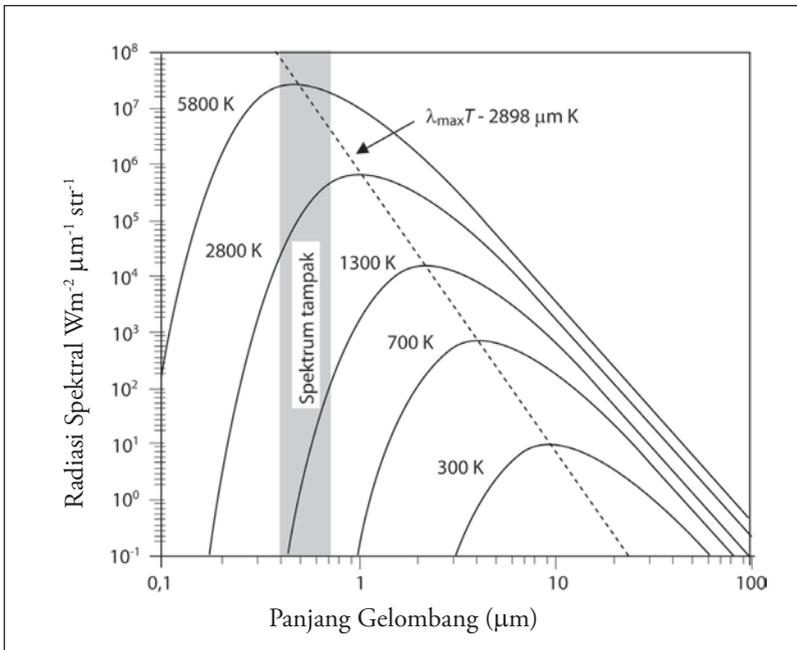
T = suhu benda-hitam, K

$L_b(\lambda, T)$ = radiansi benda-hitam pada panjang gelombang λ dan suhu T , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}\cdot\text{str}^{-1}$

c_1 = konstanta Planck pertama = $1,19104282 \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{str}^{-1}$

c_2 = konstanta Planck kedua = $0,014388 \text{ m}\cdot\text{K} = 14.388 \mu\text{m}\cdot\text{K}$

Sebagai penyerap sempurna (*perfect absorber*) dan emiter sempurna (*perfect emitter*), benda-hitam merupakan suatu radiator panas ideal. Tak ada benda lain yang memiliki sifat yang persis sama dengan benda-hitam. Berdasarkan Persamaan (2.5), untuk suatu nilai T tertentu, nilai radiansi hanya merupakan fungsi panjang gelombang λ semata sehingga dapat dibuat grafik dari Persamaan (2.5), seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.7 (Nicholas dan White 2005).



Gambar 2.7 Grafik Radiansi Benda-Hitam terhadap Panjang Gelombang

Pada Gambar 2.7 diperlihatkan hubungan antara-radiansi terhadap panjang gelombang untuk beberapa nilai suhu. Setiap nilai suhu memiliki sebuah kurva yang merupakan fungsi panjang gelombang. Sebagai contoh, benda-hitam dengan suhu 1.300 K atau sekitar 1.027°C memiliki kurva yang meliputi daerah ultraviolet, sinar tampak, dan inframerah (*infrared*), dengan nilai radiansi maksimumnya pada sekitar panjang gelombang 2 μm . Sementara itu, pada suhu

2.800 K, nilai radiansi maksimumnya berada pada sekitar panjang gelombang 1 μm . Pada Gambar 2.7 juga diperlihatkan bahwa semakin besar nilai suhunya maka panjang gelombang untuk radiansi maksimum bergeser menuju panjang gelombang yang lebih pendek. Besarnya panjang gelombang, λ_{maks} , yang berkaitan dengan radiansi maksimum mengikuti suatu hukum fisika yang disebut Hukum Pergeseran Wien, yang dinyatakan dengan Persamaan (2.6).

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{2898}{T} \mu\text{m} \quad (2.6)$$

dengan:

T = suhu radiasi panas benda-hitam, K.

Contoh 2.1

Pada panjang gelombang berapa benda-hitam dengan suhu 700 K akan memancarkan radiasi panas maksimum? Dan berapa besarnya radiansi maksimum tersebut?

Penyelesaian:

$$\lambda_{\text{maks}} = \frac{2898}{T} = \frac{2898}{700} = 4.14 \mu\text{m}$$

Radiansi maksimum:

$$L_b(\lambda_{\text{maks}}, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_{\text{maks}} \cdot T}\right) - 1 \right]}$$

$$L_b(4,14, 700)$$

$$= \frac{1,19104282.1 \cdot 10^8}{(4,14)^5 \left[\exp\left(\frac{14388}{4,14 \cdot 700}\right) - 1 \right]}$$

$$= 688,3046, \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{str}^{-1}$$

Radiansi pada Persamaan (2.5) adalah radiansi pada suhu T untuk satu nilai panjang gelombang dan biasa disebut radiansi spektral. Sedangkan radiansi pada suhu T untuk seluruh panjang gelombang disebut radiansi total benda-hitam pada suhu T , dengan simbol $L_b(T)$. Radiansi total yang dimaksud dapat diperoleh dengan mengintegrasikan Persamaan (2.5) terhadap seluruh panjang gelombang sehingga diperoleh

$$L_b(T) = \int_0^{\infty} L_b(\lambda, T) d\lambda = \frac{\sigma}{\pi} T^4 \quad (2.7)$$

dengan:

T = suhu benda-hitam, K

$L_b(T)$ = radiansi total benda-hitam pada suhu T , $W.m^{-2}$

σ = konstanta Stefan-Boltzmann = $5,67051 \cdot 10^{-8}$, $W.m^{-2}.K^{-4}$

Persamaan (2.7) dikenal sebagai Hukum Radiasi Panas Stefan-Boltzmann.

Contoh 2.2

Berapakah radiansi total dari benda-hitam pada suhu 700 K?

Penyelesaian:

$$L_b(T) = \frac{\sigma}{\pi} T^4$$

$$\begin{aligned} L_b(700) &= \frac{5,67051 \cdot 10^{-8}}{\pi} (700)^4 \\ &= 4333,576 W.m^{-2} \end{aligned}$$

Sedangkan energi total per satuan luas yang dipancarkan benda-hitam pada suhu T adalah

$$M_b(T) = \pi \cdot L_b(T) = \sigma T^4 \quad (2.8)$$

dengan:

$M_b(T)$ = energi total benda-hitam per satuan luas pada suhu T , $W. m^{-2}$

Untuk suhu di atas 700 K (lihat Gambar 2.7), atau sekitar 500°C, panjang gelombang radiansi maksimum, λ_{maks} , semakin menjauhi daerah inframerah. Dan, karena pertimbangan kemudahan dalam pengolahan data, untuk suhu di atas 500°C nilai λ yang digunakan didekati dengan λ yang lebih kecil daripada λ_{maks} , namun hal ini menyebabkan Hukum Mac Planck menjadi tidak berlaku lagi. Pendekatan yang dilakukan oleh Wien adalah dengan menghilangkan angka 1 pada persamaan radiasi panas Mac Planck (Persamaan (2.5)) sehingga menjadi

$$L_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) \right]} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) dikenal sebagai Hukum Radiasi Panas Wien. Dari bentuk rumusnya, Hukum Radiasi Panas Wien memudahkan dalam cara mengoperasikan matematika dibandingkan Hukum Radiasi Panas Mac Planck. Apabila Hukum Radiasi Panas Wien ini digunakan pada suhu di atas 500°C maka kesalahan yang berasal dari pendekatannya kurang lebih sekitar 1% sehingga kesalahan tersebut dapat diabaikan.

C. BENDA NONBENDA-HITAM

Kemampuan suatu benda biasa untuk memancarkan radiasi panas pada suatu suhu dan panjang gelombang tertentu sama dengan radiasi panas yang dipancarkan oleh benda-hitam pada suhu dan panjang gelombang yang sama dikalikan dengan suatu parameter yang disebut emisivitas (*emisivity*) (DeWitt dan Nutter 1988) atau radiasi panas benda biasa = emisivitas × radiasi panas benda-hitam sehingga

$$\text{emisivitas} = \frac{\text{radiasi panas benda biasa}}{\text{radiasi panas benda - hitam}}$$

Terdapat dua jenis emisivitas, yakni emisivitas total (*total emissivity*) dan emisivitas spektral (*spectral emissivity*). Emisivitas total suatu benda didefinisikan sebagai perbandingan antara energi total per satuan luas yang dipancarkan benda tersebut dengan energi total benda-hitam pada suhu yang sama atau

$$\varepsilon = \frac{M}{M_b} = \frac{M}{\sigma T^4} \quad (2.10)$$

dengan:

ε = emisivitas total benda

M = energi total per satuan luas yang dipancarkan benda, $W.m^{-2}$

Energi total yang dipancarkan suatu benda yang memiliki emisivitas ε adalah

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.11)$$

Sedangkan emisivitas spektral, $\varepsilon(\lambda)$, dari suatu benda didefinisikan sebagai perbandingan antara radiansi benda tersebut dengan radiansi benda-hitam pada suhu dan panjang gelombang yang sama, yaitu

$$\varepsilon \lambda = \frac{L(\lambda, T)}{L_b(\lambda, T)} \quad (2.12)$$

dengan:

$L(\lambda, T)$ = radiansi benda, $W.m^{-2}.\mu m^{-1}.str^{-1}$

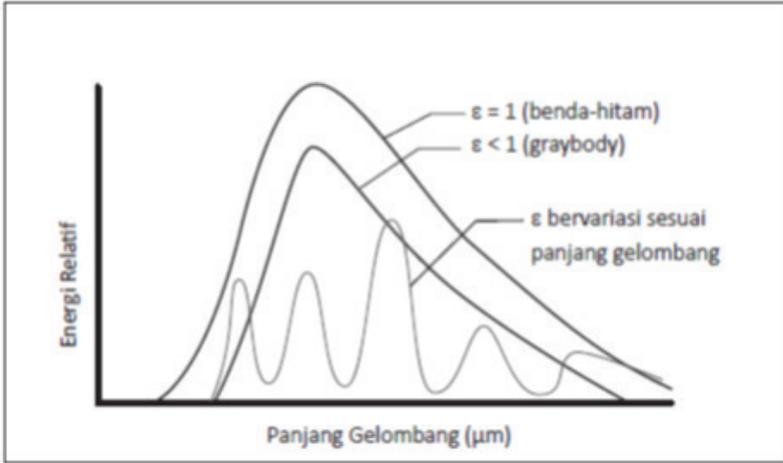
$L_b(\lambda, T)$ = radiasi panas benda-hitam, $W.m^{-2}.\mu m^{-1}.str^{-1}$

Karena $L(\lambda, T) < L_b(\lambda, T)$, emisivitas spektral benda biasa sebagai fungsi panjang gelombang nilainya lebih kecil daripada satu, atau $\varepsilon(\lambda) < 1$. Berbeda dengan benda biasa, emisivitas benda-hitam didefinisikan sama dengan satu, atau $\varepsilon_{bb} = 1$, untuk semua panjang gelombang. Dari Persamaan (2.12), dengan panjang gelombang λ dan suhu T , radiansi spektral yang dipancarkan oleh benda yang memiliki emisivitas spektral $\varepsilon(\lambda)$ adalah

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda)L_b(\lambda, T) \quad (2.13)$$

Suhu suatu benda dapat diketahui dari hasil pengukuran radiasi panas benda-hitam asalkan emisivitas $\epsilon(\lambda)$ dari benda tersebut diketahui. Minimnya informasi tentang nilai emisivitas suatu benda dapat menyebabkan terjadinya kesalahan pada pengukuran tersebut. Berbagai cara pengukuran dapat dilakukan untuk menentukan nilai emisivitas suatu benda, di antaranya melalui pengukuran dengan menggunakan termometer radiasi dan termometer kontak secara simultan. Selain itu dapat juga dilakukan dengan cara penaksiran, walaupun hasilnya kurang objektif. Pada umumnya, permukaan benda yang terlihat gelap dan kasar cenderung memiliki emisivitas yang besar (0,7 sampai dengan 1,0) dan permukaan benda yang berwarna terang dan halus cenderung memiliki emisivitas yang kecil (0,1 sampai dengan 0,4).

Notasi $\epsilon(\lambda)$ menunjukkan bahwa, pada umumnya, emisivitas permukaan benda bergantung pada panjang gelombang, namun ada dua benda yang memiliki emisivitas yang tidak bergantung pada panjang gelombang. Yang pertama adalah emisivitas benda-hitam yang sama dengan 1 untuk semua panjang gelombang. Yang kedua adalah *graybody* yang memiliki emisivitas yang konstan dan lebih kecil dari 1 untuk semua panjang gelombang. Ada beberapa material yang mendekati sifat dari *graybody*, yaitu beberapa jenis dari material grafit dan *carbon compound*, dan besi yang dioksidasi, yang memiliki emisivitas sekitar 0,8 pada suatu rentang panjang gelombang yang lebar. Pada Gambar 2.8 diperlihatkan kurva radiansi dari tiga jenis benda tersebut. Karena keduanya memiliki emisivitas yang tidak bergantung pada panjang gelombang maka benda-hitam dan *graybody* memiliki bentuk kurva yang serupa. Namun, karena memiliki emisivitas yang lebih kecil maka pada suhu yang sama *graybody* memiliki radiansi yang lebih kecil daripada radiansi benda-hitam sehingga kurva *graybody* berada di bawah kurva benda-hitam. Berbeda dengan benda-hitam dan *graybody*, karena emisivitasnya bergantung pada panjang gelombang maka bentuk kurva radiansi permukaan biasa memiliki bentuk tersendiri, seperti terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Kurva Radiansi dari Benda-Hitam, *Graybody*, dan Permukaan Biasa

Selain pengaruh dari panjang gelombang, terdapat pula faktor lain yang memengaruhi emisivitas, di antaranya:

1. Kondisi permukaan

Contohnya logam yang dipoles memiliki emisivitas yang lebih rendah dibandingkan bila permukaan logam tersebut dikasarkan atau dioksidasi (lihat Tabel 1.1).

2. Sudut pandang

Emisivitas bahan tidak berubah selama sudut pandang sekitar 45° terhadap normal.

3. Lebar pita (*bandwidth*) panjang gelombang

Emisivitas bahan tidak banyak berubah terhadap suhu bila digunakan termometer yang bekerja pada lebar-pita yang sempit.

Radiasi panas yang dipancarkan suatu benda yang memiliki emisivitas $\varepsilon(\lambda)$ dan suhu T_s sama dengan yang dipancarkan oleh benda-hitam pada suhu T_1 , di mana $T_1 < T_s$, atau

$$L_b(\lambda, T_1) = \varepsilon(\lambda)L_b(\lambda, T_s) \quad (2.14)$$

T_λ disebut sebagai suhu radiansi (*radiance temperature*) dari benda riil yang memiliki suhu T_s . Karena dalam pembuatannya termometer inframerah dikalibrasi terhadap benda-hitam, yang memiliki emisivitas mendekati satu, maka bila emisivitas termometer inframerah di set sama dengan 1, nilai suhu yang ditampilkan pada *display* termometer inframerah tersebut adalah suhu radiansi. Sementara nilai T_λ dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan Hukum Radiasi Panas Wien (Persamaan (2.9)) sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 L_b(\lambda, T_\lambda) &= \varepsilon(\lambda)L(\lambda, T_s) \\
 \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_s}\right) \right]} &= \varepsilon(\lambda) \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_\lambda}\right) \right]} \\
 \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_s}\right) \right]} &= \frac{\varepsilon(\lambda)}{\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_\lambda}\right) \right]} \\
 \varepsilon(\lambda) &= \exp\left[\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_\lambda} \right) \right] \\
 T_\lambda &= \left[\frac{1}{T_s} - \frac{\lambda}{c_2} \ln(\varepsilon(\lambda, T)) \right]^{-1} \tag{2.15}
 \end{aligned}$$

Dari Persamaan (2.15) dapat disimpulkan bahwa suhu radiansi merupakan fungsi dari panjang gelombang sehingga untuk suhu T_s yang sama, tetapi dengan panjang gelombang yang berbeda akan memberikan hasil yang berbeda pula.

Contoh 2.3

Diketahui suhu sebuah benda 800°C dengan emisivitas 0,95. Tentukan suhu radiansi benda tersebut untuk panjang gelombang 0,65 mm dan 0,9 mm!

Penyelesaian:

$$T_s = 800 + 273,15 = 1.073,15 \text{ K}$$

$$c_2 = \text{konstanta Planck kedua} = 0,014388 \text{ m.K}$$

$$\lambda = 0,65 \text{ mm} = 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$T_\lambda = \left[\frac{1}{T_s} - \frac{\lambda}{c_2} \ln(\varepsilon(\lambda, T)) \right]^{-1}$$

$$T_{0,65} = \left[\frac{1}{1073,15} - \frac{0,65 \cdot 10^{-6}}{0,014388} \ln(0,95) \right]^{-1} = 1070,488 \text{ K}$$

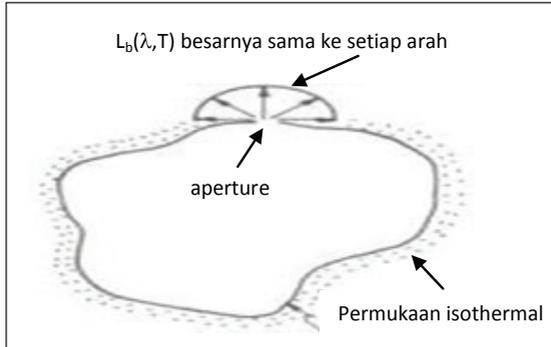
$$t_{0,65} = 1070,488 - 273,15 = 797,338^\circ\text{C}$$

$$T_{0,9} = \left[\frac{1}{1073,15} - \frac{0,9 \cdot 10^{-6}}{0,014388} \ln(0,95) \right]^{-1} = 1069,4676 \text{ K}$$

Dari contoh ini terlihat bahwa nilai suhu radiansi untuk panjang gelombang berbeda memiliki nilai yang berbeda. Semakin kecil panjang gelombang maka semakin besar nilai suhu radiansinya. Hal ini sesuai dengan yang diperlihatkan pada Gambar 2.7.

D. BENDA-HITAM PRAKTIS

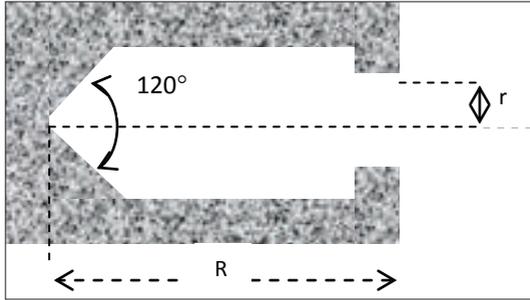
Sebagai penyerap panas sempurna (*perfect absorber*) dan pemancar panas yang sempurna (*perfect emitter*), benda-hitam merupakan radiator panas ideal. Tidak ada permukaan yang memiliki sifat yang persis sama dengan benda-hitam. Namun, benda-hitam dapat didekati dengan suatu bukaan (*aperture*) dari suatu rongga kedap cahaya (*opaque enclosure*) yang seluruh permukaan dalamnya memiliki suhu yang sama (*isothermal surface*). Skema rongga tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.9 (De Witt dan Nutter 1988). Benda-hitam praktis merupakan pendekatan dari benda-hitam ideal. Pendekatan ini mengacu pada dua sifat utama dari benda-hitam ideal, yaitu *perfect absorber* dan *perfect emitter*.



Gambar 2.9 Rongga Pendekatan Benda-Hitam

Untuk memenuhi kedua sifat utama tersebut maka bentuk benda-hitam praktis harus berrongga (*cavity*) mengikuti pola permukaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. Selain itu, supaya emisivitasnya tidak bergantung pada panjang gelombang maka sebagai bahan rongga yang dipilih adalah logam *graybody*, seperti grafit atau logam yang telah dioksidasi.

Agar radiasi yang masuk ke dalam rongga tidak ada yang memantul keluar rongga sehingga rongga dapat berfungsi sebagai *perfect absorber*, dimensi rongga dibuat sedemikian rupa sehingga memiliki jari-jari bukaan r yang relatif kecil bila dibandingkan kedalaman rongga R (lihat Gambar 2.10). Sebagai contoh, untuk memperoleh emisivitas sebesar 0,998 dengan emisivitas bahan 0,9 maka besarnya perbandingan antara r dan R adalah 1 berbanding 8. Bila nilai perbandingan tersebut dibuat semakin besar dan permukaan belakang rongga (*bottom surface*) dibuat membentuk sudut 120° maka proses refleksi yang terjadi di dalam rongga dapat mempersulit keluarnya radiasi yang telah masuk untuk keluar lagi melalui lubang rongga. Dengan demikian, nilai emisivitasnya semakin membesar dan mendekati satu sehingga semakin mendekati emisivitas benda-hitam ideal. Gambar 2.10 menunjukkan skema rongga benda-hitam, sedangkan pada Gambar 2.11 ditunjukkan contoh rongga benda-hitam.



Gambar 2.10 Skema Rongga Benda-Hitam (Blackbody Cavity)



Gambar 2.11 Contoh Rongga Benda-Hitam

Besarnya emisivitas rongga benda-hitam tersebut diestimasi berdasarkan persamaan (Nicholas dan White 2005).

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_s) \frac{r^2}{R^2} \quad (2.16)$$

dengan:

ε = emisivitas rongga benda-hitam

ε_s = emisivitas bahan

Persamaan (2.16) hanya menggunakan faktor dimensi rongga dan emisivitas bahan, sedangkan beberapa faktor lain belum diperhitungkan, di antaranya faktor refleksi yang mungkin terjadi pada

rongga dan faktor keseragaman suhu di sekeliling rongga benda-hitam.

Contoh 2.4.

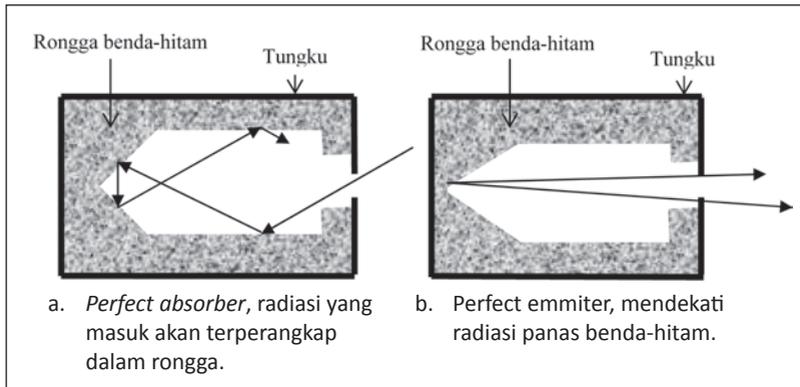
Estimasikan emisivitas rongga benda-hitam yang terbuat dari bahan Inconel yang permukaannya dikasarkannya dan dioksidasi, bila diameter bukaan $r = 0,5$ cm, panjang $R = 10$ cm dan emisivitas bahan $\epsilon_s = 0,9$

Penyelesaian:

$$\begin{aligned}\epsilon &= 1 - (1 - \epsilon_s) \frac{r^2}{R^2} \\ &= 1 - (1 - 0,9) \cdot \frac{0,5^2}{10^2} = 0,99975\end{aligned}$$

Dari nilai emisivitas yang mendekati nilai 1 ini terlihat bahwa rongga benda-hitam mendekati sifat benda-hitam.

Agar menjadi benda-hitam praktis, rongga benda-hitam ini disipkan pada lubang suatu tungku seperti terlihat pada Gambar 2.12.

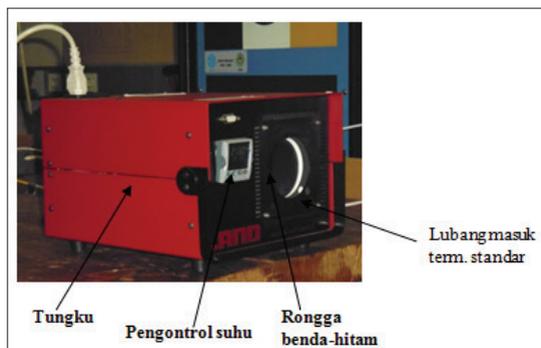


Gambar 2.12 Skema Benda-Hitam Praktis (*Practical Blackbody*)

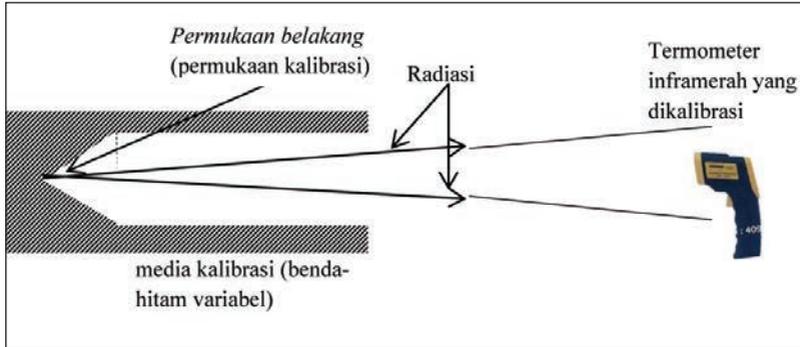
Tungku akan memanaskan rongga benda-hitam sehingga rongga tersebut memiliki suhu tertentu dan kemudian dipancarkan sebagai radiasi panas melalui bukaan rongga. Agar radiasi panas yang di-

pancarkan tersebut mendekati sifat pancaran benda-hitam teoretis sehingga rongga dapat berfungsi sebagai *perfect emmitter* maka suhu tungku harus merata sehingga dapat membuat suhu rongga merata pada seluruh permukaannya. Suhu tungku yang melingkupi rongga benda-hitam dapat diubah-ubah dengan mengatur besarnya arus yang masuk ke dalam kawat pemanas dari tungku tersebut sehingga radiasi panas yang dipancarkan oleh benda-hitam praktis dapat berubah-ubah pula. Benda-hitam praktis dengan suhu yang dapat diubah-ubah disebut benda-hitam variabel (*variable blackbody*). Karena rongga benda-hitam merupakan pendekatan dari benda-hitam ideal maka emisivitasnya tidak bergantung pada panjang gelombang, dan akibatnya emisivitas benda-hitam variabel juga tidak bergantung pada emisivitas.

Penggunaan yang utama dari benda-hitam variabel adalah sebagai media kalibrasi pada kalibrasi termometer radiasi. Contoh benda-hitam variabel ditunjukkan pada Gambar 2.13. Benda-hitam variabel biasanya dilengkapi dengan suatu pengontrol suhu (*temperature controler*) yang berfungsi untuk mengatur suhu tungku. Benda-hitam variabel pada umumnya memiliki lubang dekat rongga benda-hitam yang memanjang dan sejajar dengan rongga benda-hitam. Lubang tersebut digunakan untuk memasukkan termometer kontak, misalnya termokopel yang berfungsi sebagai termometer standar.



Gambar 2.13 Contoh Benda-Hitam Variabel



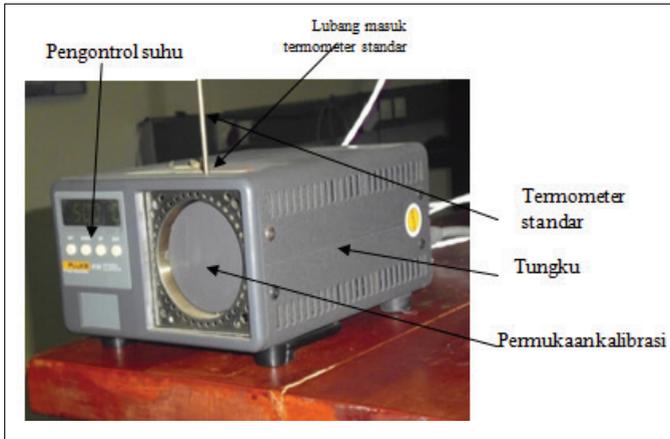
Gambar 2.14 Permukaan Kalibrasi Benda-Hitam Variabel

Pada proses kalibrasi, termometer inframerah yang dikalibrasi diarahkan dan difokuskan pada permukaan belakang benda-hitam variabel.

Permukaan belakang tersebut disebut permukaan kalibrasi (lihat Gambar 2.14). Penampang permukaan kalibrasi biasanya memiliki diameter yang sama dengan diameter bukaan rongga benda-hitam. Pada umumnya, termometer inframerah memiliki sudut pandang angular yang besar sehingga untuk memudahkan proses kalibrasinya diperlukan suatu media kalibrasi dengan permukaan kalibrasi yang cukup besar, yaitu berkisar antara 50 mm hingga 70 mm. Bila berbentuk rongga, dimensi dari benda-hitam variabel akan besar dan harganya mahal.

Sebagai media kalibrasi alternatif bisa digunakan benda-hitam variabel berbentuk permukaan datar yang secara keseluruhan berukuran relatif kecil, namun memiliki permukaan kalibrasi yang besar, yaitu antara 50 mm hingga 70 mm. Selain itu, harga media kalibrasi jenis ini jauh lebih murah dibandingkan harga benda-hitam variabel. Gambar 2.15 memperlihatkan contoh media kalibrasi tersebut.

Di kalangan pengguna, radiator permukaan datar ini dikenal dengan nama *infrared calibrator*. Permukaan kalibrasi dari radiator permukaan datar dibuat dari logam masif berbentuk lingkaran,



Gambar 2.15 Contoh Radiator Permukaan Datar (*Infrared Calibrator*)

biasanya logam aluminium, yang dipoles halus kemudian dilapisi dengan suatu lapisan tertentu sehingga pada panjang gelombang tertentu memiliki emisivitas tertentu pula, misalnya memiliki emisivitas 0,95 pada panjang gelombang (8–14) mm.

Walaupun tidak berbentuk rongga, permukaan kalibrasi dari radiator permukaan datar memiliki suhu yang merata pada seluruh permukaannya sehingga bisa memancarkan radiasi panas yang besarnya sama ke segala arah, seperti halnya radiasi panas yang dipancarkan oleh benda-hitam variabel.

Bab 3

Termometer Inframerah

Termometer radiasi adalah termometer yang dirancang untuk dapat menerima radiasi panas dan mengubahnya menjadi besaran suhu, sedangkan termometer inframerah adalah termometer radiasi yang dirancang untuk dapat menerima radiasi panas pada daerah panjang gelombang inframerah. Mengenai daerah panjang gelombang inframerah dapat dilihat pada Gambar 2.1. Pada umumnya, termometer inframerah merupakan termometer inframerah spektral (*spectral-band thermometer*), yaitu termometer yang memiliki kombinasi detektor dan filter yang peka terhadap radiasi panas yang memiliki panjang gelombang tertentu, misalnya 1,6 μm . Panjang gelombang atau interval panjang gelombang tersebut berkaitan dengan respons spektral (*spectral response*) dari detektor yang digunakan pada termometer inframerah. Buku manual dari termometer inframerah pada bab tentang spesifikasi teknis, biasanya selalu mencantumkan nilai respons spektral dari termometer inframerah tersebut. Nilai respons spektral sangat diperlukan, khususnya pada pengolahan data kalibrasi dari termometer inframerah. Pada Tabel 3.1 ditunjukkan contoh spesifikasi teknis dari suatu termometer inframerah. Selain itu, bentuk termometer inframerah yang banyak beredar di kalangan pengguna adalah *direct reading thermometer*, yaitu termometer inframerah yang sudah dilengkapi dengan sistem elektronik pengolah data dan layar peraga (*display*) untuk menampilkan hasil ukur dalam $^{\circ}\text{C}$ dan atau $^{\circ}\text{F}$.

Tabel 3.1 Contoh Spesifikasi Teknis Termometer Inframerah. (*Minolta/Land Cyclops Compac 3 Operating Instruction*)

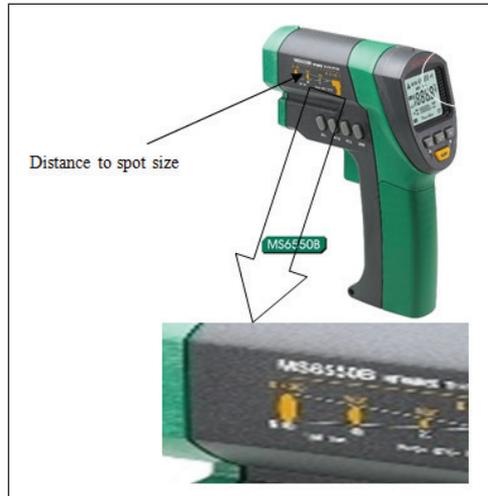
<i>Instrumen Type</i>	<i>Cyclops Compac 3</i>
<i>Temperature Range</i>	-50 to 500°C (-50 to 950 °F)
<i>Indication</i>	3-digit LCD display on back panel in 1° or 0.1° steps
<i>Measuring Modes</i>	Continous measure; Peak measures; Monitor
<i>Optical System</i>	8° field of view with 1° and 1.7° measuring circles
<i>Target Diameter</i>	35 mm at 2m (1.38 in at 6.56 ft)
<i>Detector</i>	Pyroelectric cell
<i>Spectral Response</i>	8 to 14 μm

Untuk membatasi lingkup bahasan, pada uraian selanjutnya dijelaskan bahwa yang dimaksud termometer inframerah adalah termometer inframerah jenis spektral dan berbentuk *direct reading thermometer*. Sebagai contoh termometer inframerah tersebut diperlihatkan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2.



Gambar 3.1 Termometer Inframerah Jenis Kamera

Termometer inframerah jenis kamera pada Gambar 3.1 memiliki sistem optik seperti kamera, yang bisa menunjang kemudahan dalam melakukan pengukuran. Termometer inframerah jenis ini memiliki kombinasi lensa objektif dan okuler yang membantu pengguna untuk mengarahkan dan memfokuskan termometer inframerah ke target ukur dengan benar.



Sumber: www.p-mastech.com

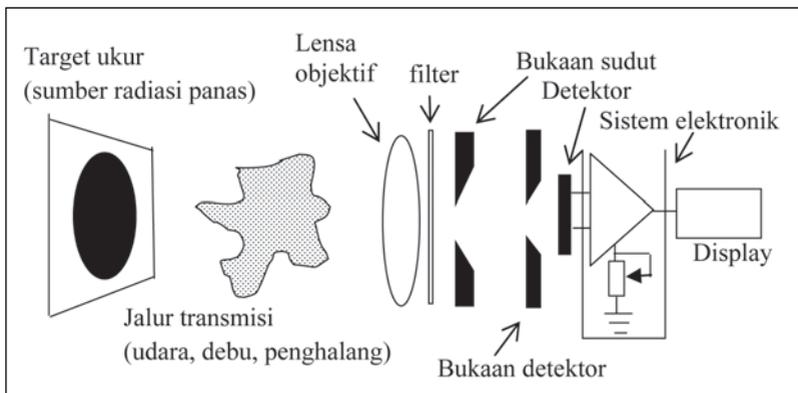
Gambar 3.2 Termometer Inframerah Jenis *Handheld*

Sementara termometer inframerah jenis *handheld* pada Gambar 3.2 tidak memiliki sistem optik seperti termometer inframerah jenis kamera sehingga untuk mengarahkan termometer ke target ukur perlu dipandu dengan berkas laser yang dipancarkan dari sebuah laser dioda yang ada di dalam termometer inframerah tersebut. Bila arah termometer sudah benar, termometer harus ditempatkan pada jarak ukur yang benar dan jarak tersebut bisa diperoleh dari hasil perhitungan dengan menggunakan nilai perbandingan antara diameter target dan jarak (*distance to spot size ratio*) yang dimiliki oleh termometer inframerah tersebut. Pada umumnya, *distance to spot size ratio* tersebut secara skematis digambarkan pada badan termometer inframerah (lihat Gambar 3.2).

A. KONSTRUKSI TERMOMETER INFRAMERAH

Umumnya termometer inframerah tersusun dari beberapa komponen yang masing-masing memiliki fungsi tersendiri (lihat Gambar 3.3), di antaranya

1. Lensa objektif, berfungsi menerima radiasi panas yang dipancarkan oleh target ukur dan meneruskannya ke komponen berikutnya.
2. Filter memiliki fungsi menyeleksi panjang gelombang radiasi panas yang diteruskan oleh lensa objektif agar sesuai dengan respons spektral maksimum detektor.
3. Bukaian sudut (*angle-defining aperture*) atau biasa disebut *field stop* merupakan medan pandang (*field of view*) termometer inframerah, yang berfungsi membatasi luas daerah ukur.
4. Bukaian detektor (*detector-defining aperture*) atau *aperture stop* memiliki fungsi untuk mengatur berkas radiasi panas supaya bisa memenuhi daerah aktif dari detektor.
5. Detektor berfungsi mengubah radiasi panas yang jatuh padanya menjadi arus listrik DC.
6. Sistem elektronik berfungsi mengubah arus listrik DC yang keluar dari detektor menjadi besaran suhu.
7. Layar peraga (*display*) berfungsi untuk menampilkan hasil olahan sistem elektronik dalam °C atau °F.



Sumber: Nicholas dan White 2005

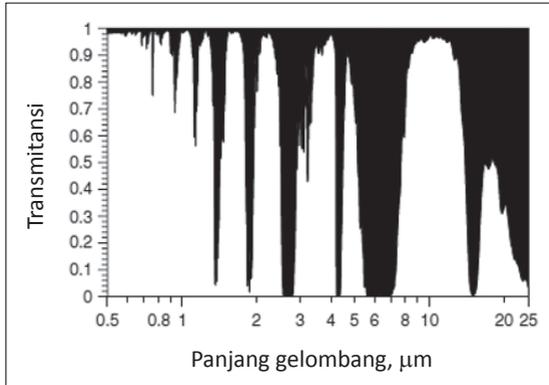
Gambar 3.3 Skema Umum Konstruksi Termometer Inframerah

Cara kerja termometer inframerah adalah sebagai berikut.

1. Permukaan target ukur akan mengemisikan radiasi panas yang besarnya sebanding dengan suhu target ukur tersebut;
2. Radiasi panas merambat di udara dan sebagian dari radiasi panas tersebut akan diserap oleh udara dan dipantulkan oleh debu;
3. Radiasi panas diterima oleh lensa objektif dan difokuskan ke detektor, namun harus melalui filter terlebih dahulu;
4. Filter akan menyeleksi panjang gelombang dari radiasi panas dan meloloskan yang memiliki panjang gelombang sama dengan respons spektral detektor;
5. Radiasi panas yang lolos merambat melalui bukaan sudut sehingga lebar berkas radiasi panas yang diteruskan akan sesuai dengan medan pandang termometer inframerah;
6. Setelah melalui bukaan sudut, radiasi panas merambat melalui bukaan detektor sehingga lebar berkas radiasi panas yang diteruskan akan memenuhi permukaan aktif dari detektor;
7. Radiasi panas yang menumbuk detektor akan diubah oleh detektor tersebut menjadi arus listrik DC yang besarnya sebanding dengan radiasi panas;
8. Arus listrik DC tersebut diolah oleh sistem elektronik menjadi besaran suhu dan ditampilkan pada *display* dalam bentuk °C atau °F.

Telah diuraikan sebelumnya pada titik 2 dari uraian cara kerja termometer inframerah bahwa radiasi panas yang merambat di udara akan mengalami hambatan dalam bentuk penyerapan oleh uap air dan CO₂ serta hamburan oleh debu sehingga besarnya radiasi panas yang diterima oleh termometer inframerah tidak utuh lagi. Adanya hamburan radiasi panas oleh debu merupakan hambatan yang tidak bisa diatasi selain dari tidak adanya partikel debu tersebut pada lintasan radiasi panas. Namun, penyerapan oleh uap air dan CO₂ dapat diatasi dengan menyeleksi panjang gelombang radiasi panas

yang tingkat penyerapannya di udara paling rendah, yaitu panjang gelombang yang termasuk dalam jendela atmosfer (*atmosperics windows*). Pada Gambar 3.4 (Nicholas dan White 2005) diperlihatkan panjang gelombang tersebut, di antaranya 0,65 μm , 0,9 μm , 1,05 μm , 1,35 μm , 1,6 μm , 2,2 μm , 4 μm , 10 μm , dan (8–14) μm termasuk di dalamnya.



Gambar 3.4 Jendela Atmosfer (*Atmosperic Windows*)

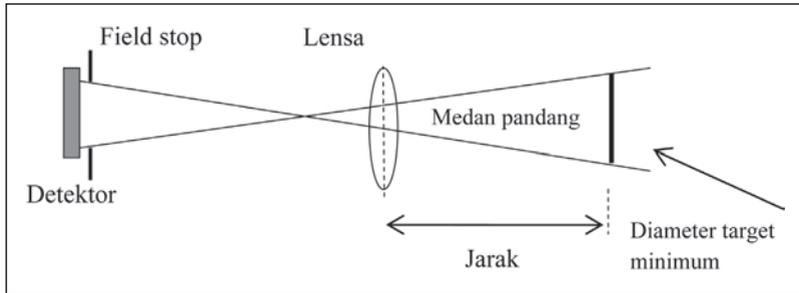
Agar termometer inframerah dapat mengukur dengan teliti, detektornya harus memiliki respons spektral pada salah satu panjang gelombang tersebut. Daerah panjang gelombang inframerah mencakup sebagian besar suhu rendah dan menengah sehingga termometer inframerah memiliki kemampuan untuk mengukur suhu yang dimulai dari suhu -50°C sampai dengan 2.000°C bergantung pada respons spektral detektor yang digunakan oleh termometer inframerah. Pada Tabel 3.2 ditunjukkan rentang ukur termometer inframerah untuk berbagai panjang gelombang.

Tabel 3.2 Rentang Ukur Termometer Inframerah

Detektor	Respon spektral, μm	Rentang ukur, $^{\circ}\text{C}$
Pyroelectric	8–13	-50–1.000
Pyroelectric	8–14	-50–500
InGaAs	1,6	150–1.000
Silicon	0,9	400–2.000

B. PENGARUH JARAK PADA PENGUKURAN

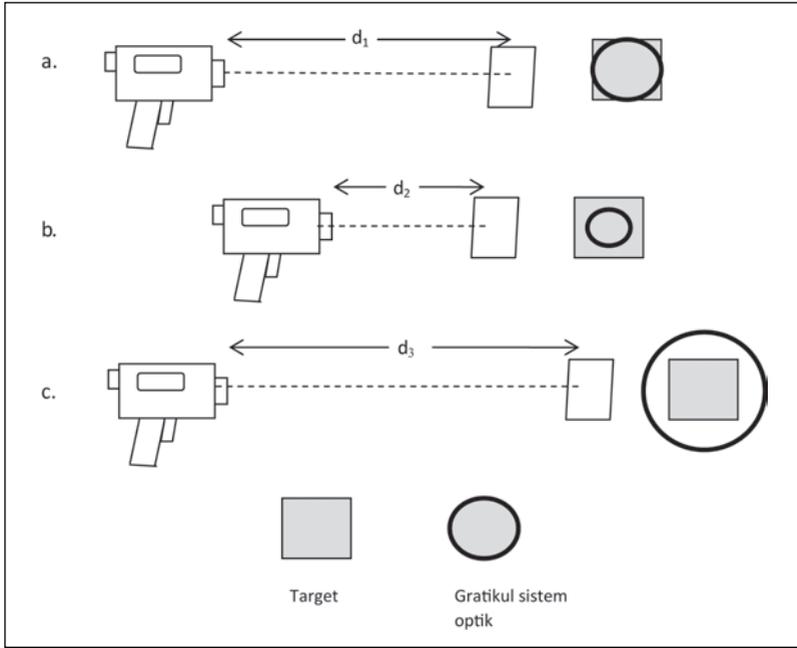
Medan pandang (*field of view*, FOV) dari termometer inframerah pada dasarnya merupakan pendefinisian ukuran target pada jarak tertentu dari termometer inframerah tersebut. Medan pandang dapat dinyatakan dalam bentuk skema seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema Medan Pandang Termometer Inframerah

Berdasarkan pada sistem optik yang digunakan untuk mengarahkan dan memfokuskan termometer inframerah ke target ukur, representasi medan pandang dari termometer inframerah dapat digolongkan dalam dua jenis, yaitu termometer inframerah dengan sistem optik yang merupakan gabungan lensa objektif dan okuler dan termometer inframerah dengan sistem optik yang hanya memiliki sebuah lensa objektif. Ukuran medan pandang untuk termometer inframerah jenis yang pertama dapat diketahui secara visual melalui lensa okuler dari termometer inframerah tersebut. Ukuran medan pandang tersebut dinyatakan dengan gratikul berbentuk lingkaran yang memiliki jari-jari tertentu, yang dengan mudah dapat dilihat melalui lensa okuler. Besarnya diameter lingkaran gratikul adalah representasi dari besarnya medan pandang.

Untuk memberikan hasil pengukuran yang teliti, pada saat melakukan pengukuran medan pandang termometer inframerah harus dipenuhi oleh target ukur dan pada kondisi ini lingkaran gratikul terlihat berada di dalam target ukur (lihat Gambar 3.6.a



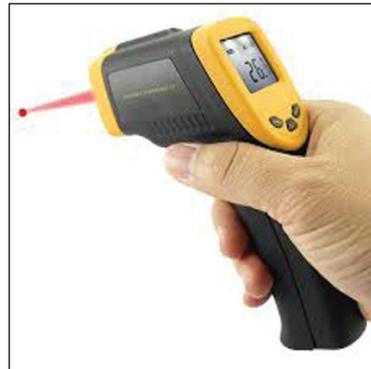
Gambar 3.6 Pengaruh Jarak Terhadap Ketelitian Pengukuran

dan Gambar 3.6.b). Hal ini dapat diperoleh dengan cara mengatur jarak fokus antara termometer inframerah dan target ukur. Pada Gambar 3.6.a, diameter lingkaran gratikul sama dengan diameter target ukur, dan misalkan hal ini terjadi pada jarak d_1 . Namun, pada jarak d_1 tersebut, radiasi panas dari target ukur cenderung tidak terdeteksi sepenuhnya oleh termometer. Hal ini disebabkan radiasi panas dari target ukur mengalami penghamburan (*scattering*) dan difraksi (*diffraction*) sehingga arah radiasi panas melenceng dari arah yang menuju detektor termometer. Di samping itu, radiasi panas dari benda lain yang tidak tercakup oleh medan pandang termometer inframerah kemungkinan bisa masuk ke sistem optik dan terdeteksi oleh detektor termometer inframerah. Karena tiga hal ini, akan terjadi kesalahan pengukuran akibat faktor jarak yang berkaitan dengan ukuran diameter target ukur. Kesalahan pengukuran ini disebut *size of source effect* (SSE) (Saunders dan Hamish 2009).

Untuk memperkecil pengaruh SSE, posisi termometer inframerah digeser lebih dekat ke target ukur. Misalnya pada jarak d_2 , di mana $d_2 < d_1$ sehingga diameter lingkaran gratikul terlihat lebih kecil dibandingkan diameter target ukur, dan biasanya jarak diatur sedemikian rupa sehingga besarnya diameter lingkaran gratikul adalah setengah atau sepertiga dari ukuran target ukur (Igor Pušnik dkk. 2006).

Kemudian, sebaiknya dihindari penempatan termometer pada posisi dengan jarak yang lebih jauh dari d_1 . Misalnya $d_3 > d_1$ sehingga besarnya lingkaran gratikul lebih besar daripada diameter target ukur, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.6.c dan pada kondisi seperti ini akan diperoleh hasil pengukuran yang salah. Hal ini disebabkan radiasi panas dari target ukur tidak seluruhnya tertangkap oleh termometer inframerah sehingga suhu yang ditunjukkan oleh termometer inframerah akan lebih rendah dari suhu target ukur. Selain itu, bila di sekitar target ukur ada benda lain yang bersuhu tinggi maka penunjukan termometer inframerah akan lebih besar daripada suhu target ukur. Hal ini bisa terjadi karena radiasi panas dari benda lain tersebut akan masuk melalui celah kosong dari lingkaran gratikul.

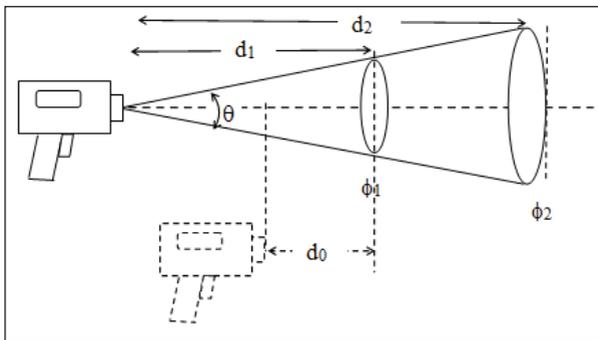
Untuk termometer inframerah yang hanya memiliki sebuah lensa objektif, pada umumnya menggunakan sinar laser untuk memandu arah termometer inframerah ke target ukur. Pada Gambar 3.7 diperlihatkan contoh termometer inframerah yang dilengkapi dengan laser pemandu arah. Laser tersebut merupakan bagian dari termometer inframerah yang ditempatkan di atas atau di bawah lensa objektif atau sesumbu dengan lensa objektif. Karena sistem optik ter-



Sumber: chinavasion. 2009

Gambar 3.7 Termometer Inframerah dengan Laser Pemandu Arah

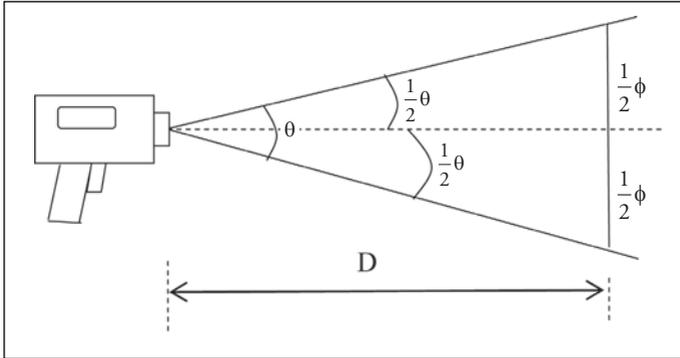
termometer inframerah merupakan sistem yang *fixed-focus* maka untuk memfokuskan ke target ukur, termometer inframerah ditempatkan pada suatu jarak tertentu sehingga target ukur selalu tercakup oleh medan pandang termometer inframerah. Jarak tertentu tersebut diperoleh dari perhitungan berdasarkan nilai perbandingan jarak terhadap ukuran target ukur dari termometer inframerah tersebut. Perbandingan ini menunjukkan ukuran medan pandang dari termometer inframerah dan biasa disebut *distance to spot size ratio* atau D/S , yaitu perbandingan antara jarak ukurnya yang terjauh, d , dengan diameter target ukur, f , atau $D/S = d/f$.



Gambar 3.8 *Distance to Spot Size Ratio* untuk Menentukan Jarak Ukur Termometer Inframerah

Seperti terlihat pada Gambar 3.8, $D/S = d_1/\phi_1 = d_2/\phi_2$ dan ini berarti untuk diameter target ϕ_1 , jarak ukurnya yang terjauh adalah d_1 , dan untuk diameter target ϕ_2 , jarak ukurnya yang terjauh adalah d_2 , demikian seterusnya sehingga semakin besar diameter target maka semakin jauh jarak ukur terjauhnya. Sedangkan jarak ukur terbaik, misalnya untuk diameter target ϕ_1 adalah $\frac{1}{2}$ dari jarak terjauh d_1 , yaitu d_0 atau

$$d_0 = \frac{1}{2} \cdot d_1 \quad (3.1)$$



Gambar 3.9 Skema Penentuan Sudut Medan Pandang

Bila nilai D/S dari suatu termometer inframerah diketahui maka dapat diketahui besarnya sudut medan pandang θ dari termometer inframerah tersebut. Besarnya θ dapat dihitung berdasarkan Gambar 3.9, yaitu

$$\begin{aligned} \theta &= 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2} \cdot \phi}{D} \right) = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}}{D/\phi} \right) \\ &= 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}}{D/S} \right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Contoh 3.1

Diketahui suatu termometer inframerah dengan $D/S = 12:1$. Jadi, tentukan tiga hal berikut:

- Besarnya sudut dari medan pandang termometer inframerah tersebut.
- Jarak ukur terjauh termometer inframerah untuk mengukur permukaan lingkaran dengan diameter 75 mm.
- Jarak ukur terbaik termometer inframerah untuk mengukur permukaan lingkaran dengan diameter 75 mm.

Penyelesaian:

$$a. \quad \theta = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}}{D:S} \right) = 2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}}{12} \right) = 4,8^\circ \text{C}$$

- b. $d = D/S \times \theta = 12 \times 75 = 900 \text{ mm}$.
 Jarak ukur terjauh = 900 mm dari permukaan depan lensa termometer inframerah.
- c. Jarak ukur terbaik = $900/2 = 450 \text{ mm}$ dari permukaan depan lensa termometer inframerah.

C. PERSAMAAN PENGUKURAN TERMOMETER INFRAMERAH

Besarnya radiasi panas yang diukur oleh termometer inframerah bukan hanya berasal dari target ukur, melainkan juga berasal dari benda sekeliling target ukur yang terpantulkan oleh target ukur tersebut menuju termometer inframerah yang besarnya adalah

$$L_b(\lambda, T_{\text{amb}})_{\text{refleksi}} = \rho_s \cdot L_b(\lambda, T_{\text{amb}}) = (1 - \epsilon_s(l)) \cdot L_b(\lambda, T_{\text{amb}}) \quad (3.3)$$

dengan:

$L_b(\lambda, T_{\text{amb}})_{\text{refleksi}}$ = radiasi panas dari benda sekeliling yang terpantulkan oleh permukaan target ukur, $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{str}^{-1}$

ρ_s = konstanta refleksi permukaan target ukur = $1 - \epsilon_s(\lambda)$

$L_b(\lambda, T_{\text{amb}})$ = radiasi panas dari benda sekeliling, $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{str}^{-1}$

T_{amb} = suhu sekeliling, K

Selain itu, pada saat suhu detektor menjadi panas, detektor akan memancarkan radiasi panas keluar dari sistem termometer inframerah sehingga mengurangi besarnya radiasi panas yang diterima oleh detektor tersebut. Bila suhu detektor adalah T_d maka radiasi panas yang dipancarkan keluar adalah $L_b(\lambda, T_d)$. Dengan demikian, radiasi panas neto yang diterima oleh detektor termometer inframerah adalah

$$L_{\text{ukur}} = \epsilon_s \cdot L_b(\lambda, T_s) + (1 - \epsilon_s) \cdot L_b(\lambda, T_{\text{amb}}) - L_b(\lambda, T_d) \quad (3.4)$$

Pada Gambar 3.10 diperlihatkan secara skematis mekanisme transfer radiasi panas ke termometer inframerah.

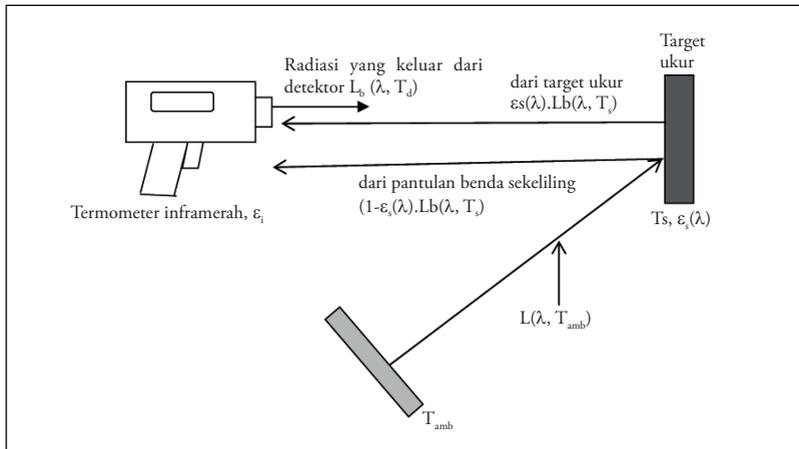
Radiansi total L_{ukur} yang diterima oleh detektor selanjutnya diubah menjadi arus listrik searah, I_{ukur} berdasarkan persamaan

$$I_{ukur} = k \int_0^{\infty} L_{ukur} \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3.5)$$

dengan:

$s(\lambda)$ = respons spektral relatif termometer inframerah.

k = konstanta yang bergantung pada sifat geometrik, optik, dan elektrik dari termometer inframerah.



Gambar 3.10 Radiasi Panas Yang Diterima Termometer Inframerah

Bila Persamaan (3.4) disubstitusikan ke Persamaan (3.5) maka akan diperoleh

$$I_{ukur} = k \int_0^{\infty} [\epsilon_s(\lambda)L_b(\lambda, T_s) + (1 - \epsilon_s(\lambda))L_b(\lambda, T_{amb}) - L_b(\lambda, T_d)]s(\lambda)d\lambda$$

$$I_{ukur} = k \int_0^{\infty} \epsilon_s(\lambda)L_b(\lambda, T_s) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda + k \int_0^{\infty} [1 - \epsilon_s(\lambda)] \cdot L_b(\lambda, T_{amb})s(\lambda) \cdot d\lambda - k \int_0^{\infty} L_b(\lambda, T_d) \cdot s(\lambda)d\lambda \quad (3.6)$$

Untuk menyederhanakan Persamaan (3.6), didefinisikan sebuah fungsi $I(T)$ yang merupakan *output* detektor untuk *input* radiasi panas dari benda-hitam pada suhu T .

$$I(T) = k \int_0^{\infty} L_b(\lambda, T) s(\lambda) d\lambda \quad (3.7)$$

maka Persamaan (3.6) menjadi (Saunders 2009)

$$I_{\text{ukur}} = \varepsilon_s(\lambda) I(T_s) + (1 - \varepsilon_s(\lambda)) I(T_{\text{amb}}) - I(T_d) \quad (3.8)$$

Hasil integrasi dari Persamaan (3.7) mempresentasikan hubungan antara sinyal detektor I dan suhu target ukur T. Integrasi tersebut dapat didekati dengan persamaan interpolasi Sakuma-Hattori (Saunders 2009) yang melibatkan pengaruh dari lebar pita (*bandwidth*) dari respons spektral termometer inframerah, yaitu

$$I(T) = k \int_0^{\infty} L_b(\lambda, T) s(\lambda) d\lambda \quad (3.9)$$

$$\approx \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT+B}\right) - 1}$$

dengan:

A, B, C = parameter yang berkaitan dengan respons spektral relatif dari termometer inframerah

c_2 = konstanta Planck kedua = 14.388 mm.K

Dengan demikian, Persamaan (3.8) dapat ditulis menjadi

$$I_{\text{ukur}} = \varepsilon_s(\lambda) \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_s + B}\right) - 1} + (1 - \varepsilon_s(\lambda)) \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{\text{amb}} + B}\right) - 1} - \frac{C}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_d + B}\right) - 1} \quad (3.10)$$

I_{ukur} diolah oleh termometer untuk menghasilkan nilai suhu hasil pengukuran T_{ukur} yang akan ditampilkan pada *display* termometer. Teknik yang umum digunakan adalah

$$I(T_{\text{ukur}}) = \frac{I_{\text{ukur}}}{\varepsilon_i(\lambda)} + I(T_d) \quad (3.11)$$

Bila Persamaan (3.8) disubstitusikan ke Persamaan (3.11) akan diperoleh

$$\begin{aligned}
 I(T_{\text{ukur}}) &= \frac{\varepsilon_s(\lambda)I(T_s) + (1 - \varepsilon_s(\lambda))I(T_{\text{amb}}) - (1 - \varepsilon_i(\lambda))I(T_d)}{\varepsilon_i(\lambda)} \\
 &= I(T_s) + \frac{(1 - \varepsilon_i(\lambda))}{\varepsilon_i(\lambda)} [I(T_{\text{amb}}) \\
 &\quad - I(T_d)] + \frac{(\varepsilon_s(\lambda) - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i(\lambda)} [I(T_s) - I(T_{\text{amb}})] \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

Bila $T_{\text{amb}} = T_d$ dan $\varepsilon_s(\lambda) = \varepsilon_i(\lambda)$ disubstitusikan ke Persamaan (3.12) maka $I(T_{\text{ukur}}) = I(T_s)$ atau $T_{\text{ukur}} = T_s$. Dengan demikian, yang ditampilkan oleh termometer inframerah, T_{ukur} sama dengan suhu target ukur, T_s . Namun, bila kondisi tersebut tidak terpenuhi maka T_{ukur} akan bergantung pada variabel $\varepsilon_s(\lambda)$, T_{amb} dan T_d .

Sebagai contoh, bila $\varepsilon_s(\lambda) = \varepsilon_i(\lambda)$ tapi $T_{\text{amb}} \neq T_d$ maka $T_{\text{ukur}} \neq T_s$, seperti terlihat pada Persamaan (3.13).

$$I(T_{\text{ukur}}) = I(T_s) + \frac{(1 - \varepsilon_i(\lambda))}{\varepsilon_i(\lambda)} [I(T_{\text{amb}}) - I(T_d)] \quad (3.13)$$

Bila $T_{\text{amb}} = T_d$, tapi $\varepsilon_s(\lambda) \neq \varepsilon_i(\lambda)$ maka $T_{\text{ukur}} \neq T_s$, seperti terlihat pada Persamaan (3.14).

$$I(T_{\text{ukur}}) = I(T_s) + \frac{(\varepsilon_s(\lambda) - \varepsilon_i(\lambda))}{\varepsilon_i(\lambda)} [I(T_s) - I(T_{\text{amb}})] \quad (3.14)$$

Bila Persamaan (3.9) disubstitusikan ke Persamaan (3.12) maka diperoleh suatu persamaan baru yang mengandung konstanta A, B, dan C. Konstanta C yang muncul pada bagian kiri dan kanan persamaan baru tersebut bisa dibagi satu sama lain sehingga konstanta C menjadi tidak ada lagi dalam persamaan dan diganti dengan angka 1. Dengan demikian, nilai C dapat dimisalkan besarnya sama dengan 1, sedangkan parameter A dan B dapat diperoleh berdasarkan respons spektral detektor termometer inframerah yang dihitung dengan menggunakan persamaan (Saunders 2009)

$$A = \lambda_0 \left(1 - 6 \frac{\sigma^2}{\lambda_0^2} \right) \quad (3.15)$$

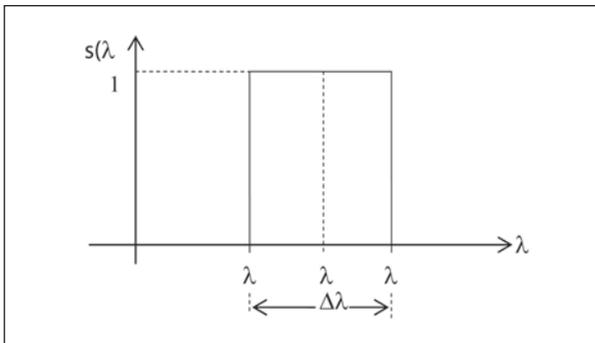
$$B = \frac{c_2}{2} \frac{\sigma^2}{\lambda_0^2} \quad (3.16)$$

dengan:

λ_0 = respons spektral relatif rata-rata termometer, μm

σ = standar deviasi respons spektral relatif termometer, μm

Biasanya pabrik pembuat termometer inframerah hanya memberikan rentang panjang gelombang untuk memberikan gambaran tentang respons spektral dari termometer inframerah, misalnya antara $8 \mu\text{m}$ dan $14 \mu\text{m}$ sehingga dengan demikian tidak mungkin untuk menentukan nilai λ_0 dan σ secara tepat. Dalam kondisi seperti ini, respons spektral dari termometer inframerah dianggap memiliki bentuk segiempat yang merupakan batas atas dan batas bawah dari rentang panjang gelombang yang diberikan. Untuk sembarang respons spektral yang simetri, nilai λ_0 sama dengan panjang gelombang di tengah, dan untuk respons spektral segiempat, nilai $\sigma = \Delta\lambda/\sqrt{12}$ dengan $\Delta\lambda$ adalah lebar panjang gelombang dari kurva respons spektral tersebut (lihat Gambar 3.11).



Gambar 3.11 Pendekatan Kurva Respons Spektral dari Termometer Inframerah

Contoh 3.2.

Tentukan nilai parameter A dan B dari suatu termometer inframerah yang memiliki respons spektral (8–14) μm . $c_2 = 14.388 \mu\text{m}\cdot\text{K}$!

Penyelesaian:

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 14 - 8 = 6 \mu\text{m} \rightarrow \sigma = \Delta\lambda/\sqrt{12} = 1,73 \mu\text{m}$$

$$\lambda_0 = \lambda_1 + \Delta\lambda/2 = 8 + 6/2 = 11 \mu\text{m}$$

$$A = \lambda_0 \left(1 - 6 \frac{\sigma^2}{\lambda_0^2} \right) = 9,37 \mu\text{m}, B = \frac{c_2}{2} \frac{\sigma^2}{\lambda_0^2} = 178 \mu\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$$

Setelah estimasi nilai A dan B diperoleh, maka untuk menentukan suhu hasil pengukuran (T_{ukur}), nilai $I(T_s)$, $I(T_{\text{amb}})$, dan $I(T_d)$ dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.9), namun dengan $C = 1$. Kemudian dihitung $I(T_{\text{ukur}})$ dengan menggunakan Persamaan (3.12). Bila nilai $I(T_{\text{ukur}})$ telah diperoleh, nilai T_{ukur} dapat dihitung dengan menggunakan invers dari Persamaan (3.9) dengan nilai $C = 1$, yaitu

$$T = \frac{c_2}{A \cdot \ln\left(\frac{1}{I(T)} + 1\right)} - \frac{B}{A}, \text{K} \quad (3.17)$$

Dari Persamaan (3.17), suhu hasil pengukuran dinyatakan dalam satuan Kelvin. Bila dinyatakan dalam $^{\circ}\text{C}$ maka Persamaan (3.17) dikurangi dengan nilai 273,15, atau

$$t = \frac{c_2}{A \cdot \ln\left(\frac{1}{I(T)} + 1\right)} - \frac{B}{A} - 273,15, ^{\circ}\text{C} \quad (3.18)$$

Contoh 3.3

(Pada contoh ini diperlihatkan langkah-langkah perhitungan nilai T_{ukur})

Termometer inframerah dengan emisivitas 0,95 dan respons spektral (8–14) μm serta resolusi 0,1 $^{\circ}\text{C}$ mengukur suhu suatu benda yang memiliki emisivitas 0,98. Bila suhu sebenarnya dari benda tersebut

adalah 150°C , hitunglah T_{ukur} , bila dimisalkan suhu sekeliling sama dengan 27°C dan suhu detektor termometer inframerah sama dengan 20°C .

Penyelesaian:

Dari contoh sebelumnya, nilai A dan B dari termometer inframerah dengan respons spektral (8–14) μm adalah $A = 9,37 \mu\text{m}$, $B = 178 \mu\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$

$$T_s = 150 + 273,15 = 423,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{amb}} = 27 + 273,15 = 300,15 \text{ K}$$

$$T_d = 20 + 273,15 = 293,15 \text{ K}$$

$$I(T_s) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_s+B}\right) - 1} = 0,031955 \text{ ampere}$$

$$I(T_{\text{amb}}) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_{\text{amb}}+B}\right) - 1} = 0,008183 \text{ ampere}$$

$$I(T_d) = \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{AT_d+B}\right) - 1} = 0,007339 \text{ ampere}$$

Dengan menggunakan Persamaan (3.12), diperoleh $I(T_{\text{ukur}}) = 0,03275$ dan selanjutnya dikonversi menjadi besaran suhu dengan menggunakan Persamaan (3.18), yaitu

$$t_{\text{ukur}} = 153,0505^{\circ}\text{C} \approx 153,1^{\circ}\text{C}$$

Untuk suhu di bawah 200°C , nilai T_d perlu diketahui nilainya, sedangkan untuk suhu di atas 200°C pengaruhnya pada pengukuran bisa diabaikan. Untuk menyederhanakan perhitungan pengaruh T_d dapat dihilangkan atau diasumsikan sama dengan T_{amb} . Termometer inframerah yang dilengkapi dengan pengatur emisivitas dapat digunakan untuk menghilangkan pengaruh T_d atau menentukan nilai T_d . Pengaruh T_d dapat dihilangkan dengan cara menyetel emisivitas termometer inframerah sama dengan satu ($\epsilon_i(\lambda)=1$) sehingga nilai T_d hilang dari Persamaan (3.12) dan persamaan tersebut menjadi

$$I(T_{\text{ukur}}) = \varepsilon_s(\lambda)I(T_s) + (1 - \varepsilon_s(\lambda))I(T_{\text{amb}}) \quad (3.19)$$

Sementara itu, untuk menentukan T_d , termometer inframerah diarahkan ke suatu sumber radiasi panas yang konstan, misalnya bola integrator dengan dua nilai emisivitas yang berbeda, seperti $\varepsilon_{i1}(\lambda)$ dan $\varepsilon_{i2}(\lambda)$ yang masing-masing menghasilkan T_{ukur1} dan T_{ukur2} , dan T_d dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.20) (Saunders 2009).

$$S(T_d) = \frac{\varepsilon_{i1} \cdot S(T_{\text{ukur1}}) - \varepsilon_{i1}(\lambda) \cdot S(T_{\text{ukur2}})}{(\varepsilon_{i1}(\lambda) - \varepsilon_{i2}(\lambda))} \quad (3.20)$$

Namun, bila termometer inframerah tidak dilengkapi dengan pengatur emisivitas, misalnya untuk termometer inframerah dengan emisivitas yang tetap sebesar 0,95, yang lazim dilakukan adalah dengan cara menganggap suhu sekeliling T_{amb} sama dengan suhu detektor T_d sehingga Persamaan (3.21) menjadi

$$I(T_{\text{ukur}}) = I(T_s) + \frac{(\varepsilon_s(\lambda) - 0,95)}{0,95} [I(T_s) - I(T_{\text{amb}})] \quad (3.21)$$

Bab 4

Ketidakpastian Pengukuran

A. PENGERTIAN DASAR

Pada kenyataannya, proses pengukuran tak luput dari kesalahan sehingga nilai ukur yang sebenarnya tidak pernah diketahui walaupun sistem pengukuran yang digunakan sangat baik dan orang yang melakukan pengukuran memiliki kualifikasi yang baik pula. Karena hal ini merupakan suatu yang tak bisa dihindari, upaya yang paling tepat dilakukan adalah mencari seteliti mungkin sumber terjadinya kesalahan tersebut. Bila banyaknya sumber kesalahan dan nilai kesalahannya telah diketahui maka besarnya kesalahan total bisa diketahui dan dapat disertakan pada pelaporan hasil pengukuran. Besar kecilnya kesalahan total yang diperoleh menunjukkan ukuran ketelitian dari suatu alat ukur. Namun, karena satu dan lain hal, upaya merinci seluruh sumber kesalahan tersebut tidak dapat diperoleh sehingga nilai kesalahan total hanya merupakan suatu estimasi kesalahan. Estimasi dari besarnya kesalahan pengukuran disebut ketidakpastian pengukuran (*measurement uncertainty*).

Dengan demikian, nilai ukur sebenarnya dari benda tidak dapat diketahui dengan pasti. Yang bisa diketahui hanyalah perkiraan lokasi nilai ukur sebenarnya pada rentang yang dibentuk oleh hasil ukur dengan ketidakpastiannya.

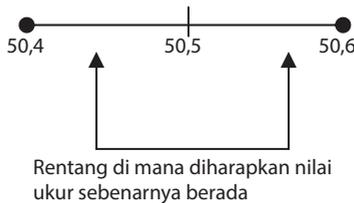
Contoh 1

$$t_1 = (50,5 \pm 0,2)^\circ\text{C}, t_2 = (50,5 \pm 0,1)^\circ\text{C}$$

- $50,5^\circ\text{C}$ = nilai hasil pengukuran, biasanya berupa nilai rata-rata dari beberapa kali pengukuran
- $\pm 0,2^\circ\text{C}, \pm 0,1$ = nilai ketidakpastian
- nilai t_1 sebenarnya ada pada interval $(50,3)^\circ\text{C} \leq t \leq (50,7)^\circ\text{C}$



- nilai t_2 sebenarnya ada pada interval $(50,4)^\circ\text{C} \leq t \leq (50,6)^\circ\text{C}$



Lebar selang untuk t_2 lebih sempit daripada t_1 sehingga probabilitas untuk memperoleh nilai t_2 yang sebenarnya lebih besar daripada t_1 , dan ini memberikan arti bahwa pengukuran t_2 lebih teliti daripada t_1 . Dengan demikian, kadar ketelitian suatu pengukuran akan ditentukan oleh besar dan kecilnya nilai ketidakpastian dari pengukuran tersebut. Semakin kecil ketidakpastiannya, semakin teliti suatu pengukuran. Karena ketidakpastian selalu menyertai setiap pengukuran, pelaporan hasil pengukuran akan lengkap bila disertai dengan informasi ketidakpastian.

Untuk melakukan estimasi nilai ketidakpastian bukanlah suatu pekerjaan yang sederhana karena hal ini memerlukan beberapa pendukung, salah satu di antaranya adalah kompetensi seseorang dalam bidang pekerjaannya. Dengan demikian, kemampuan seseorang untuk melakukan estimasi terhadap ketidakpastian akan sangat

bergantung pada tingkat pemahamannya terhadap proses pengukuran yang dilakukannya. Pada umumnya, semakin banyak jam terbang seseorang dalam menggeluti pekerjaannya maka semakin tinggi tingkat pemahaman terhadap proses pengukuran yang dilakukannya dan semakin peka dalam mengestimasi kesalahan yang terjadi. Karena hasil estimasi ketidakpastian dipengaruhi oleh profesionalitas individu maka bisa jadi nilai estimasi ketidakpastian yang diperoleh akan berbeda untuk kasus pengukuran yang sama sehingga akan menimbulkan masalah hasil ukur antara pengukur yang satu dan yang lain. Hal seperti ini mungkin bisa dikurangi bila masing-masing individu mengacu pada panduan yang sama dalam menghitung ketidakpastian. *International Organization for Standardization (ISO)* telah menerbitkan buku pedoman umum untuk menghitung ketidakpastian, yaitu *ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (ISOGUM)*, sehingga dapat menjadi pedoman bagi setiap orang dalam menghitung ketidakpastian. Berkaitan dengan pentingnya pemahaman tentang cara perhitungan ketidakpastian tersebut, pada buku ini akan dibahas secara ringkas tentang ISOGUM yang diadaptasikan dari beberapa sumber.

Ada dua jenis ketidakpastian yang menyertai hasil pengukuran, yaitu ketidakpastian jenis A dan ketidakpastian jenis B (*International Organisation for Standardization 1993*). Untuk mengevaluasi ketidakpastian jenis A dari hasil pengukuran digunakan cara statistik. Cara pengukuran yang memiliki ketidakpastian jenis A adalah pengukuran besaran pada suatu nilai yang dilakukan secara berulang. Selain pengukuran berulang, yang juga memiliki ketidakpastian jenis A adalah ketidakpastian yang menyertai suatu proses regresi. Sementara ketidakpastian jenis B adalah ketidakpastian yang dievaluasi dengan cara selain cara statistik. Contoh ketidakpastian jenis B adalah ketidakpastian yang muncul dari karakteristik alat ukur, seperti resolusi dan stabilitas, ketidakpastian yang tertulis pada sertifikat kalibrasi alat ukur, inhomogenitas dan stabilitas dari media kalibrasi, dan masih banyak lagi.

Untuk menentukan nilai ketidakpastian suatu hasil pengukuran, terasa lebih mudah dan terarah bila persamaan yang mendasari proses pengukuran tersebut diketahui dengan pasti sehingga dapat diturunkan suatu persamaan ketidakpastian beserta semua komponen ketidakpastiannya. Dengan demikian, uraian tentang ketidakpastian akan diawali dengan pembahasan tentang persamaan pengukuran.

B. PERSAMAAN PENGUKURAN

Pada kebanyakan kasus kuantitas Y yang diukur, yang disebut benda ukur (*measurand*) tidak diukur secara langsung, namun melalui pengukuran dari N besaran lain X_1, X_2, \dots, X_N yang terikat dalam suatu fungsi f , yang sering disebut sebagai persamaan pengukuran

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (4.1)$$

Besaran X_i adalah semua kuantitas yang dapat memberikan kontribusi ketidakpastian yang signifikan terhadap hasil pengukuran. Misalnya pada saat mengukur luas suatu bidang datar berbentuk segiempat, yang akan diukur langsung adalah panjang dan lebar dari bidang tersebut sehingga persamaan pengukuran luas bidang adalah

$$\text{Luas} = \text{Panjang} \times \text{Lebar} = f(\text{Panjang}, \text{Lebar}) \quad (4.2)$$

Estimasi hasil pengukuran dari benda ukur Y , dinotasikan dengan y , yang diperoleh dari Persamaan (4.1) dengan menggunakan input x_1, x_2, \dots, x_N merupakan nilai estimasi dari X_1, X_2, \dots, X_N . Dengan demikian, estimasi hasil ukur y diberikan oleh persamaan

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (4.3)$$

Bila merujuk pada Persamaan (4.2), hasil pengukuran benda ukur Panjang adalah panjang dan hasil pengukuran benda ukur Lebar adalah lebar sehingga

$$\underline{\text{luas}} = \underline{\text{panjang}} \times \underline{\text{lebar}} = f(\underline{\text{panjang}}, \underline{\text{lebar}}) \quad (4.4)$$

dengan:

$$\underline{\text{luas}} = \text{estimasi dari nilai benda ukur Luas}$$

Ketidakpastian hasil pengukuran y berasal dari ketidakpastian u (x_i) (atau u_i untuk singkatnya) yang muncul pada saat mengukur X_i . Dengan demikian, dalam contoh Persamaan (4.2), ketidakpastian nilai luas berasal dari ketidakpastian yang muncul pada saat mengukur Panjang dan Lebar.

C. KETIDAKPASTIAN JENIS A

Yang termasuk kategori ketidakpastian jenis A adalah ketidakpastian yang muncul karena pengukuran berulang dan proses regresi.

1. Pengukuran Berulang

Pada saat melakukan pengukuran, misalnya mengukur suhu suatu benda, akan diperoleh suatu nilai sebagai hasil dari pengukuran tersebut. Bila kemudian pengukuran dilakukan sekali lagi maka, pada umumnya, akan diperoleh nilai hasil pengukuran yang berbeda dari hasil pengukuran yang pertama. Perbedaan tersebut bisa kecil atau besar bergantung pada kualitas ketelitian alat yang digunakan. Demikian pula bila dilakukan pengulangan pengukuran berikutnya. Yang menjadi pertanyaan adalah nilai yang mana yang harus diambil sebagai nilai pengukuran tersebut. Berdasarkan konsep distribusi pengukuran dengan jumlah pengukuran berhingga, nilai estimasi dari pengukuran berulang tersebut adalah nilai rata-rata dari sejumlah pengukuran berulang tersebut, yaitu

$$m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4.5)$$

dengan:

m = estimasi nilai pengukuran

N = jumlah pengukuran

x_i = nilai pengukuran ke- i

Penyimpangan secara kumulatif nilai pengukuran x terhadap estimasi nilai pengukuran m dinyatakan sebagai estimasi simpangan baku (*standar deviation*) s , yang dinyatakan dalam bentuk persamaan

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - m)^2} \quad (4.6)$$

dengan:

σ = estimasi nilai simpangan baku.

Contoh 2

Hitung nilai rata-rata dan simpangan baku dari hasil pengukuran suhu suatu bak air dingin sebanyak 10 kali (dalam °C), yaitu 6,6; 6,5; 7,0; 6,4; 6,5; 6,3; 6,6; 7,0; 6,5; 6,5!

Penyelesaian:

$$m = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t = \frac{1}{10} (6,6 + 6,5 + 7,0 + \dots + 6,5) = 6,6^\circ\text{C}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (x_t - m)^2}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{10-1} [(6,6 - 6,6)^2 + (6,5 - 6,6)^2 + \dots + (6,5 - 6,6)^2]} = 0,2^\circ\text{C}$$

Untuk memudahkan dalam menghitung nilai rata-rata m dan deviasi standar s dapat menggunakan fungsi AVERAGE() dan STDEV() yang ada pada *software* aplikasi Microsoft Excel.

Nilai rata-rata eksperimental dari satu himpunan yang anggotanya masing-masing terdiri atas N pengukuran yang saling bebas memiliki distribusi normal dengan simpangan baku yang disebut *Standard Error of the Mean* (SEOM).

$$\text{SEOM} = \sigma / \sqrt{N} \quad (4.7)$$

Pendekatan SEOM untuk pengukuran berhingga disebut *Experimental Standard Deviation of the Mean* (ESDM).

$$\text{ESDM} = s / \sqrt{N} \quad (4.8)$$

dengan:

σ = simpangan baku

N = jumlah pengukuran

Ketidakpastian yang dinyatakan sebagai simpangan baku disebut *ketidakpastian baku*. Untuk pengukuran berulang berhingga, ketidakpastian baku = u = ESDM.

Contoh 3

Hitunglah ketidakpastian baku dari pengukuran berulang pada soal Contoh 4.1.

Penyelesaian:

$$u = \text{ESDM} = \frac{s}{\sqrt{N}} = \frac{0,2}{\sqrt{10}} = 0,07 \approx 0,1^{\circ}\text{C}$$

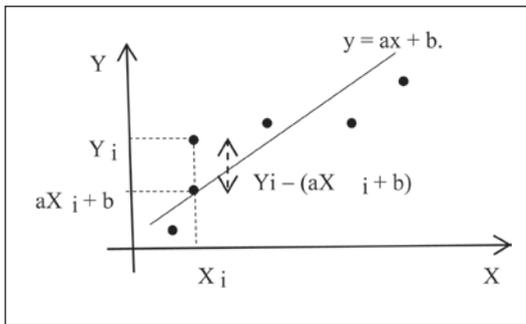
2. Regresi

Pada prinsipnya, kalibrasi harus memberikan informasi yang cukup untuk mengoreksi semua titik pada skala suatu instrumen. Namun, tidak praktis untuk membandingkan penunjukan setiap titik pada skala tersebut terhadap penunjukan instrumen standar (komparator) sehingga pada pelaksanaan kalibrasi biasanya hanya sejumlah kecil titik yang dibandingkan dengan komparator.

Masalahnya kemudian bagaimana mengoreksi penunjukan di antara titik-titik yang dikalibrasi tersebut. Salah satu pendekatan yang bisa dilakukan adalah mencari suatu kurva yang paling pas, atau pengepasan kurva (*curve fitting*), terhadap plot data antara nilai koreksi terhadap penunjukan instrumen. Perangkat statistik yang bisa digunakan adalah regresi (*regression*). Dengan menggunakan regresi ini maka dapat diketahui bentuk persamaan dari kurva pendekatan tersebut, yaitu suatu persamaan yang menunjukkan hubungan antara penunjukan instrumen dan nilai koreksinya. Dengan adanya persamaan tersebut maka dapat diketahui nilai koreksi untuk setiap

pembacaan instrumen walaupun pembacaan tersebut tidak termasuk titik yang dikalibrasi.

Karena hal ini merupakan suatu pendekatan maka akan terjadi kesalahan yang merupakan ukuran ketelitian yang dilakukan dan merupakan ketidakpastian dari proses regresi tersebut. Karena dihitung secara statistik, ketidakpastian regresi ini termasuk ketidakpastian jenis A, biasa disebut dengan kesalahan estimasi standar atau SEE (*standard error estimate*) yang merupakan nilai akar dari total kesalahan pangkat dua dan merupakan suatu ketidakpastian baku.



Gambar 4.1 Pengepasan Kurva Data dengan Fungsi Linier $y = ax + b$

Besarnya SEE ini bergantung pada jumlah titik kalibrasi serta orde dari persamaan kurva yang digunakan.

Misalkan plot dari n buah data (x,y) didekati dengan kurva $y = ax + b$, lihat Gambar 4.1, yaitu kurva pengepasan dengan dua buah konstanta maka ketidakpastian dari pendekatan ini adalah

$$SEE = u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i + b)]^2}{n - 2}} \quad (4.9)$$

Apabila didekati dengan $y = ax^2 + bx + c$, yaitu kurva pengepasan dengan tiga buah konstanta, maka ketidakpastian baku dari pendekatan ini adalah

$$SEE = u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - (ax_i^2 + bx + c)]^2}{n - 3}} \quad (4.10)$$

Untuk memudahkan dalam melakukan perhitungan regresi bisa digunakan Microsoft Excel. Dengan *software* aplikasi ini maka dapat diperoleh koefisien dari fungsi pengepasan kurva dan ketidakpastiannya.

Contoh 4

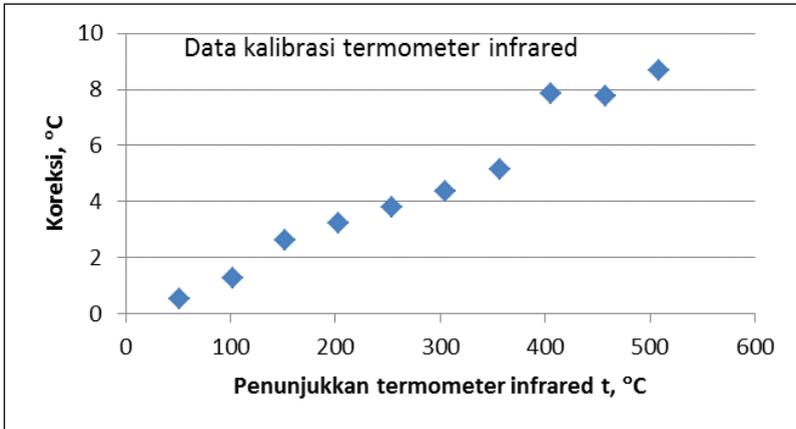
Suatu termometer inframerah jenis *direct reading* dikalibrasi terhadap termometer tahanan platina standar. Hasil kalibrasinya berupa nilai koreksi untuk setiap titik kalibrasi seperti pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Kalibrasi Termometer Inframerah

t, °C	Koreksi, °C
51,2	0,5
102,2	1,3
152,4	2,6
203,4	3,2
254,4	3,8
305,4	4,4
356,4	5,1
405,6	7,9
457,6	7,8
508,8	8,7

Pada Gambar 2 diperlihatkan plot data kalibrasi tersebut. Tentukan fungsi pengepasan kurva dari kalibrasi tersebut dan ketidakpastiannya. Karena keluaran termometer jenis *direct reading* merupakan besaran digital, fungsi pengepasan kurva untuk plot suhu termometer dan koreksinya merupakan persamaan polinomial orde-3 (Nicholas dan White 2005). Persamaannya adalah

$$\text{Koreksi} = a + b.t + c.t^2 + d.t^3 \quad (4.11)$$



Gambar 4.2 Plot Data Kalibrasi Termometer Inframerah

Penyelesaian:

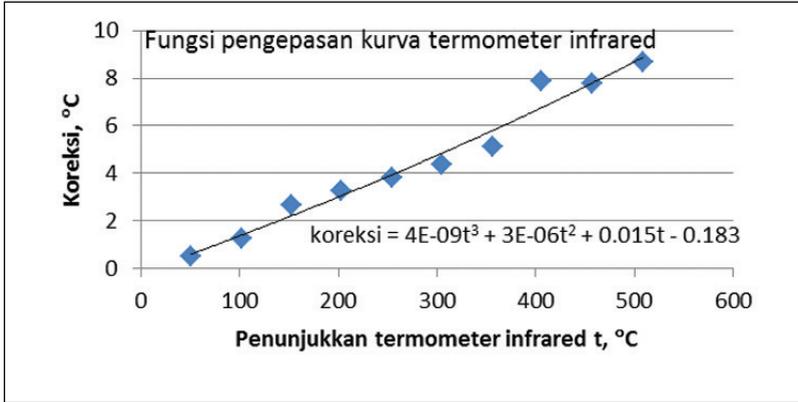
Untuk menentukan nilai konstanta a, b, c, dan d dapat digunakan salah satu fungsi dari Microsoft Excel, yaitu Regresi(). Bila menggunakan Microsoft Excel 2007 akan diperoleh koefisien polinomial orde-3 dari Persamaan (4.11) dan kesalahan dari pendekatan polinomial orde-3 seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Koefisien Polinomial dan Kesalahan Regresi

Coefficients		Regression Statistics	
Intercept	-0.183532715	Multiple R	0.984656503
X Variable 1	0.015061707	R Square	0.969548428
X Variable 2	3.45045E-06	Adjusted R Square	0.954322642
X Variable 3	3.82161E-09	Standard Error	0.6027913
		Observations	10

Berdasarkan Tabel 2, fungsi pengepasan kurva (Persamaan (4.11)) adalah $Koreksi = -0,18353271 + 0,015061707 \cdot t + 3,4505 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 3,8216 \cdot 10^{-9} \cdot t^3$

Ketidakpastian baku karena regresi sama dengan *standard error*, yaitu $0,627913^{\circ}\text{C} \approx 0,63^{\circ}\text{C}$.



Gambar 4.3 Fungsi Pengepasan Kurva untuk Plot Data Kalibrasi Termometer Inframerah

Dengan diperolehnya bentuk fungsi pengepasan kurva, nilai koreksi termometer inframerah untuk setiap nilai suhu dapat dihitung dengan cara menyubstitusikan nilai suhu tersebut ke dalam fungsi pengepasan kurva. Pada Tabel 4.3 diperlihatkan nilai koreksi untuk penunjukan suhu termometer inframerah yang dimaksud.

Tabel 4.3 Koreksi Kalibrasi Termometer Inframerah

t, °C	Koreksi, °C
50	0,6
100	1,4
150	2,2
200	3,0
250	3,9
300	4,7
350	5,7
400	6,6
450	7,6
500	8,7

D. KETIDAKPASTIAN JENIS B

Evaluasi tipe B dari ketidakpastian baku biasanya didasarkan pada pertimbangan ilmiah dengan menggunakan semua informasi relevan yang tersedia, yang dapat mencakup:

1. Data pengukuran sebelumnya;
2. Pengalaman dengan, atau pengetahuan umum, perilaku serta properti bahan yang relevan dan instrumen;
3. Spesifikasi pabrik;
4. Data yang tersedia dalam laporan kalibrasi dan lainnya; dan
5. Ketidakpastian pada data acuan yang diambil dari *handbook*.

Berikut adalah beberapa contoh dari ketidakpastian jenis B dalam situasi yang berbeda, bergantung pada informasi yang tersedia dan asumsi yang diambil oleh pelaku eksperimen. Secara umum, baik ketidakpastian yang diperoleh dari sumber luar maupun yang diperoleh dari distribusi yang diasumsikan.

1. Ketidakpastian yang Diperoleh dari Sumber Luar

Mengonversi ketidakpastian yang dikutip dari suatu *handbook*, spesifikasi pabrik, sertifikat kalibrasi, dan lain-lain, yang dinyatakan dalam kelipatan dari simpangan baku menjadi suatu ketidakpastian baku dengan membagi ketidakpastian yang dikutip tersebut dengan nilai kelipatannya.

Contoh 5

Dari suatu sertifikat kalibrasi dinyatakan: Ketidakpastian pengukuran adalah $1,9^{\circ}\text{C}$ untuk rentang suhu (50°C – 500°C) yang dinyatakan pada tingkat kepercayaan 95% dengan $k = 1,96$.

Penyelesaian:

Bila ketidakpastian tersebut memiliki tingkat kepercayaan (*confidence interval*) 95% atau 99%, diubah menjadi ketidakpastian baku dengan

cara membaginya dengan faktor yang sesuai untuk distribusi tersebut. Faktor-faktor ini adalah 1,960 untuk tingkat kepercayaan 95% dan 2,576 untuk tingkat kepercayaan 99%.

$U = 1,9^{\circ}\text{C}$, $k = 1,96$, maka ketidakpastian baku jenis B adalah $u = U/k = 1,9/1,96 = 0,97^{\circ}\text{C}$.

Contoh 6

Dari suatu sertifikat kalibrasi dinyatakan:

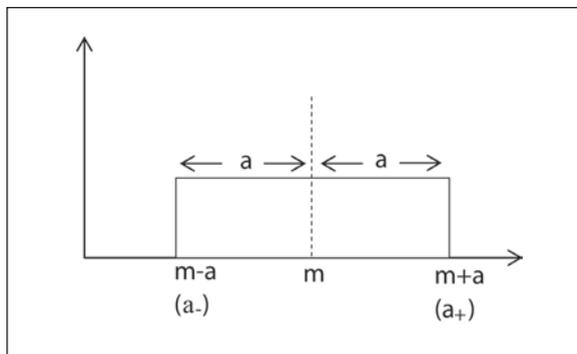
Ketidakpastian pengukuran untuk tingkat kepercayaan 99% adalah $2,5^{\circ}\text{C}$

Penyelesaian:

$U = 2,5^{\circ}\text{C}$, $k = 2,576$, maka ketidakpastian baku jenis B adalah $u = U/k = 2,5/2,576 = 0,97^{\circ}\text{C}$.

2. Distribusi Segiempat

Perkiraan batas bawah dan atas untuk nilai kuantitas masukan yang dimaksud adalah a dan a_+ , sedemikian rupa sehingga probabilitas dari nilai masukan yang terletak pada interval a dan a_+ tersebut adalah 100%.

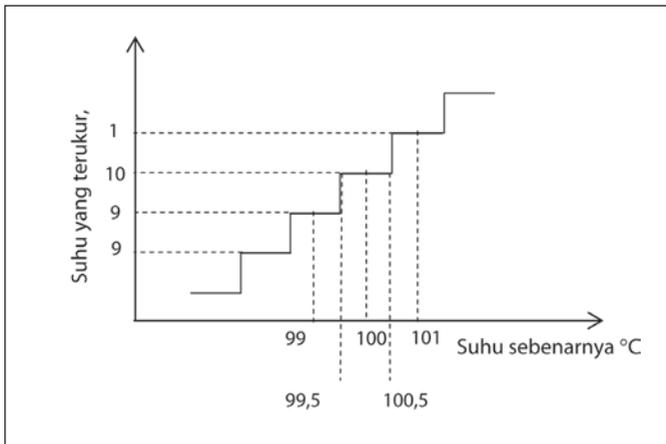


Gambar 4.4 Distribusi Segiempat

Asalkan tidak ada informasi yang kontradiktif, yang memberlakukan kuantitas memiliki kemungkinan yang sama untuk nilai yang berada di mana saja dalam interval antara a_- dan a_+ , yaitu memodelkannya dengan distribusi probabilitas yang merata (segiempat) maka estimasi terbaik dari nilai kuantitas $m = (a_+ + a_-)/2$ dengan ketidakpastian $u = a/\sqrt{3}$, di mana $a = (a_+ - a_-)/2$ adalah setengah lebar interval. Bila suatu sumber ketidakpastian sulit ditentukan jenis distribusinya, sumber ketidakpastian tersebut dapat dianggap memiliki distribusi segiempat.

Contoh 7

Pengukuran suhu dengan termometer digital yang memiliki resolusi 1°C . Bila termometer menunjukkan 100°C , suhu sebenarnya berada di antara $99,5^\circ\text{C}$ dan $100,5^\circ\text{C}$.



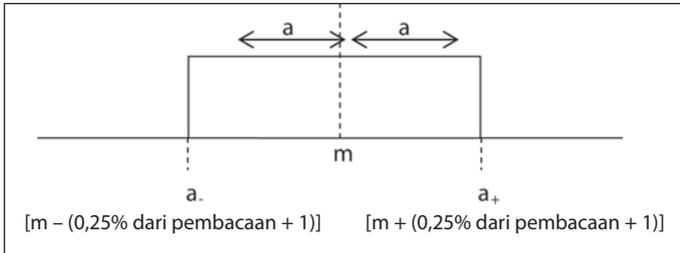
Gambar 4.5 Pengukuran Suhu dengan Termometer Digital Beresolusi 1°C

Dengan demikian, $a_+ = 100,5^\circ\text{C}$ dan $a_- = 99,5^\circ\text{C}$ sehingga $a = (100,5 - 99,5)/2 = 0,5$ dan $u = 0,5/\sqrt{3} = 0,29^\circ\text{C}$. Dari contoh ini terlihat bahwa ketidakpastian baku dari resolusi alat (digital) adalah $u = (1/2 \cdot \text{resolusi})/\sqrt{3}$.

Contoh 8

Berdasarkan spesifikasi teknis yang dikeluarkan oleh pabrik, termometer digital memiliki ketelitian (*accuracy*) $\pm 0,25\%$ dari pembacaan $+1,0^\circ\text{C}$. Tentukanlah ketidakpastian baku yang berasal dari spesifikasi pada suhu 500°C .

Penyelesaian:



$$a = (a_+ - a_-)/2 = 0,25\%$$

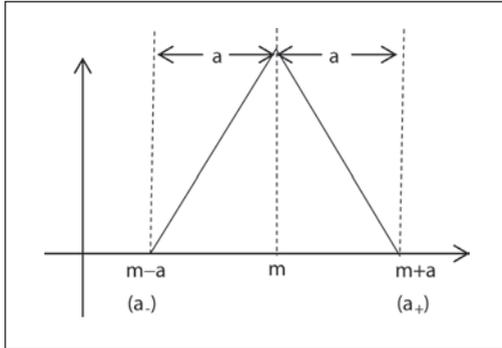
$$\text{dari pembacaan} + 1 = (0,25/100) \times 500 + 1 = 2,25^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow \text{ketidakpastian baku} = u = a/\sqrt{3} = 2,25/\sqrt{3} = 1,3^\circ\text{C}$$

3. Distribusi Segitiga

Distribusi segiempat adalah model standar yang wajar dalam ketiadaan informasi lainnya. Namun, jika diketahui bahwa nilai dari kuantitas yang dimaksud dekat dengan pusat dari batas, suatu distribusi normal atau, untuk penyederhanaan, distribusi segitiga, mungkin model yang lebih baik.

Perkiraan batas bawah dan atas a_- dan a_+ untuk nilai kuantitas masukan yang dimaksud sedemikian rupa sehingga probabilitas dari kuantitas tersebut terletak pada interval antara a_- dan a_+ adalah 100%. Asalkan tidak ada informasi yang kontradiktif, gambarkan kuantitas tersebut dengan distribusi probabilitas segitiga. Estimasi terbaik dari nilai kuantitas $\mu_t = (a_+ + a_-)/2$ dengan ketidakpastian $u = a/\sqrt{6}$, di mana $a = (a_+ - a_-)/2$ adalah setengah lebar interval.



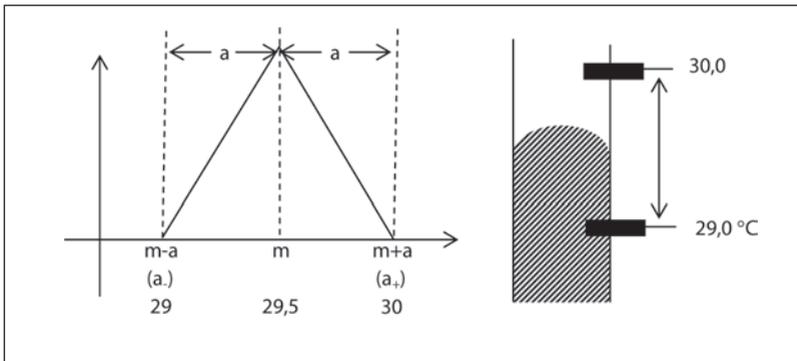
Gambar 4.6 Distribusi Segitiga

Contoh 9

Tentukan ketidakpastian baku karena resolusi pada saat membaca penunjukan termometer gelas berikut ini.

Penyelesaian:

Pada gambar sebelah kanan diperlihatkan bahwa resolusi termometer gelas adalah 1°C .



$$a = (a_+ - a_-)/2 = [(m + a) - (m - a)]/2 = (30,0 - 29,0)/2 = 0,5$$

$$u = a/\sqrt{6} = 0,5/\sqrt{6} = 0,08^{\circ}\text{C} \approx 0,1^{\circ}\text{C}$$

E. MENGGABUNGKAN KOMPONEN KETIDAKPASTIAN

Ketidakpastian baku gabungan (*combined standard uncertainty*) dari hasil pengukuran, dengan simbol $u_c(y)$, dan digunakan untuk menuliskan estimasi simpangan baku dari y adalah akar positif dari estimasi variansi $u_c^2(y)$ yang diperoleh dari

$$\begin{aligned}
 u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \\
 &+ 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (4.12)
 \end{aligned}$$

dengan :

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \text{turunan parsial terhadap } x_i$$

Pada Tabel 4 diperlihatkan turunan parsial dari beberapa fungsi sederhana.

Tabel 4.4 Turunan Parsial Fungsi Sederhana

Bentuk Fungsi $z = f(x, y)$	$\partial z / \partial x$	$\partial z / \partial y$
$z = x + y$	1	1
$z = x - y$	1	-1
$z = x/y$	$1/y$	$-x/y^2$
$z = xy$	y	x
$z = x^n$	nx^{n-1}	-

Contoh 10

Tentukan turunan parsial dari fungsi berikut

- $z = 3x + 2xy$
- $z = 2x^3/5y^2$

Penyelesaian:

- $\partial z / \partial x = 3 + 2y, \partial z / \partial y = 2x$
- $\partial z / \partial x = 6x^2/5y^2, \partial z / \partial y = -4x^3/5y^3$

Persamaan (4.12) didasarkan pada pendekatan deret Taylor orde pertama dari persamaan pengukuran $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (4.1) dan disebut sebagai hukum propagasi ketidakpastian. Turunan parsial dari f terhadap X_i (sering disebut koefisien sensitivitas) sama dengan turunan parsial dari f sehubungan dengan X_i dan dievaluasi di $X_i = x_i$. $u(x_i)$ adalah ketidakpastian baku yang terkait dengan estimasi masukan x_i ; dan $u(x_i, x_j)$ adalah estimasi kovariansi yang terkait dengan x_i dan x_j .

Untuk keperluan praktis, Persamaan (4.12) sering diubah ke dalam bentuk yang lebih sederhana. Sebagai contoh, jika estimasi masukan x_i dari masukan X_i dapat diasumsikan tidak berkorelasi maka bagian kedua dari Persamaan (4.12) dapat diabaikan sehingga Persamaan (4.12) menjadi lebih sederhana.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (4.13)$$

Jika distribusi probabilitas ditandai dengan hasil pengukuran y dan gabungan ketidakpastian baku $u_c(y)$ adalah sekitar normal (Gaussian), dan $u_c(y)$ adalah estimasi dari simpangan baku y maka interval antara $y - u_c(y)$ dan $y + u_c(y)$ diharapkan mencakup sekitar 68% dari distribusi nilai yang dapat dikaitkan dengan nilai kuantitas Y . Ini berarti bahwa dengan tingkat kepercayaan 68%, nilai Y lebih besar dari atau sama dengan $y - u_c(y)$ dan kurang dari atau sama dengan $y + u_c(y)$, yang umumnya ditulis sebagai $Y = y \pm u_c(y)$.

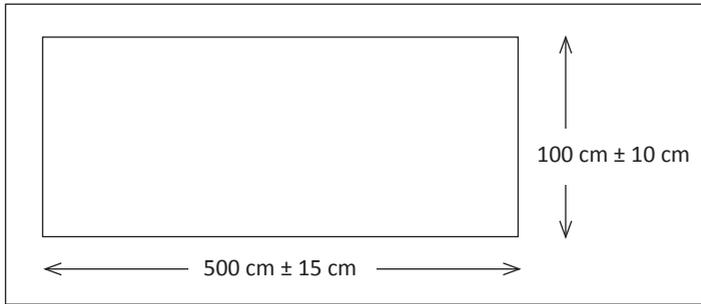
Contoh 11

Untuk mengecat dinding berbentuk segiempat, perlu diketahui luas dinding tersebut agar dapat diestimasi banyaknya cat yang diperlukan. Untuk mengetahui luas dinding telah diukur panjang dan tinggi dinding. Dari pengukuran tersebut diperoleh data sebagai berikut

$$\text{Panjang} = \text{panjang} \pm u_{\text{panjang}} = (500 \pm 15) \text{ cm}$$

$$\text{Tinggi} = \text{tinggi} \pm u_{\text{tinggi}} = (100 \pm 10) \text{ cm}$$

Penyelesaian:



Persamaan pengukuran:

$$\text{Luas} = \text{Panjang} \times \text{Tinggi} = f(\text{Panjang}, \text{Tinggi})$$

Hasil pengukuran:

$$\text{luas} = \text{panjang} \times \text{tinggi} = (500 \times 100) \text{ cm}^2 = 50.000 \text{ cm}^2 = 5,0 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} u_c^2(\text{luas}) &= \left(\frac{\partial \text{luas}}{\partial \text{panjang}} \right)^2 \cdot u_{\text{panjang}}^2 + \left(\frac{\partial \text{luas}}{\partial \text{tinggi}} \right)^2 \cdot u_{\text{tinggi}}^2 \\ &= (\text{tinggi})^2 \cdot u_{\text{panjang}}^2 + (\text{panjang})^2 \cdot u_{\text{tinggi}}^2 \\ &= (100)^2 \cdot (15)^2 + (500)^2 \cdot (10)^2 = 27250000 \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{Luas} = \text{luas} \pm u_c(\text{luas}) = (5,0 \pm 0,5) \text{ m}^2$$

F. KETIDAKPASTIAN YANG DIPERLUAS DAN FAKTOR CAKUPAN

Meskipun mengekspresikan ketidakpastian dari hasil pengukuran, ketidakpastian baku gabungan $u_c(y)$ digunakan untuk beberapa aplikasi komersial, industri, dan regulasi, misalnya ketika kesehatan dan keselamatan menjadi sesuatu tujuan, diperlukan nilai ketidakpastian dengan tingkat kepercayaan yang lebih besar daripada 68%. Ukuran ketidakpastian yang memenuhi persyaratan ini disebut ketidakpastian diperluas (*expanded uncertainty*) dengan simbol U , dan diperoleh dengan mengalikan $u_c(y)$ dengan faktor cakupan, yang memiliki

simbol k . Jadi, $U = k \cdot u_c(y)$ dan diyakini bahwa Y lebih besar dari atau sama dengan $y - U$, dan kurang dari atau sama dengan $y + U$, yang umumnya ditulis sebagai $Y = y \pm U$.

Secara umum, nilai faktor cakupan k dipilih berdasarkan tingkat kepercayaan yang diinginkan untuk dihubungkan dengan interval yang ditentukan oleh $U = k \cdot u_c(y)$. Biasanya, k berada dalam kisaran 2 sampai 3. Ketika distribusi normal berlaku dan $u_c(y)$ adalah suatu estimasi yang sesuai dengan simpangan baku dari y maka $U = 2 \cdot u_c(y)$ (yaitu, $k = 2$) adalah ketidakpastian yang memiliki tingkat kepercayaan sekitar 95%, dan $U = 3 \cdot u_c(y)$ (yaitu, $k = 3$) adalah ketidakpastian yang memiliki tingkat kepercayaan sekitar 99,7%. Dengan demikian, pernyataan besaran yang diukur Y dengan tingkat kepercayaan 95% dan dengan faktor cakupan $k = 2$ adalah $Y = y \pm 2 \cdot u_c(y)$.

Contoh 12

Tentukanlah ketidakpastian diperluas untuk luas dinding pada tingkat kepercayaan 95% pada contoh soal 4.5.

Penyelesaian:

$$u_c(\text{luas}) = \sqrt{27250000} = 5220,153 \text{ cm}^2$$

Ketidakpastian diperluas $U(\text{luas})$ dengan tingkat kepercayaan 95% adalah $U(\text{luas}) = k \times u_c(\text{luas})$

$$= 2 \times 5.220,153 \text{ cm}^2$$

$$= 10.440,31 \text{ cm}^2 \approx 1,0 \text{ m}^2$$

G. LANGKAH-LANGKAH PENENTUAN KETIDAKPASTIAN PENGUKURAN

Sebagai resume dari uraian di atas, langkah-langkah yang dilakukan untuk menentukan ketidakpastian pengukuran adalah

1. Buat persamaan pengukuran yang menghubungkan *output* dengan *input* pengukuran;
2. Daftarkan seluruh sumber/komponen ketidakpastian;
3. Hitung ketidakpastian baku untuk masing-masing komponen dengan menggunakan evaluasi tipe A untuk pengukuran berulang dan regresi, dan menggunakan evaluasi tipe B untuk yang lainnya;
4. Hitung koefisien sensitivitas;
5. Hitung ketidakpastian gabungan (*combined uncertainty*);
6. Hitung ketidakpastian diperluas (*expanded uncertainty*).

Bab 5

Kalibrasi Termometer Inframerah

A. KALIBRASI DAN KETERTELUSURAN

Kalibrasi dan ketertelusuran adalah dua hal yang selalu berkaitan. Ada tidaknya ketertelusuran bergantung pada ada tidaknya kalibrasi. Keterkaitan ini bisa dilihat dari definisi kalibrasi dan ketertelusuran berikut ini.

Kalibrasi:

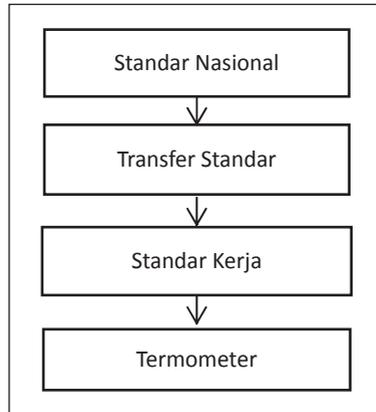
Suatu kegiatan untuk menentukan kebenaran konvensional nilai menunjukkan alat ukur dengan cara membandingkannya terhadap standar ukurnya yang tertelusur ke standar nasional/internasional.

Tertelusur (*traceable*):

Karakter hasil pengukuran yang dapat dihubungkan ke standar yang sesuai, nasional/internasional, melalui rantai pembandingan yang tidak terputus.

Berdasarkan definisi di atas, tujuan utama dari kalibrasi termometer adalah membuat adanya keterkaitan antara hasil pengukuran termometer dengan standar nasional. Keterkaitan tersebut dapat diperoleh melalui serangkaian proses kalibrasi sehingga tercipta suatu jalur komparasi yang tidak terputus antara standar nasional dan termometer tersebut. Jalur komparasi, yang biasa disebut diagram ketertelusuran (*traceability chart*), memperlihatkan hierarki proses kalibrasi dari standar nasional sampai ke termometer, seperti yang

diperlihatkan pada Gambar 5.1. Arah panah menunjukkan arah kalibrasi, yaitu yang di atas mengkalibrasi yang di bawah. Dalam hal ini, standar nasional mengkalibrasi transfer standar, kemudian transfer standar mengkalibrasi standar kerja dan terakhir standar kerja mengkalibrasi termometer.



Gambar 5.1 Diagram Ketertelusuran Termometer

Standar nasional adalah implementasi praktis dari suhu standar yang telah didefinisikan dalam ITS-90 (*the International Temperature Scale of 1990*), seperti yang diperlihatkan pada Tabel 5.1 (Preston-Thomas 1990). Implementasi praktis tersebut diwujudkan dalam bentuk sumber panas bernilai suhu tunggal dan sangat stabil yang disebut titik-tetap (*fixed-point*).

Sebagai contoh, maksud dari Sn(F) menyatakan bahwa suhu sebesar 231,928 °C didefinisikan sebagai suhu timah saat berada pada fase transisi antara fase cair dan fase padat (*freeze*). Fase cair diperoleh dengan cara memanaskan logam Sn pada suhu di atas titik-lelehnya sehingga mencair. Setelah seluruh logam tersebut mencair, suhu pemanasan kemudian diturunkan beberapa derajat di bawah suhu titik-beku logam Sn.

Tabel 5.1 Definisi ITS-90 untuk Suhu Standar

Bahan	Suhu	
	T_{90} , K	t_{90} , °C
${}^3\text{He}$ (V) atau ${}^4\text{He}$ (V)	3 s.d. 5	-270,15 s.d. -268,15
e- H_2 (T)	13,8033	-259,3467
e- H_2 (V) atau ${}^3\text{He}$ (G) atau ${}^4\text{He}$ (G)	≈ 17	$\approx -256,15$
e- H_2 (V) atau ${}^3\text{He}$ (G) atau ${}^4\text{He}$ (G)	$\approx 20,3$	$\approx -252,85$
N_e (T)	24,5561	-248,5939
O_2 (T)	54,3584	-218,7916
Ar (T)	83,8058	-189,3442
Hg (T)	234,3156	-38,8344
H_2O (T)	273,16	0,01
Ga (M)	302,9146	29,7646
In (F)	429,7485	156,5985
Sn (F)	505,078	231,928
Zn (F)	692,677	419,527
Al (F)	933,473	660,323
Ag (F)	1.234,93	961,78
Au (F)	1.337,33	1.064,18
Cu (F)	1.357,77	1.084,62

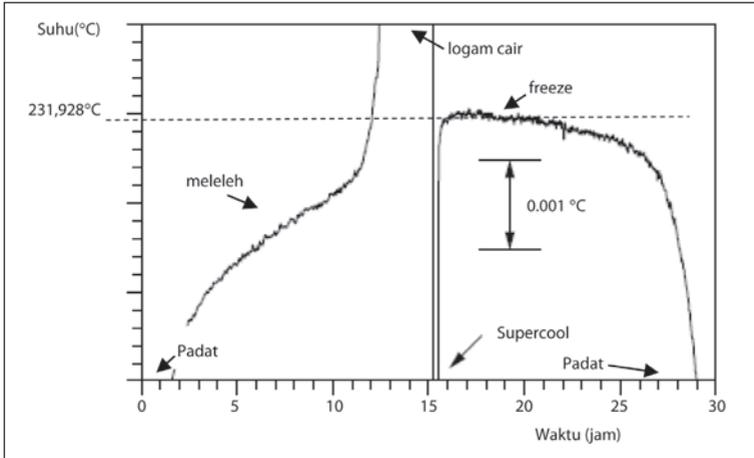
Sumber: Preston-Thomas 1990, 5

Catatan:

V = uap (*vapour*), G = gas, T = titik tripel (*triple point*), M = titik leleh (*melting point*),

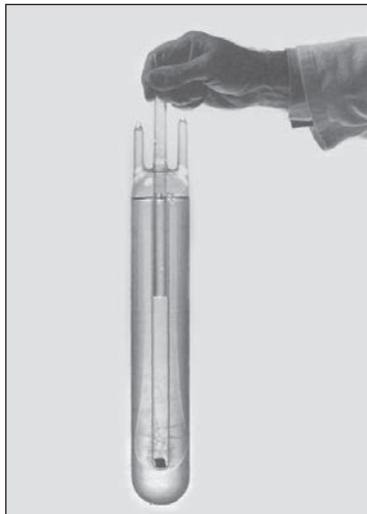
F = titik beku (*freezing point*)

Selanjutnya, suhu logam cair tersebut menurun dengan disertai perubahan fase secara berangsur-angsur, dari fase cair menjadi fase padat. Sebelum fase padat terbentuk, selama selang waktu tertentu, umumnya sekitar 10 menit, logam berada pada fase transisi, yang disebut kondisi *freeze* (*freezing condition*), yaitu kondisi logam yang sedang melepaskan panas pada suhu yang tetap, yaitu sebesar 231,928°C. Pada Gambar 5.2 diperlihatkan kurva proses transisi fase yang terjadi pada logam timah tersebut (Nicholas dan White 2005).



Gambar 5.2 Kurva Transisi Fase Logam Timah (Sn)

Pada Gambar 5.3 diperlihatkan contoh salah satu bentuk titik-tetap, yang merupakan standar nasional untuk termometer kontak, yaitu titik-tetap air.

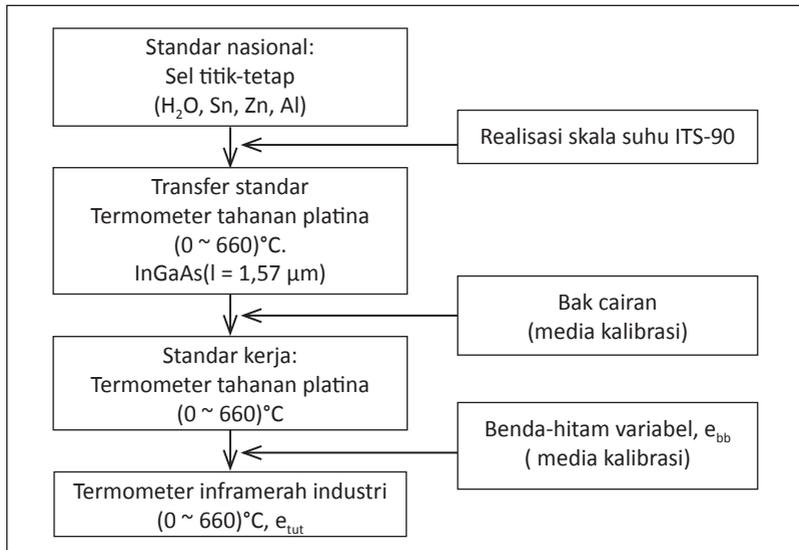


Sumber: Nicholas dan White 2005, 98

Gambar 5.3 Titik-Tetap Air (*Triple Point Of Water, 0,01°C*)

Termometer transfer standar adalah termometer dengan skala suhu sebagai hasil suatu upaya realisasi yang menggunakan beberapa titik-tetapan dari standar nasional. Realisasi tersebut mengacu pada aturan formal ITS-90. Sebagai contoh, untuk merealisasikan skala suhu antara $0,01^{\circ}\text{C}$ dan $660,323^{\circ}\text{C}$ ITS-90 (Preston-Thomas 1990) dinyatakan:

- Skala suhu dapat direalisasikan pada termometer tahanan platina;
- Termometer tersebut harus dikalibrasi terhadap empat buah titik-tetapan, yaitu titik-tetapan air ($0,01^{\circ}\text{C}$), timah ($231,928^{\circ}\text{C}$), seng ($419,527^{\circ}\text{C}$), dan aluminium ($660,323^{\circ}\text{C}$);
- Data hasil kalibrasi diolah menjadi suatu persamaan interpolasi yang menghubungkan *output* termometer tahanan platina, dalam ohm, dengan suhu;
- Persamaan interpolasi tersebut merupakan ekspresi skala suhu antara $0,01^{\circ}\text{C}$ dan $660,323^{\circ}\text{C}$ pada termometer tahanan platina.



Gambar 5.4 Diagram Ketertelusuran Termometer Inframerah

Selanjutnya, termometer transfer standar menurunkan skala suhunya pada termometer standar kerja melalui proses kalibrasi dengan metode komparasi. Kalibrasi ini akan menghasilkan suatu persamaan skala suhu dari termometer standar kerja yang disebut dengan persamaan Calendar-van Dussen. Pada penggunaannya, termometer tersebut digunakan sebagai kalibrator termometer industri, baik termometer kontak maupun nonkontak. Sebagai contoh dari semua uraian ini, pada Gambar 5.4 diperlihatkan ketertelusuran hasil pengukuran suatu termometer inframerah industri untuk rentang suhu (0 - 660) °C terhadap standar nasional.

Dengan demikian, proses kalibrasi berjenjang termometer inframerah ini menghasilkan skala suhu termometer inframerah yang telah tertelusur ke standar nasional. Ketertelusuran termometer inframerah tersebut dinyatakan dengan nilai koreksi, yaitu selisih antara nilai penunjukan suhu standar dengan TUT. Pada kalibrasi termometer inframerah suhu standar diketahui fungsi suhu yang ditunjukkan oleh termometer standar, suhu sekeliling, suhu detektor TUT, emisivitas TUT (e_{tut}), dan emisivitas media kalibrasi (e_{tut}). Hasil perhitungan fungsi tersebut berupa suhu yang diharapkan (*expected*) tampil pada *display* termometer inframerah yang dikalibrasi, t_{exp} . Lihat Persamaan (5.3) dan Persamaan (5.7). Pada Tabel 5.2 diperlihatkan contoh nilai koreksi termometer inframerah.

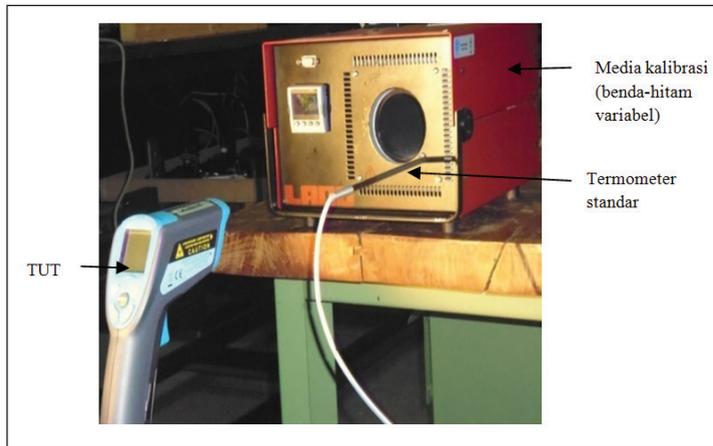
Tabel 5.2 Contoh Tabel Koreksi

Set-point, °C	Koreksi, °C				
	0	10	20	30	40
50	1	1	1	2	2
100	2	2	3	3	3
150	3	3	3	3	3
200	3	3	3	3	3
250	3	3	3	3	2
300	2	2	2	2	2
350	1	1	1	1	1
400	0	0	0	0	0
450	-1	-1	-1	-1	-1
500	-2				

Dari tabel ini dapat diketahui suhu koreksi yang harus ditambahkan pada suhu yang ditunjukkan termometer inframerah. Sebagai contoh, bila penunjukan termometer inframerah 80°C maka koreksinya $+2^{\circ}\text{C}$ sehingga suhu penunjukan termometer yang terkoreksi adalah 82°C dan tertelusur ke standar nasional.

B. SISTEM KALIBRASI TERMOMETER INFRAMERAH

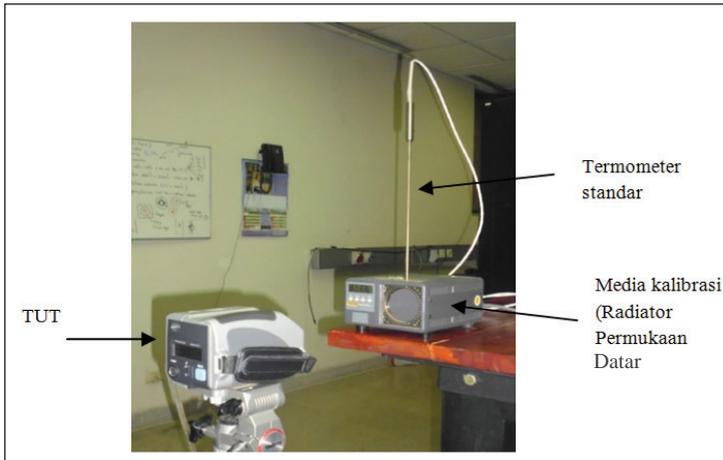
Laboratorium kalibrasi dalam melakukan pelayanan kalibrasi termometer inframerah bisa menggunakan sistem kalibrasi seperti pada Gambar 5.5 atau Gambar 5.6 (Nicholas dan White 2005).



Gambar 5.5 Sistem Kalibrasi dengan Media Kalibrasi Benda-Hitam Variabel

Seperti diperlihatkan pada Gambar 5.5 dan Gambar 5.6, sistem kalibrasi termometer inframerah terdiri media kalibrasi berupa benda-hitam variabel atau radiator permukaan datar dan termometer standar berupa termometer kontak, seperti termokopel atau termometer tahanan platina. Sebelum membahas proses kalibrasi termometer inframerah, terlebih dahulu akan dibahas karakteristik media kalibrasi

dan termometer standar yang biasa dipergunakan pada kalibrasi termometer inframerah.



Gambar 5.6 Sistem Kalibrasi dengan Media Kalibrasi Radiator Permukaan Datar

C. MEDIA KALIBRASI TERMOMETER INFRAMERAH

1. Benda-Hitam Variabel

Untuk menjadi sebuah benda-hitam yang ideal, suhu rongga benda-hitam harus merata pada seluruh permukaannya. Namun, kenyataan praktis memperlihatkan bahwa keadaan tersebut sulit dicapai karena sulitnya memberikan pemanasan yang merata pada seluruh bahan rongga serta adanya arus konveksi udara di sekitar bukaan (*aperture*) rongga benda-hitam. Arus konveksi tersebut berupa aliran udara dingin yang memasuki rongga sehingga mengganggu keseimbangan panas pada dinding rongga. Dengan demikian, kedua hal tersebut menyebabkan besarnya suhu pada dinding rongga tidak merata atau tidak homogen (*unhomogeneity*).

Faktor lainnya adalah pengaruh hilangnya energi karena emisi radiasi panas pada bukaan benda-hitam sehingga pemanas (*heater*) sekeliling rongga harus terus-menerus mengganti energi yang hilang.

Dengan demikian, dari waktu ke waktu akan terjadi perbedaan suhu sepanjang dinding rongga dan ini akan berkaitan dengan tingkat stabilitas yang dimiliki oleh rongga benda-hitam. Selain itu, untuk sistem kalibrasi termometer inframerah yang menggunakan termometer kontak sebagai termometer standar, posisi termometer tersebut tidak bisa berada pada posisi yang sama dengan titik permukaan kalibrasi sehingga bisa saja terjadi suhu yang diukur oleh termometer standar besarnya tidak sama dengan suhu pada permukaan kalibrasi (gradien suhu).

Karena kondisi tersebut tidak bisa dihindari maka sebelum digunakan, homogenitas, stabilitas dan gradien suhu harus diketahui terlebih dahulu melalui proses pengukuran (Hartmann 2010).

2. Radiator Permukaan Datar

Suhu dari radiator permukaan datar bisa diatur dengan menggunakan suatu pengontrol suhu. Pengaturan suhu dilakukan dengan mengontrol suhu yang dikeluarkan oleh termokopel atau termometer tahanan platina yang ditempelkan pada bagian belakang permukaan datar tersebut. Besarnya emisivitas permukaan datar diperoleh dengan melapisi permukaan tersebut dengan bahan tertentu sehingga memiliki emisivitas tertentu pula, misalnya emisivitas 0,95 pada panjang gelombang (8–14) mm. Seperti halnya dengan benda-hitam variabel, radiator permukaan memerlukan suatu pengujian agar diketahui homogenitas, stabilitas dan gradien suhunya (Hartmann 2010). Pada uraian berikutnya, kedua jenis media kalibrasi disebut benda-hitam.

3. Prosedur Penggunaan Benda-Hitam

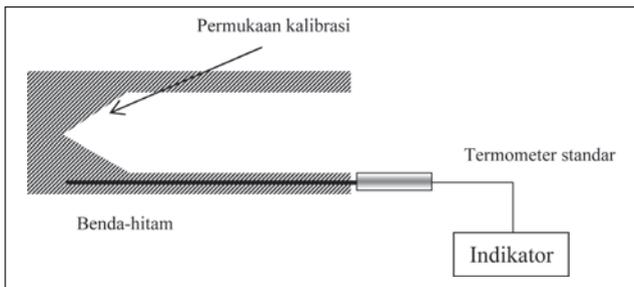
Pada saat menggunakan benda-hitam, ada aturan-aturan baku yang harus diikuti, yaitu

- a. Termometer inframerah harus diarahkan tegak lurus ke bagian tengah benda-hitam. Jika diarahkan dengan membentuk sudut, radiasi inframerah yang terpantul dapat mengganggu akurasi kalibrasi.

- b. Pada jarak yang dipilih, diameter gratikul medan pandang termometer jenis kamera harus lebih kecil dari diameter benda-hitam (lihat Gambar 3.6.b.). Jarak termometer jenis *handheld* adalah setengah dari jarak yang dihitung berdasarkan *distance to spot size* termometer tersebut (lihat Gambar 3.8).
- c. Jangan menempatkan termometer inframerah terlalu dekat dengan daerah target dari benda-hitam terutama pada suhu tinggi. Radiasi panas yang terpancar dari benda-hitam berpotensi merusak termometer inframerah yang dikalibrasi.
- d. Termometer inframerah harus dipertahankan selalu terarah ke bagian tengah permukaan kalibrasi benda-hitam.
- e. Kalibrasi dilakukan pada saat suhu benda-hitam telah stabil.
- f. Jangan mematikan sumber daya pada saat benda-hitam masih dalam kondisi panas. Ubah suhu *set-point* benda-hitam menjadi sama dengan suhu ruang, sekitar 25°C atau 30°C , dan sumber daya ke benda-hitam dimatikan bila suhu *set-point* tersebut telah tercapai.

D. TERMOMETER STANDAR

Pada rentang kalibrasi sampai dengan 1.000°C , termometer standar yang digunakan adalah termokopel atau termometer tahanan platina. Termometer standar tersebut ditempatkan pada media kalibrasi



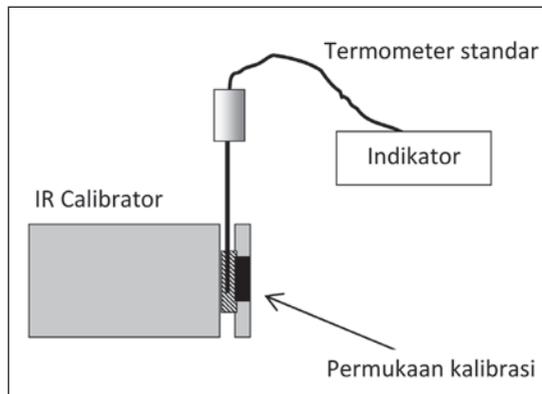
Gambar 5.7 Penempatan Termometer Standar pada Benda-Hitam Variabel

dalam suatu lubang memanjang yang berujung pada atau dekat ke permukaan kalibrasi.

Seperti terlihat pada Gambar 5.7, bila termometer standar dimasukkan ke lubang tersebut maka bagian ujung termometer dapat mengukur suhu pada posisi yang relatif sama dengan permukaan kalibrasi. Dalam kaitan ini, ujung termometer standar harus benar-benar menyentuh ujung lubang tersebut, bila tidak seperti itu maka yang akan terukur adalah suhu udara yang berada di antara ujung termometer standar dan ujung lubang media kalibrasi sehingga akan terjadi kesalahan kalibrasi. Hal ini berlaku pula pada radiator permukaan datar, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5.8.

Bila indikator menampilkan *output* termometer standar dalam °C atau °F, proses komparasi akan lebih cepat dibandingkan bila indikator menampilkan *output* termometer standar dalam bentuk tegangan listrik DC atau tahanan listrik karena masih diperlukan waktu untuk mengubah *output* tersebut menjadi besaran suhu dalam °C atau °F.

Sebagai contoh, misalkan termometer standar yang digunakan adalah termometer tahanan platina dengan *output* berupa nilai tahanan dalam ohm. Untuk mengubahnya menjadi besaran suhu



Gambar 5.8 Penempatan Termometer Standar pada Radiator Permukaan Datar

dalam °C bisa digunakan metode iterasi pada persamaan Calendar-van Dussen dari termometer tahanan platina tersebut. Adapun persamaan Calendar-van Dussen dari suatu termometer tahanan platina adalah

$$W(t) = 1 + At + Bt^2 + Dt^3 \quad (5.1)$$

dengan:

$$W(t) = R(t)/R_{H_2O}$$

$R(t)$ = *output* termometer tahanan platina pada suhu sembarang t , ohm

R_{H_2O} = *output* termometer tahanan platina pada titik es (0°C), ohm

A, B, D = konstanta kalibrasi termometer tahanan platina.

Nilai R_{H_2O} dan konstanta kalibrasi bisa diperoleh pada sertifikat kalibrasi termometer tahanan platina tersebut. Dengan mengubah Persamaan (5.2) menjadi Persamaan iterasi (Nicholas dan White 2005, 242) seperti berikut ini

$$t_n = \frac{W(t) - 1}{A + Bt_n + Dt_{n-1}^2} \quad (5.2)$$

maka *output* termometer tahanan platina tersebut dapat diubah menjadi besaran suhu.

Contoh 5.1

Gunakan Persamaan (5.3) untuk mengetahui suhu pembacaan termometer tahanan platina dengan $R(t) = 260 \Omega$. Dari sertifikat kalibrasinya diperoleh informasi sebagai berikut:

- $R_{H_2O} = 100 \Omega$
- Konstanta kalibrasi: $A = 4.10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $B = -6.10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$, $D = 0$

Penyelesaian:

Dengan menggunakan Microsoft Excel, proses iterasi dilakukan dengan urutan langkah sebagai berikut.

- Hitung $W(t)$

$$W(t) = \frac{R(t)}{R(H_2O)} = \frac{260}{100} = 2,6$$

- Lakukan iterasi:

- Pada iterasi ke-1 berikan nilai awal = 0 ke t_{n-1} , kemudian nilai awal ini dihitung dengan menggunakan Persamaan (5.3) untuk memperoleh nilai t_n dan selanjutnya dihitung nilai $Dt_n = t_n - t_{n-1}$
- Pada iterasi ke-2, t_{n-1} diisi dengan nilai t_n , kemudian lakukan langkah seperti iterasi ke-1.
- Lakukan iterasi berulang-ulang sampai diperoleh nilai Dt_n mendekati atau sama dengan nol.

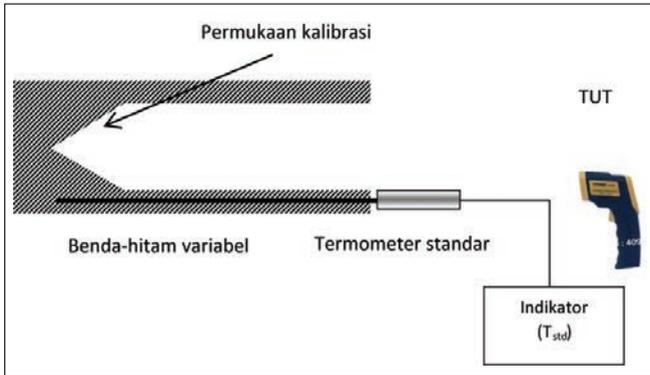
Gambaran numerik dari iterasi tersebut adalah

Iterasi ke-n	t_{n-1}	t_n	Δt_n
1	0,00	400,00	400,00
2	400,00	425,53	25,53
3	425,53	427,27	1,74
4	427,27	427,39	0,12
5	427,39	427,40	0,01
6	427,40	427,40	0,00

Karena pada iterasi ke-6 nilai $Dt_n = 0$ maka suhu pembacaan termometer tahanan platina adalah $427,40^\circ\text{C}$.

E. PERSAMAAN KALIBRASI TERMOMETER INFRAMERAH

Persamaan kalibrasi diturunkan berdasarkan skema sistem kalibrasi yang menggunakan media kalibrasi benda-hitam variabel, seperti yang terlihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Skema Sistem Kalibrasi dengan Media Benda-Hitam Variabel

Meski demikian, persamaan kalibrasi yang diperoleh berlaku pula untuk sistem kalibrasi yang menggunakan media kalibrasi Radiator Permukaan Datar. Bila emisivitas benda-hitam adalah ϵ_{bb} , suhu benda-hitam adalah t_{bb} , suhu sekeliling adalah t_{amb} , suhu detektor termometer inframerah adalah t_d dan emisivitas termometer inframerah adalah ϵ_{TUT} maka suhu yang diharapkan tampil pada *display* termometer inframerah, t_{exp} , adalah nilai suhu yang memenuhi persamaan (MSL Technical Guide 22 2009, 4)

$$I_{TUT}(T_{exp}) = \frac{\epsilon_{bb}(\lambda)I_{TUT}(T_{bb}) + (1 - \epsilon_{bb}(\lambda))I_{TUT}(T_{amb}) - (1 - \epsilon_{TUT}(\lambda))I_{TUT}(T_d)}{\epsilon_{TUT}(\lambda)} \quad (5.3)$$

dengan:

$I_{TUT}(T_{bb})$ = *output* detektor karena radiasi panas benda-hitam yang mengenai detektor, A

$I_{TUT}(T_{amb})$ = *output* detektor karena radiasi panas benda sekeliling yang mengenai detektor, A

$I_{TUT}(T_d)$ = *output* detektor karena radiasi panas yang keluar dari detektor, A

T_{bb} adalah suhu benda-hitam yang diukur dengan termometer standar seperti yang ditampilkan pada indikator termometer standar, atau $T_{bb} = T_{\text{standar}}$. Indeks TUT pada I menunjukkan bahwa nilai I dihitung dengan menggunakan nilai konstanta A dan B dari TUT. Bentuk Persamaan (5.3) mengacu pada Persamaan (3.12), yaitu persamaan yang merepresentasikan Gambar 3.10.

Bila termometer inframerah memiliki pengatur emisivitas, dan emisivitasnya diset sama dengan satu, $e_{TUT}(\lambda) = 1$, maka Persamaan (5.3) menjadi

$$I_{TUT}(T_{\text{exp}}) = \varepsilon_{bb}(\lambda)I_{TUT}(T_{bb}) + (1 - \varepsilon_{bb}(\lambda))I_{TUT}(T_{\text{amb}}) \quad (5.4)$$

Sementara bila termometer inframerah memiliki emisivitas yang tetap, misalnya $\varepsilon_{TUT}(\lambda) = 0,95$, maka dengan menganggap $T_{\text{amb}} \approx T_d$, Persamaan (5.4) menjadi

$$I_{TUT}(T_{\text{exp}}) = I_{TUT}(T_{bb}) + \frac{(\varepsilon_{bb}(\lambda) - 0,95)}{0,95} [I_{TUT}(T_{bb}) - I_{TUT}(T_{\text{amb}})] \quad (5.5)$$

Setelah nilai $I(T_{\text{exp}})$ diperoleh, perhitungan berikutnya mengubah t_{exp} dengan menggunakan persamaan

$$t_{\text{exp}} = \frac{c_2}{A \cdot \ln\left(\frac{1}{I(T_{\text{exp}})} + 1\right)} - \frac{B}{A} - 273,15^\circ\text{C} \quad (5.6)$$

Bila t_{exp} sudah diperoleh maka persamaan kalibrasi termometer inframerah adalah

$$\text{Koreksi} = t_{\text{exp}} - t_{TUT} \quad (5.7)$$

dengan:

Koreksi = nilai suhu yang harus ditambahkan pada t_{TUT} , $^\circ\text{C}$

t_{TUT} = penunjukan TUT, $^\circ\text{C}$

F. PROSES KALIBRASI TERMOMETER INFRAMERAH

Sebelum proses kalibrasi dilakukan, perlu dipersiapkan langkah-langkah awal, sebagai berikut.

1. Langkah Persiapan Kalibrasi

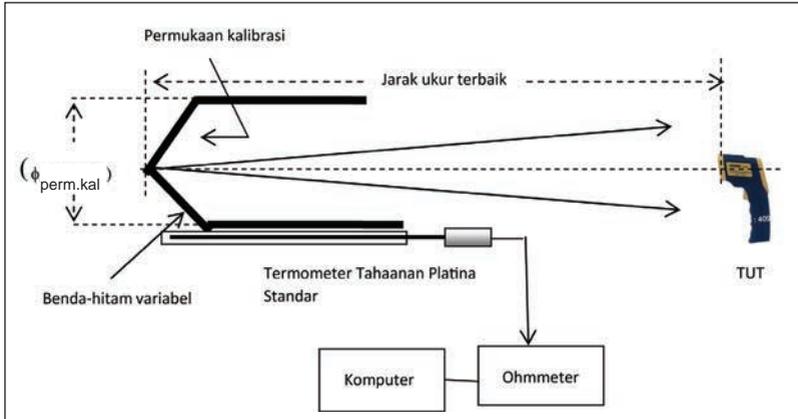
- a. Pemeriksaan kondisi lensa objektif dari TUT karena lensa objektif merupakan gerbang pertama untuk masuknya radiasi panas yang akan diukur. Bila lensa objektif kotor karena debu atau kotoran lainnya maka lensa harus dibersihkan dengan hati-hati agar tidak terjadi goresan pada permukaan lensa tersebut, misalnya dengan cara berikut.
 - 1) Bersihkan debu yang menempel dengan cara diembus dengan udara.
 - 2) Bila debu yang menempel sudah hilang seluruhnya, bersihkanlah permukaan lensa dengan menggunakan *lens cleaner* atau alkohol dan kertas tisu yang lunak.
 - 3) Cara membersihkannya adalah sebagai berikut: kertas tisu dilipat menjadi berbentuk segiempat dengan ukuran sedikit lebih besar daripada diameter lensa objektif, kemudian basahi dengan *lens cleaner* atau alkohol dan selanjutnya tisu basah tersebut diusapkan secara perlahan pada permukaan lensa objektif kearah yang berlawanan dengan putaran jarum jam.
 - 4) Proses membersihkan ini sebaiknya dilakukan di bawah cahaya lampu.
- b. Pemeriksaan kondisi baterai dari TUT. Daya baterai yang sudah lemah dapat menyebabkan penunjukan TUT lebih rendah dari yang seharusnya; karena itu, sebaiknya segera ganti beterei dengan yang baru.
- c. Pemeriksaan kondisi kemampuan ukur dari TUT, apakah masih berfungsi atau tidak, yaitu dengan cara mengarahkan TUT ke sumber radiasi panas, misalnya ke arah lampu meja. Dengan

mengubah-ubah jarak ke lampu dan bila penunjukan TUT ikut berubah-ubah pula maka TUT masih berfungsi.

- d. Bila TUT dilengkapi dengan pengatur emisivitas, perlu diperiksa pula apakah pengatur emisivitas ini masih berfungsi atau tidak, yaitu dengan cara mengarahkan TUT ke lampu meja pada jarak tertentu kemudian emisivitasnya diubah-ubah. Bila penunjukan TUT mengecil pada saat emisivitas TUT dibesarkan dan penunjukan TUT membesar pada saat emisivitas TUT dikecilkan. Hal ini menunjukkan bahwa pengatur emisivitas TUT masih berfungsi dengan baik.
- e. Lakukan pengukuran untuk menentukan SSE dari TUT, yaitu:
 - 1) Tempatkan TUT di depan media kalibrasi pada jarak ukur terjauhnya
 - 2) Nyalakan media kalibrasi pada titik kalibrasi tertingginya, misalkan 500°C , dan lakukan pengukuran, misalkan hasilnya adalah t_1 .
 - 3) Tempatkan TUT di depan media kalibrasi pada jarak ukur terbaiknya dan lakukan pengukuran, misalkan hasilnya adalah t_2 .
 - 4) Turunkan suhu media kalibrasi ke titik kalibrasi terendahnya, misalkan 50°C .

Nilai SSE dari TUT adalah: $\text{SSE} = t_2 - t_1$ dan merupakan salah satu dari komponen ketidakpastian kalibrasi.

Setelah melalui pemeriksaan dan disimpulkan bahwa TUT masih berfungsi dengan baik dan layak untuk dikalibrasi, langkah berikutnya adalah melakukan *set-up* sistem kalibrasi. Sistem kalibrasi tersebut digambarkan secara skematis pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Set-up Kalibrasi Termometer Inframerah

Tempatkan TUT di depan media kalibrasi sedemikian rupa sehingga sesumbu dan mengarah ke bagian tengah permukaan kalibrasi. Berdasarkan diameter permukaan kalibrasi, dapat dihitung jarak ukur terbaik TUT terhadap permukaan kalibrasi, yaitu

$$\text{Jarak ukur terbaik} = (\phi_{\text{perm.kal}} \times (D/S)_{\text{TUT}})/2 \quad (5.8)$$

dengan:

$\phi_{\text{perm.kal}}$ = diameter media kalibrasi, cm

$(D/S)_{\text{TUT}}$ = *distance to spot size ratio* dari TUT.

Bila TUT dilengkapi dengan pengatur emisivitas maka untuk memudahkan pengolahan data hasil kalibrasi, emisivitas TUT dibuat sama dengan 1.

2. Pelaksanaan Kalibrasi

Setelah langkah persiapan kalibrasi selesai dilaksanakan, langkah berikutnya adalah melaksanakan kalibrasi.

- a. Mempersiapkan lembar kerja kalibrasi serta mengisi kolom isian yang ada pada lembar kerja tersebut, yaitu kolom isian untuk identitas TUT, tanggal kalibrasi, kondisi ruang, jarak kalibrasi, dan titik kalibrasi.

- b. Nyalakan media kalibrasi pada suhu kalibrasi terendahnya, misalnya 50°C , kemudian nyalakan indikator termometer standar. Pada indikator tersebut akan tampil *output* dari termometer standar dan dengan memantau tampilan pada indikator ini dapat diketahui apakah media kalibrasi sudah stabil atau belum. Setelah stabil, secara bergantian termometer standar dan TUT mengukur radiasi panas yang dipancarkan media kalibrasi. Setelah data pengukuran termometer standar dan TUT dicatat, kalibrasi dilanjutkan untuk *set-point* berikutnya. Kalibrasi dilakukan sampai dengan titik kalibrasi tertinggi, misalnya 500°C .
- c. Bila kalibrasi telah selesai, suhu media kalibrasi diturunkan dengan mengatur *set-point* pada nilai suhu ruang, misalnya 20°C . Media kalibrasi kemudian dimatikan bila suhu ruang sudah tercapai.

3. Pengolahan Data

Dengan selesainya pelaksanaan kalibrasi maka telah diperoleh data hasil pengukuran termometer standar dan TUT yang dicatat pada lembar kalibrasi. Data tersebut diolah dengan menggunakan *software* pengolah data sehingga dihasilkan nilai koreksi dari TUT dan nilai ketidakpastiannya. Hasil olahan ini dituangkan dalam bentuk sertifikat kalibrasi atau hanya berupa laporan pengukuran saja. *Software* pengolah data dapat berupa *software* yang dikembangkan sendiri atau *software* aplikasi komersial, seperti Microsoft Excel. Sebagai contoh pengolahan data dengan Microsoft Excel diperlihatkan pada Lampiran L.7.

4. Laporan Kalibrasi

Agar koreksi dan ketidakpastian hasil kalibrasi dapat dipergunakan, harus ada kesesuaian antara jarak pada proses kalibrasi dengan jarak pada saat TUT digunakan. Bila tidak sesuai, kemungkinan bisa terjadi kesalahan pengukuran karena faktor SSE. Misalnya pada saat dikalibrasi, media kalibrasi yang digunakan memiliki diameter f_1 mm dan TUT ditempatkan pada jarak ukur terbaik, yaitu d_1 mm di

depan permukaan kalibrasi. Bila pada saat digunakan TUT mengukur suatu benda dengan diameter f_2 maka TUT harus ditempatkan pada jarak d_2 sedemikian rupa sehingga memenuhi hubungan $\phi_1/d_1 = \phi_2/d_2$, atau $d_2 = (\phi_2/\phi_1) \cdot d_1$. Hal ini menjadi salah satu catatan yang harus dilaporkan kepada pelanggan agar terhindar dari kesalahan pengukuran karena faktor SSE.

Laporan kalibrasi untuk pelanggan disampaikan dalam bentuk sertifikat kalibrasi. Sertifikat tersebut berisi informasi mengenai beberapa hal berikut.

- a. Sistem kalibrasi yang telah digunakan, yaitu yang berkaitan dengan termometer standar dan media kalibrasi.
- b. Parameter kalibrasi
 - Jarak kalibrasi,
 - *Setting* emisivitas TUT,
 - Rentang kalibrasi,
 - Tanggal kalibrasi, dan
 - Kondisi lingkungan.
- c. Metode kalibrasi;
- d. Hasil kalibrasi;
- e. Catatan tambahan untuk hasil kalibrasi
 - Jaminan ketertelusuran hasil kalibrasi;
 - Nilai ketidakpastian;
 - Batasan berlakunya nilai koreksi dan ketidakpastian
 - ♦ Syarat jarak yang harus dipenuhi pada saat TUT digunakan untuk mengukur,
 - ♦ Syarat emisivitas dari benda yang diukur atau penyesuaian emisivitas termometer inframerah terhadap emisivitas target ukur, dan
 - ♦ Syarat kondisi lingkungan.

Contoh isi sertifikat kalibrasi.

No. Order :	
Nama Laboratorium Kalibrasi	
Spesifikasi Alat	Spesifikasi Standar dan Media
Nama : Termometer inframerah	Standar : Pt-100
Pabrik : -	Pabrik : Isotech
Tipe : -	Tipe : 935-14-72
No. Seri : -	No. Seri : -
Resolusi : 0,1°C	Media : Greybody ($\phi = 65 \text{ mm}$)
Respons spektral: (8–14) mme = 0,996	
Emisivitas : 0,95	Pabrik : Land
Dist. to spot size: 12: 1	Tipe : P550P
	No. Seri : -
Info Kalibrasi	Kondisi Ruang
Rentang kalibrasi: (50–500)°C	Suhu : (22 ± 1)°C
Jarak kalibrasi: 39 cm	Kelembaban: (45 ± 5)% RH
Setting emisivitas: 0,95	
Tanggal kalibrasi: -	
Metode Kalibrasi	
Termometer inframerah dikalibrasi dengan metode perbandingan terhadap termometer standar dengan menggunakan <i>greybody</i> sebagai sumber radiasi panas.	
Hasil Kalibrasi	
Nilai koreksi alat pada rentang kalibrasi tersebut disampaikan dalam Tabel Koreksi.	

Tabel Koreksi

Penunjukan Alat (°C)	Koreksi (°C)				
	0	10	20	30	40
50,0	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2
100,0	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0
150,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,8
200,0	3,0	3,2	3,3	3,5	3,7
250,0	3,9	4,0	4,2	4,4	4,6
300,0	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5
350,0	5,7	5,9	6,1	6,2	6,4
400,0	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
450,0	7,6	7,8	8,1	8,3	8,5
500,0	8,7				

Catatan

Hasil kalibrasi yang dilaporkan tertelusur ke satuan SI melalui ---.

Ketidaktepastian pengukuran adalah 1,9°C untuk tingkat kepercayaan 95% dengan k = 2.

Nilai koreksi dan ketidaktepastian hanya berlaku bila emisivitas benda yang diukur adalah 0,95 dan jarak ukur = $\varnothing_{\text{target}} \times (390/65)$.

Nilai koreksi dan ketidaktepastian hanya berlaku untuk penggunaan alat pada suhu ruang sampai dengan 40°C

DAFTAR PUSTAKA

- De Witt, D.P. 1985. *Applications of Radiation Thermometry: A Symposium, Issue 895*. Ann Arbor: ASTM.
- De Witt, D.P., and Gene D. Nutter. 1988. *Theory and Practice of Radiation Thermometers*. Singapore: John Wiley.
- Fluke. 1995. “Termômetro Para Segurança Alimentar FoodPro e FoodPro Plus, Termômetro”. Diakses 7 Juli 2014. <http://www.fluke.com/fluke/brpt/-termometros/-food-pro.htm?PID=56223>.
- Fluke. 1995. “Fluke 566 Infrared and Contact Thermometers”. Diakses 7 Juli 20014. <http://en-us.fluke.com/products/thermometers/fluke-566-thermometer.html>
- Hartmann, Jürgen. 2010. “Blackbody and Other Calibration Sources”. Dalam *Radiometric Temperature Measurement (Fundamental)*, ed. M. Zhang, Zhuomin, dkk., 282–283. Amsterdam: Academic Press.
- Preston-Thomas, H. 1990. “The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)”. *Metrologia* 27: 3–10.
- Igor Pušnik, Goran Grgic, and Janko Drnovšek. 2006. “System for the Determination of the Size-of-Source Effect of Radiation Thermometers with the Direct Reading of Temperature”. *Measurement Science and Technology* 17: 1330–1336.
- International Organisation for Standardization. 1993. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.
- MSL Technical Guide 22. 2009. “Calibration of Low-Temperature Infrared Thermometers”.
- Nicholas, J.V. and D.R. White. 2005. *Traceable Temperature*, 2nd Ed. Singapore: John Wiley.

- Raytek. "Emissivity Table for Non-Metals". www.infraredsaunder.com/raytek/cvsc.html
- Saunders, P. 2009. "Calibration and Use of Low-Temperature Direct-Reading Radiation Thermometers". *Measurement Science and Technology* 20: 025104.
- Saunders, P., and Hamish Edgar. 2009. "On the Characterization and Correction of the Size-of-Source Effect in Radiation Thermometers". *Metrologia* 46: 62–74.
- Wiradinata, H. 2009. "Sistem Kalibrasi Termometer Inframerah untuk Rentang 50°C–500°C". *Instrumentasi Volume 33 Nomor 1 Januari–Juni 2009*, 19–25.
- Yunus A., Cengel. 2002. *Heat Transfer-A Practical Approach, International Edition*. Singapore: McGraw-Hill.
- Mastech. "MS6550B Non-Contact Infrared Thermometer". http://www.p-mastech.com/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=92&category_id=5&option=com_virtuemart&Itemid=29

LAMPIRAN 1. CONTOH PENGOLAHAN DATA KALIBRASI TERMOMETER INFRAMERAH

1. Spesifikasi Termometer inframerah yang Dikalibrasi

Misalkan termometer inframerah yang dikalibrasi memiliki spesifikasi teknis seperti berikut

- Rentang ukur: 50°C – 500°C
- Resolusi: $0,1^{\circ}\text{C}$
- Respons spektral: (8–14) mm
- Emisivitas: 0,95
- *Distance of spot size*: 12 : 1

2. Media Kalibrasi yang Digunakan

Media kalibrasi berupa benda-hitam variabel dengan

- Emisivitas = 0,996
- Diameter *aperture* = 65 mm
- Homogenitas = $0,5^{\circ}\text{C}$
- Stabilitas = $0,1^{\circ}\text{C}$
- Gradien = $0,8^{\circ}\text{C}$

3. Termometer Standar yang Digunakan

Termometer standar berupa termometer tahanan platina dengan ketidakpastian baku seperti tercantum pada Tabel L.1.

Indikator termometer standar berupa ohmmeter. Ketidakpastian indikator dengan tingkat kepercayaan 95% dan faktor cakupan $k = 2$ diperlihatkan pada Tabel L.2.

Tabel L.1. Ketidakpastian Baku Termometer Standar

$t_{PRT}, ^\circ\text{C}$	$u, ^\circ\text{C}$
50	0,07
100	0,09
150	0,08
200	0,05
250	0,04
300	0,09
350	0,14
400	0,19
450	0,22
500	0,23

4. Kondisi Ruangan

Kondisi ruangan:

- Suhu ruang 22°C dengan fluktuasi sekitar $\pm 1,5^\circ\text{C}$
- Kelembapan 45% RH dengan fluktuasi sekitar $\pm 5\%$ RH.

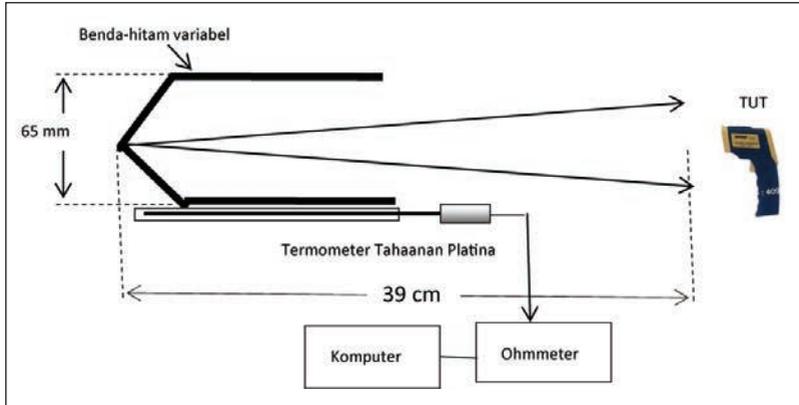
Tabel L.2 Ketidakpastian Ohmmeter

Set-point, $^\circ\text{C}$	$U_{\text{ohmmeter}}, ^\circ\text{C}$
50	0
100	0,01
150	0,01
200	0,01
250	0,01
300	0,01
350	0,01
400	0,01
450	0,01
500	0,01

5. **Set-up Kalibrasi** (Wiriadinata, H. 2009, 23)

$$\begin{aligned} \text{Jarak ukur terbaik} &= \phi_{\text{media}} \times (D/S)_{\text{TUT}} : 2 \\ &= 65 \text{ mm} \times 12 : 2 \\ &= 390 \text{ mm} = 39 \text{ cm} \end{aligned}$$

→ Jarak kalibrasi = 39 cm



Gambar L.1 Set-up Kalibrasi

6. **Data Hasil Kalibrasi**

Tabel L.3 berisi data hasil kalibrasi untuk *set-point* 50°C, yaitu penunjukan termometer standar yang telah dikoreksi dengan data kalibrasi ohmmeter, serta penunjukan TUT.

Tabel L.3. Data Hasil Kalibrasi untuk *Set-point* 50°C

	R_{std}, Ω	$R_{\text{std_koreksi}}, \Omega$	$t_{\text{TUT}}, ^\circ\text{C}$
	119,5924	119,5934	51,2
	119,5925	119,5935	51,2
	119,5926	119,5936	51,2
	119,5926	119,5936	51,2
	119,5926	119,5936	51,2
Nilai rata-rata	119,5925	119,5935	51,2
Standar deviasi	$8,9443 \cdot 10^{-5}$	$8,9443 \cdot 10^{-5}$	0,0

Sementara data rata-rata hasil kalibrasi untuk seluruh *set-point* diperlihatkan pada Tabel L.4.

Tabel L.4. Data Hasil Kalibrasi untuk Seluruh *Set-Point*, Standar dalam Ohm

Set-point, °C	R_{std} , ohm		t_{TUT} , °C	
	(Rata-rata) _{koreksi}	Std. Dev.	Rata-rata	Std. Dev.
50	119,5935	$8,9443 \cdot 10^{-5}$	51,2	0,0
100	138,7164	0,000192354	102,2	0,0
150	157,5410	0,000320936	152,4	0,0
200	176,1027	$4,47214 \cdot 10^{-5}$	203,4	0,0
250	194,3557	0,000230217	254,4	0,0
300	212,3074	0,000122474	305,4	0,0
350	230,0245	0,000559464	356,4	0,0
400	247,4921	0,000114018	405,6	0,0
450	264,6572	0,000238747	457,6	0,0
500	281,5705	0,000207364	508,8	0,0

Tabel L.5. Data Hasil Kalibrasi untuk Seluruh *Set-point*, Standar dalam °C

Set-point, °C	t_{bb} , °C		t_{TUT} , °C	
	Rata-rata	Std. Dev.	Rata-rata	Std. Dev.
50	50,5	0,0002	51,2	0,0
100	100,5	0,0005	102,2	0,0
150	150,5	0,0009	152,4	0,0
200	200,6	0,0001	203,4	0,0
250	250,6	0,0006	254,4	0,0
300	300,6	0,0003	305,4	0,0
350	350,7	0,0002	356,4	0,0
400	400,9	0,0003	405,6	0,0
450	451,1	0,0007	457,6	0,0
500	501,3	0,0006	508,8	0,0

Dengan menggunakan cara iterasi, nilai ohm termometer standar pada Tabel L.4 diubah menjadi besaran suhu dalam derajat Celsius, seperti yang diperlihatkan pada Tabel L.5.

7. Pengolahan Data

Nilai koreksi suhu untuk t_{TUT} dapat diperoleh dengan mengolah data pada Tabel L.5 menggunakan Persamaan (3.9), Persamaan (5.8), Persamaan (5.9) dan Persamaan (5.10). Namun, sebelum menggunakan persamaan-persamaan tersebut, nilai konstanta A dan B dari TUT harus diketahui dahulu.

7.1 Penentuan konstanta A dan B dari TUT

Konstanta A dan B dihitung berdasarkan respons spektral yang dimiliki oleh TUT. Pada contoh ini, respons spektral TUT adalah (8–14) mm sehingga konstanta A dan B dapat diperoleh dengan perhitungan berikut

$$\lambda_1 = 8 \mu\text{m}, \lambda_2 = 14 \mu\text{m}$$

$$\rightarrow \lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2) / 2 = 11 \mu\text{m}, \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 6 \mu\text{m}$$

$$\sigma = \frac{\Delta\lambda}{\sqrt{12}} = 1,73205 \mu\text{m}; A = \lambda_0 \left(1 - 6 \frac{\sigma^2}{\lambda_0^2} \right) = 9,363636 \mu\text{m}$$

$$B = \frac{c_2}{2} \frac{\sigma^2}{\lambda_0^2} = 178,3636 \mu\text{m.K}^{-1}$$

$$c_2 = 14.388 \mu\text{m.K}$$

7.2 Penentuan nilai koreksi kalibrasi dari TUT

Berdasarkan Persamaan (5.7), nilai koreksi t_{TUT} adalah

$$\text{Koreksi} = t_{\text{exp}} - t_{TUT}$$

Nilai t_{TUT} diperoleh dari pengukuran, sedangkan t_{exp} dapat diperoleh dengan mengolah nilai t_{amb} dan t_{bb} yang masing-masing

diperoleh dari pengukuran. Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung t_{exp} adalah

$$a. I(T_{bb}) = \frac{1}{\exp\left(\frac{1}{AT_{bb}+B}\right) - 1}$$

$$b. I(T_{amb}) = \frac{1}{\exp\left(\frac{1}{AT_{amb}+B}\right) - 1}$$

$$c. I(T_{exp}) = I(T_{bb}) + \frac{(\epsilon_{bb}(\lambda) - 0,95)}{0,95} [I(T_{bb}) - I(T_{amb})]$$

$$d. t_{exp} = \frac{c_2}{A \cdot \ln\left(\frac{1}{I(T_{exp})+1} + 1\right)} - \frac{B}{A} - 273,15, ^\circ\text{C}$$

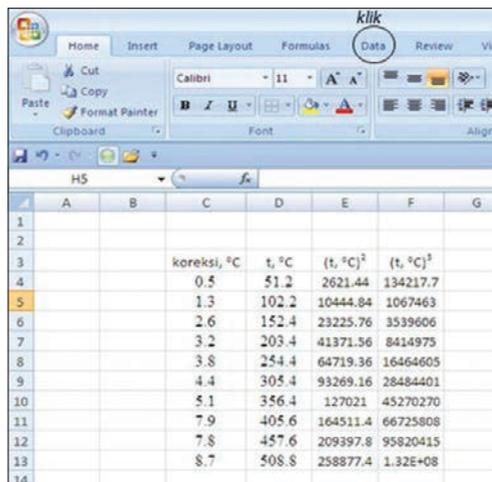
Nilai koreksi t_{TUT} diperoleh dengan mengolah data $t_{amb} = 22^\circ\text{C}$, $\epsilon_{bb} = 0,996$, $\epsilon_{TUT} = 0,95$ dan data pada Tabel L.5 dengan menggunakan persamaan-persamaan tersebut di atas. Hasil pengolahan data tersebut diperlihatkan pada Tabel L.6.

Tabel L.6 Nilai Koreksi untuk t_{TUT}

$t_{bb}, ^\circ\text{C}$	$I(T_{bb})$ ¹⁾	$I(T_{exp})$ ²⁾	$t_{exp}, ^\circ\text{C}$ ³⁾	$t_{TUT}, ^\circ\text{C}$	Koreksi, $^\circ\text{C}$ ⁴⁾
50,5	0,0114162	0,011602208	51,7	51,2	0,5
100,5	0,020389975	0,021010503	103,5	102,2	1,3
150,5	0,032085692	0,033272539	155,0	152,4	2,6
200,6	0,046283392	0,048157706	206,6	203,4	3,2
250,6	0,062654973	0,065322016	258,2	254,4	3,8
300,6	0,080908636	0,08445954	309,8	305,4	4,4
350,7	0,10085197	0,105368551	361,5	356,4	5,1
400,9	0,122249388	0,127802055	413,5	405,6	7,9
451,1	0,14484125	0,151487839	465,4	457,6	7,8
501,3	0,168531656	0,176325359	517,5	508,8	8,7

7.3 Penentuan persamaan koreksi

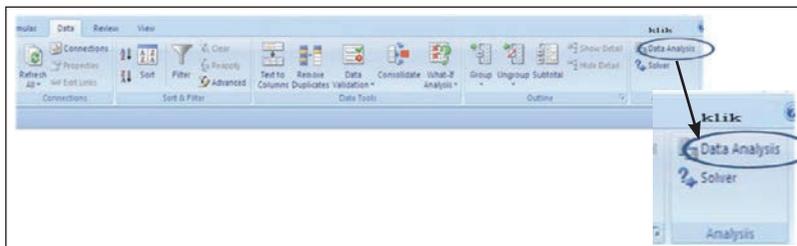
Angka t_{TUT} pada Tabel L.6. berbentuk pecahan, tetapi untuk laporan ke pelanggan sebaiknya angka tersebut dituliskan dalam bentuk angka bulat, misalnya 50°C . Meski demikian, untuk mengetahui nilai koreksi dari 50°C perlu diturunkan suatu fungsi yang mempunyai korelasi koreksi dengan t_{TUT} . Salah satu cara di antaranya fungsi regresi. Berikut ini adalah langkah-langkah untuk menentukan fungsi koreksi dengan cara regresi. Tuliskan nilai *koreksi*, t_{TUT} , $(t_{TUT})^2$ dan $(t_{TUT})^3$ seperti terlihat pada Gambar L.2.



	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3			koreksi, °C	t, °C	$(t, ^{\circ}\text{C})^2$	$(t, ^{\circ}\text{C})^3$	
4			0.5	51.2	2621.44	134217.7	
5			1.3	102.2	10444.84	1067463	
6			2.6	152.4	23225.76	3539606	
7			3.2	203.4	41371.56	8414975	
8			3.8	254.4	64719.36	16464605	
9			4.4	305.4	93269.16	28484401	
10			5.1	356.4	127021	45270270	
11			7.9	405.6	164511.4	66725808	
12			7.8	457.6	209397.8	95820415	
13			8.7	508.8	258877.4	1.32E+08	
14							

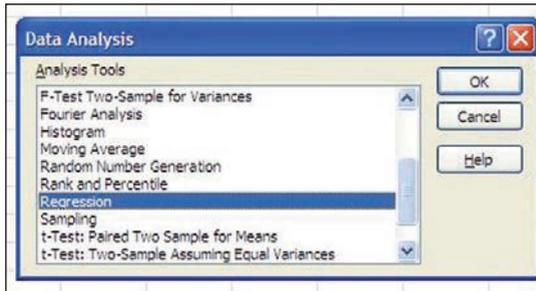
Gambar L.2 Penulisan Data pada Microsoft Excel

Selanjutnya klik tab **Data** dan akan tampil *toolbar Data Analysis* pada Gambar L.3.



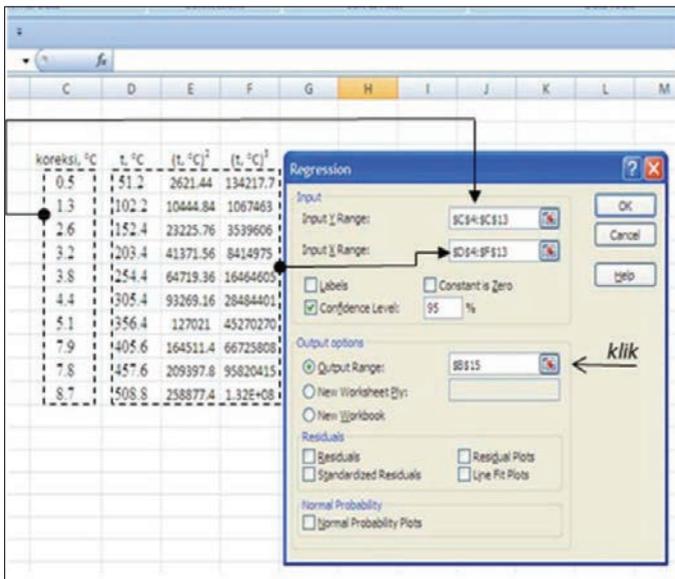
Gambar L.3 Menu *Data Analysis*

Kemudian klik *toolbar* **Data Analysis** sehingga muncul **Windows Data Analysis** pada Gambar L.4 dan sorotlah **Regression** kemudian klik **OK**. Akan muncul **Windows Regression**.



Gambar L.4 *Windows Data Analysis*

Pada Gambar L.5, **Input Y Range** diisi dengan data *koreksi* dan **Input X Range** diisi data t , t^2 dan t^3 . Centang **Confidence Level** 95%.



Gambar L.5 Memasukkan Data untuk Diolah

Kemudian tentukan lokasi untuk menampilkan hasil regresi dengan cara mengklik **Output Range**. Setelah tombol **OK** diklik, akan diperoleh hasil regresi seperti yang diperlihatkan pada Gambar L.6.

SUMMARY OUTPUT					
Regression Statistics					
Multiple R		0.984354064			
R Square		0.968952923			
Adjusted R Square		0.953429385			
Standard Error		0.612416412			
Observations		10			
ANOVA					
		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>
Regression		3	70.23068	23.41023	62.4
Residual		6	2.250323	0.375054	
Total		9	72.481		
Coefficients					
		<i>Standard Err</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	
Intercept		-0.135365454	1.194814	-0.11329	0.9134
X Variable 1		0.01425054	0.017565	0.811326	0.448
X Variable 2		6.2616E-06	7.11E-05	0.088081	0.932
X Variable 3		1.39833E-09	8.37E-08	0.016707	0.987

Gambar L.6 Data Hasil Regresi

Dari hasil regresi ini bisa diperoleh persamaan koreksi.

$$\text{Koreksi} = a + b \cdot t_{\text{TUT}} + c \cdot t_{\text{TUT}}^2 + d \cdot t_{\text{TUT}}^3$$

dengan:

$$a = -0,135365454^{\circ}\text{C}$$

$$b = 0,01425054$$

$$c = 6,2616\text{E-}06 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$d = 1,39833\text{E-}09 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$$

Dengan menggunakan persamaan koreksi tersebut, bisa dibuat tabel koreksi TUT seperti ditunjukkan pada Tabel L.7.

Tabel L.7 Nilai Koreksi TUT untuk Rentang Suhu 50°C–500°C

Penunjukan Alat (°C)	Koreksi (°C)				
	0	10	20	30	40
50,0	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2
100,0	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0
150,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,8
200,0	3,0	3,2	3,3	3,5	3,7
250,0	3,9	4,0	4,2	4,4	4,6
300,0	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5
350,0	5,7	5,9	6,1	6,2	6,4
400,0	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
450,0	7,6	7,8	8,1	8,3	8,5
500,0	8,7				

Ketidakpastian baku pada regresi ini dinyatakan dengan SEE yang besarnya 0,612416412°C atau $u_{\text{reg}} = 0,61^\circ\text{C}$.

8. Perhitungan Ketidakpastian

Berdasarkan Persamaan (5.8), Koreksi = $t_{\text{exp}} - t_{\text{TUT}}$, maka ketidakpastian baku dari nilai koreksi adalah

$$\begin{aligned}
 u_{\text{koreksi}}^2 &= \left(\frac{\partial \text{koreksi}}{\partial t_{\text{exp}}} \right)^2 \cdot u_{t_{\text{exp}}}^2 + \left(\frac{\partial \text{koreksi}}{\partial t_{\text{TUT}}} \right)^2 \cdot u_{\text{TUT}}^2 \\
 &= u_{t_{\text{exp}}}^2 + u_{\text{TUT}}^2
 \end{aligned}$$

Sedangkan ketidakpastian baku total adalah

$$\begin{aligned}
 u_c^2 &= u_{t_{\text{exp}}}^2 + u_{\text{TUT}}^2 + u_{\text{media_kalibrasi}}^2 + u_{\text{ohmeter}}^2 \\
 u_{\text{TUT}}^2 &= u_{\text{resolusiTUT}}^2 + u_{\text{pengukuranberulang}}^2 + u_{\text{regresi}}^2 \\
 u_{\text{media_kalibrasi}}^2 &= u_{\text{homogenitas}}^2 + u_{\text{stabilitas}}^2 + u_{\text{gradien}}^2
 \end{aligned}$$

8.1. Perhitungan ketidakpastian baku dari t_{exp}

Bila $\varepsilon_{TUT}(\lambda) = 0,95$ serta dianggap $t_{amb} \approx t_d$, maka

$$I(T_{exp}) = I(T_{bb}) + \frac{(\varepsilon_{bb}(\lambda) - 0,95)}{0,95} [I(T_{bb}) - I(T_{amb})] (*)$$

sehingga t_{exp} hanya merupakan fungsi dari t_{bb} dan t_{amb} dan

$$u_{t_{exp}}^2 = \left(\frac{\partial t_{exp}}{\partial t_{bb}} \cdot u_{t_{bb}} \right)^2 + \left(\frac{\partial t_{exp}}{\partial t_{amb}} \cdot u_{t_{amb}} \right)^2$$

Koefisien sensitivitas untuk $\varepsilon_{TUT}(\lambda) = 0,95$ diperoleh dengan menurunkan secara parsial Persamaan (*), dan diperoleh

$$\frac{\partial t_{exp}}{\partial t_{bb}} = \frac{\varepsilon_{bb}}{0,95} \cdot \left[\frac{\ln \left\{ \frac{I(T_{bb})+1}{I(T_{bb})} \right\}}{\ln \left\{ \frac{I(T_{exp})+1}{I(T_{exp})} \right\}} \right]^2 \cdot \frac{I(T_{bb})}{I(T_{exp})} \cdot \frac{I(T_{bb})+1}{I(T_{exp})+1}$$

$$\frac{\partial t_{exp}}{\partial t_{amb}} = \frac{0,95 - \varepsilon_{bb}}{0,95} \cdot \left[\frac{\ln \left\{ \frac{I(T_{amb})+1}{I(T_{amb})} \right\}}{\ln \left\{ \frac{I(T_{exp})+1}{I(T_{exp})} \right\}} \right]^2 \cdot \frac{I(T_{amb})}{I(T_{exp})} \cdot \frac{I(T_{amb})+1}{I(T_{exp})+1}$$

Karena t_{amb} di lokasi pelanggan (*customer*) berbeda-beda dan perlu diukur maka untuk keperluan perhitungan dimisalkan $t_{amb} = 40^\circ\text{C}$ sehingga $I(T_{amb}) = 0,009895776$ A. Bila t_{amb} berfluktuasi sebesar $\pm 2^\circ\text{C}$ dan dianggap memiliki distribusi segiempat maka ketidakpastian bakunya, $u_{T_{amb}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,2^\circ\text{C}$.

Dengan menggunakan data pada Tabel L.5, Tabel L.1. dan nilai $u_{T_{amb}} = 1,2^\circ\text{C}$ diperoleh ketidakpastian $u_{T_{exp}}$ seperti yang diperlihatkan pada Tabel L.8.

Tabel L.8 Ketidakpastian $u_{t_{\text{exp}}}$

$t_{\text{exp}}, ^\circ\text{C}$	$I(T_{\text{exp}})$	$I(T_{\text{bb}})$	$\partial T_{\text{exp}}/\partial T_{\text{bb}}$	$\partial T_{\text{exp}}/\partial T_{\text{amb}}$	$u_{T_{\text{exp}}}, ^\circ\text{C}$
50,5	0,011602208	0,01141462	1,039	-0,044	0,09
100,5	0,021010503	0,020389975	1,032	-0,032	0,10
150,5	0,033272539	0,032085692	1,031	-0,026	0,09
200,6	0,048157706	0,046283392	1,031	-0,022	0,06
250,6	0,065322016	0,062654973	1,031	-0,019	0,05
300,6	0,08445954	0,080908636	1,032	-0,017	0,09
350,7	0,105368551	0,10085197	1,033	-0,016	0,15
400,9	0,127802055	0,122249388	1,034	-0,015	0,20
451,1	0,151487839	0,14484125	1,035	-0,014	0,23
501,3	0,176325359	0,168531656	1,036	-0,014	0,24

L.8.2. Ketidakpastian kalibrasi

Tabel L.9 Ketidakpastian Kalibrasi untuk *Set-point* 50°C

Komponen	Distr.	U, °C	k	u, °C
t_{exp}	Normal	0,09	1	0,09
Ohmmeter	Normal	0,005	2	0,0025
Homogenitas media	Segi-4	0,5	1,732	0,29
Stabilitas media	Segi-4	0,1	1,732	0,06
Gradien suhu	Segi-4	0,8	1,732	0,46
Ukur ulang	Normal	0,0	1	0
Resolusi TUT	Segi-4	0,05	1,732	0,03
Regresi	Normal	0,61	1	0,61
SSE	Segi-4	2	1,732	1,15
Ketidakpastian Gabungan			$u_c =$	1,4
Ketidakpastian Diperluas	(C.L.= 95%, k = 2)		U =	2,8

Dengan demikian, nilai ketidakpastian kalibrasi untuk seluruh *set-point* pada tingkat kepercayaan 95% dan faktor cakupan $k = 2$ ditunjukkan pada Tabel L.10.

Tabel L.10 Ketidakpastian Kalibrasi untuk Rentang Suhu 50°C–500°C

Set-point, °C	u_c , °C	U, °C
50	1,4	2,8
100	1,4	2,9
150	1,4	2,8
200	1,4	2,8
250	1,4	2,8
300	1,4	2,9
350	1,4	2,9
400	1,5	3,0
450	1,5	3,0
500	1,5	3,0

Tambahan:

Untuk $\varepsilon_{TUT}(\lambda) = 1,0$ penurunan dilakukan pada Persamaan (5.7).

$$\frac{\partial t_{\text{exp}}}{\partial t_{\text{bb}}} = \varepsilon_{\text{bb}} \cdot \left[\frac{\ln \left\{ \frac{S(T_{\text{bb}})+1}{S(T_{\text{bb}})} \right\}}{\ln \left\{ \frac{S(T_{\text{exp}})+1}{S(T_{\text{exp}})} \right\}} \right]^2 \cdot \frac{S(T_{\text{bb}})}{S(T_{\text{exp}})} \cdot \frac{S(T_{\text{bb}})+1}{S(T_{\text{exp}})+1}$$

$$\frac{\partial t_{\text{exp}}}{\partial t_{\text{bb}}} = (1 - \varepsilon_{\text{bb}}) \cdot \left[\frac{\ln \left\{ \frac{S(T_{\text{amb}})+1}{S(T_{\text{amb}})} \right\}}{\ln \left\{ \frac{S(T_{\text{exp}})+1}{S(T_{\text{exp}})} \right\}} \right]^2 \cdot \frac{S(T_{\text{amb}})}{S(T_{\text{exp}})} \cdot \frac{S(T_{\text{amb}})+1}{S(T_{\text{exp}})+1}$$

LAMPIRAN 2.
DAFTAR LABORATORIUM KALIBRASI
YANG TELAH DIAKREDITASI OLEH
KOMITE AKREDITASI NASIONAL (KAN)

LK 001 IDN Balai Besar Logam dan Mesin

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volumetrik, Gaya, Tekanan, Kekerasan, Torsi, Panjang, Kelistrikan, Waktu & Frekuensi, Instrumen Analitik. Detail ruang lingkup (pdf file)

Alamat : Jl. Sangkuriang No.12, Bandung 40135

Telepon : (022) 2503171, 2511927

Fax : (022), 2511927

Personal Penghubung : Fachrurozy

Tanggal berakhir

akreditasi : 2009-01-27 00:00:00.0

E-mail : rozi@bblm.go.id

LK 003 IDN Laboratorium Kalibrasi Divisi Mesin Industri dan Jasa PT PINDAD

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan , Gaya, Kekerasan, Dimensi, Kelistrikan. Detail ruang lingkup (pdf file)

Alamat : Jl. Gatot Subroto No. 517, Bandung

Telepon : (022)7320363
Fax : (022)7320363
Personal Penghubung : Jusmani Alexander
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-07-21 00:00:00.0
E-mail : jusmani@pindad.com

**LK 004 IDN Laboratorium Metrologi Div QA -PT Panasonic
Manufacturing Indonesia**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Dimensi, Kelistrikan, Waktu & Frekuensi. Detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Raya Bogor Km 29, Gandaria, Jakarta 13710
Telepon : (021)8717842/8710229/8710221
ext 2723;
Fax : (021)8717847 ext.2721
Personal Penghubung : Firdaus
tanggal berakhir
akreditasi : 2009-01-27 00:00:00.0
E-mail : calibration@nabel.panasonic.co.id;
ml_pmi_qa_calibration@id.panasonic.com

**LK 005 IDN Balai Pengujian dan Sertifikasi Mutu
Barang(BPSMB) Propinsi Kalimantan Selatan**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volume, Gaya, Tekanan, Dimensi, Waktu & Frekuensi, Instrumen Analitik. Detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Panglima Batur Banjar Baru ,Kalimantan Selatan, Banjarbaru 70711
Telepon : (0511)772237

Fax : (0511)772237
Personal Penghubung : M.Nurliansyah
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-04-07 00:00:00.0

LK 006 IDN Laboratorium Kalibrasi UPT Balai Pengembangan Instrumentasi LIPI

Ruang Lingkup : Suhu, Tekanan, Dimensi, Kelistrikan, Waktu & Frekuensi. Detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Sangkuriang Komp LIPI Gedung 30, Bandung 40135
Telepon : (022)2503053
Fax : (022)2504577
Personal Penghubung : Demi Sutraprawata, Dwi Esti Kusumandari
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-05-26 00:00:00.0
E-mail : esti_dek@yahoo.com

LK 008 IDN Balai Kalibrasi Dit. PPMB - Depperindag

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya, Kekerasan, Dimensi, Instrumen Analitik. Detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Raya Bogor KM km 26, Ciracas, Jakarta 13740
Telepon : (021)8710321/8702781
Fax : (021)8710478
Personal Penghubung : Sofyan
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-04-07 00:00:00.0
E-mail : dirppmb-daglu@dprin.go.id

LK 009 IDN Laboratorium Kalibrasi Mutu Certification PT Mutu Agung Lestari

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya, Dimensi,
Instrumen Analitik. Detail ruang lingkup
(pdf file)
Alamat : Jl. Raya Bogor Km 33.5 Cimanggis, Bogor
16953
Telepon : (021)8740202
Fax : (021)87740746
Personal Penghubung : Budi Tjahyono
Tanggal berakhir
akreditasi : 2008-12-24 00:00:00.0
E-mail : budi@mutucertification.com

LK 010 IDN

LK 011 IDN Laboratorium Kalibrasi PT Mektan Babakan Tujuh (MBT) Kalibrasi

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya, Dimensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Raya Cimareme No. 340 A, Padalarang
Telepon : (022)6866397, 6866397
Fax : (022)6865413
Personal Penghubung : P. Sugianto Kuntadi
E-mail : Mbt-kal@indo.net.id

LK 014 IDN Laboratorium Kalibrasi Balai Pengujian & Sertifikasi Mutu barang Provinsi Sulawesi Selatan

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Andi Pangerang Pettarani, Ujung

Pandang 90222
Telepon : (0411)441239
Fax : (0411)457368
Personal Penghubung : Syahrial Syamsu
Tanggal berakhir
akreditasi : 2006-05-22 00:00:00.0
E-mail : dwijoko@msc.telkom.co.id

**LK 019 IDN Laboratrium Kalibrasi - Balai Termodinamika,
Motor & Propulsi (BTMP)-BPP-Teknologi**

Ruang Lingkup : Aliran & Suhu
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Komplek Puspiptek Serpong-
Tangerang, Tangerang
Telepon : (021)7560539 ext 1202.
Fax : (021)7560539/7560538
Personal Penghubung : Joko Purwono, Achmad Fachrudin, Uttari
Yani
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-02-20 00:00:00.0
E-mail : btmp@cbn.net.id; uttariyani@yahoo.com

**LK 020 IDN Laboratorium Kalibrasi M/L/I - Biro Inspeksi & K3
PT Petrokimia Gresik**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Jend Akmad Yani PO Box 102, Gresik
Telepon : (031)3981811-14 ext 2426
Fax : (031)3981722, 3982272
Personal Penghubung : Salmeiningsih
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-02-20 00:00:00.0
E-mail : salmei@petrokimia-gresik.com

**LK 021 IDN Laboratorium Kalibrasi-Balai Riset dan
Standarisasi Industri dan Perdagangan Medan**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Kekerasan, Dimensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Sisingamangaraja No. 24, Medan
Telepon : (061)7363471
Fax : (061)7362830
Personal Penghubung : Hotman Simamora
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-02-20 00:00:00.0

**LK 022 IDN Laboratorium Kalibrasi - Balai Besar Penelitian dan
Pengembangan Barang Teknik - Bandung**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volumetrik, Tekanan, Gaya,
Kekerasan, Dimensi, Kelistrikan, Instru
men Analitik
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Sangkuriang No.14, Bandung
Telepon : (022)2502027
Fax : (022)2502027
Personal Penghubung : Budi Susanto
Tanggal berakhir
akreditasi : 2008-02-26 00:00:00.0
E-mail : wardoyo@bdg.centrin

**LK 023 IDN Laboratorium Kalibrasi SBU Lab PT Sucofindo -
Jakarta**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volumetrik, Tekanan, Gaya,
Dimensi, Kelistrikan
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Arteri Tol Cibitung No.1, Bekasi 17521
Telepon : (012)88321176

Fax : (021)88330733
Personal Penghubung : Kusmutarto Basuki, Ade Hidayat
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-08-28 00:00:00.0
E-mail : gangsar_3@telkom.net
Telepon : (021)77800777, 7803300
Fax : (021)7891485
Personal Penghubung : Agus Prasetyo
Tanggal berakhir
akreditasi : 2008-12-24 00:00:00.0

**LK 030 IDN Laboratorium Kalibrasi Balai Pengujian Sertifikasi
Mutu Barang dan Lembaga Tembakau**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volumetrik, Tekanan,
Dimensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Gayung Kebonsari Dalam No. 12 A,
Surabaya 60235
Telepon : (031)8280762, 8280753
Fax : (031)8294291
Personal Penghubung : Gangsar Sulistiyo
Tanggal berakhir
akreditasi : 2008-12-23 00:00:00.0
E-mail : bpsmbaby@sby.rad.net.id; gangsar_3@
telkom.net

**LK 031 IDN Laboratorium Kalibrasi PT Multi Instrumentasi
Semarang**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volumetrik, Gaya, Tekanan,
Dimensi, Kelistrikan, Instrumen Analitik
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Ruko Sronдол Duta Asri blok AJL.
Perintis Kemerdekaan No. 178 - Banyu
manik, Semarang Telepon : (024)7470087

Fax : (024)7475565
Personal Penghubung : Indah Sarwestri
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-03-03 00:00:00.0

LK 032 IDN Laboratorium Kalibrasi PT Kalibrasi Instrumentasi Mandiri

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volumetrik, Densitas, Gaya, Tekanan, Dimensi, Kelistrikan, Waktu & Frekuensi, Instrumen Analitik
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Komplek Green garden Blok AA1-16,
Jl. MH. Thamrin Km. 7Kebon Nanas -
Tangerang, Tangerang 15143
Telepon : (021)55743534
Fax : (021)55755584
Personal Penghubung : Akhmad Sulaeman
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-02-27 00:00:00.0
E-mail : sulaeman@yahoo.com

LK 033 IDN Lab Kalibrasi PT Indonesia EPSON Industry

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya, Torsi, Dimensi, Kelistrikan, Waktu & Frekuensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : EJIP Industrial Park Plot 4 E Lemahabang,
Bekasi 17550
Telepon : (021)8970101
Fax : (021)8970958
Personal Penghubung : Yan Hariadi, Sudrajat
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-07-21 00:00:00.0

**LK 034 IDN Yokogawa Indonesia Standard Lab Center
PT Yokogawa Indonesia**

Ruang Lingkup : Suhu, Tekanan, Kelistrikan, Waktu & Frekuensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Wisma Aldiron Dirgantara Lt. II No. 202-209, Jl. Jend. Gatot Subroto Kav. 72, Jakarta 12780
Telepon : (021)7990102
Fax : (021)7990070
Personal Penghubung : Muchtar Putra Baygas, Peina Adityani
Tanggal berakhir akreditasi : 2009-05-26 00:00:00.0
E-mail : peina.aditiani@id.yokogawa.com

LK 035 IDN Laboratorium Kalibrasi Pusdiklat MIGAS

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volume, Tekanan
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Sorogo No. 1, Cepu
Telepon : (0296)421888
Fax : (0296)421891
Personal Penghubung : Reinhardt Alex George
Tanggal berakhir akreditasi : 2010-01-26 00:00:00.0
E-mail : pptmigas@indo.net.id

LK 036 IDN Laboratorium Kalibrasi Balai Besar Industri Agro

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volume, Instrumen Analitik
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Ir. H. Juanda No. 11, Bogor 16122
Telepon : (0251)324068
Fax : 0251-323339
Personal Penghubung : E Tarmidji, Nasyirudin

Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-07-21 00:00:00.0

LK 039 IDN Laboratorium Kalibrasi PT. Pulau Sambu (Kuala Enok)

Ruang Lingkup : Suhu, Volume ,Tekanan, Kelistrikan,
Waktu & Frekuensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Kec. Tanah Merah Kab. Indragiri Hilir,
Riau 29271
Telepon : (0742)-21609/ 0768-21609
Fax : (0742)-21606/ 0768-22445
Personal Penghubung : H. Ahmadi
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-09-11 00:00:00.0
E-mail : pskpusat@sambu.co.id; psk-itd-2@sambu.
co.id

LK 040 IDN Laboratorium Kalibrasi Balai Besar Kimia dan Kemasan

Ruang Lingkup : Suhu, Tekanan, Dimensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Pekayon, Pasar Rebo, Jakarta
Telepon : (021)8720449/8717438/87704217
Fax : (021)8714928
Personal Penghubung : Maruahal Situmorang, Sri Wahyu
Kustyawati
E-mail : bbkk@cbn.net.id

LK 042 IDN Laboratorium Kalibrasi Metrologi Unit Jaminan Mutu - PT. Dirgantara Indonesia (IAe)

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Gaya, Tekanan, Torsi,
Dimensi, Kelistrikan,Waktu & Frekuensi

detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Pajajaran No.154, Bandung 40174
Telepon : (022)6031931, 6054212
Fax : (022)6014214
Personal Penghubung : Ediyanto
E-mail : ediyanto@indonesian-aerospace.com

LK 043 IDN Laboratorium Kalibrasi PT. PAL Indonesia

Ruang Lingkup : Suhu, Tekanan, Dimensi, Kelistrikan,
Waktu & Frekuensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Ujung Surabaya, PO BOX 1134, Surabaya
Telepon : (031)3292275 ext.3008,3082
Fax : (031)3297831, 3292426
Personal Penghubung : Sujitno
Tanggal berakhir
akreditasi : 2006-01-27 00:00:00.0
E-mail : lab_pal@pal.co.id

LK 044 IDN Laboratorium Kalibrasi PT. Eldepe Kalibrasi Instrumenindo

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volume, Tekanan, Instrumen
Analitik
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Komp.Gading Bukit Indah Blok Q/15,
Jl. Bulevar Artha Gading, Kelapa Gading
Permai, Jakarta
Telepon : (021)45853024
Fax : (021)45852884
Personal Penghubung : Jeffles Moonra Nasution

**LK 045 IDN Laboratorium Kalibrasi Direktorat Metrologi,
Depperindag**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volume, Tekanan, Dimensi,
Kelistrikan
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Pasteur No. 27, Bandung 40171
Telepon : (022)4202773
Fax : (022)4207035, 42667557
Personal Penghubung : Soemardi, Atjeng

LK 046 IDN Laboratorium Kalibrasi Balai Pengujian dan Sertifikasi Mutu barang (BPSMB) Padang

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Panjang
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Belibis Air Tawar Selatan, Padang 25131
Telepon : (0751)54202
Fax : (0751)53484
Personal Penghubung : Syafei M, Furmansyah

LK 047 IDN Laboratorium Kalibrasi Pusat Pengujian Obat dan Makanan

Ruang Lingkup : Suhu, Masa, Volume, Optik
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Percetakan Negara 23, Jakarta 10560
Telepon : (021)4245075
Fax : (021)4245150
Personal Penghubung : Siswanto

LK 048 IDN Laboratorium Kalibrasi PT. Internasional Standar System

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya, Instrumen
Analitik, Vibrasi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Kompleks Puri Niaga II, Jl. Puri Kencana

Blok J1-1I, Kembangan, Jakarta 11610
Telepon : (021)5824867 ; Fax : (021)5824837
Personal Penghubung : Budi Tjoanda
E-mail : iss@pt-iss.com

LK 049 IDN Laboratorium Kalibrasi PT. Krakatau Steel

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Volumetrik,
Dimensi, Kelistrikan, Instrumen Analitik
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Coil-Komplek Pabrik PT. Krakatau
Steel, Cilegon 42435
Telepon : (0254)371316
Fax : (0254)371803
Personal Penghubung : Lantip Pramono, Moh. Irbanov
Tanggal berakhir
akreditasi : 2006-06-25 00:00:00.0

LK 051 IDN Laboratorium Kalibrasi PT. Berca Hardayaperkasa

Ruang Lingkup : Suhu, Tekanan, Dimensi, Kelistrikan,
Waktu & Frekuensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Imam Bonjol, Nagoya, Batam
Telepon : (0778)427912 ; Fax : (0778)427790
Personal Penghubung : Agung Dewanto
Tanggal berakhir
akreditasi : 2006-09-18 00:00:00.0

LK 052 IDN Laboratorium Kalibrasi LEMIGAS

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volume, Tekanan
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Ciledug Raya, Cipulir, Kebayoran Lama,
Jakarta Selatan 12230
Telepon : (021)7394422 ext. 1528
Fax : (021)7246150

Personal Penghubung : Mardino, Sutopo Abdullah
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-03-27 00:00:00.0

LK 053 IDN PT. Caltesys Indonesia

Ruang Lingkup : Massa, Volumetrik, Densitas, Gaya,
Tekanan, Dimensi, Kelistrikan, Waktu &
Frekuensi
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Puri Niaga II Puri KencanaJl. Puri Kencana
Blok J1 - 2V, Jakarta 11610
Telepon : (021)5826882
Fax : (021)5826881
Personal Penghubung : Gregory Utama
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-04-29 00:00:00.0
E-mail : info@caltesys.com

LK 056 IDN CQA Laboratorium Bidang Kalibrasi PT.Indofood Sukses Makmur Tbk.

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volume, Tekanan
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Ancol I No. 4-5, Ancol Barat, Jakarta
14430
Telepon : (021)6909432
Fax : (021)6909433
Personal Penghubung : Cahyo Konstitusianto, Joko Budianto
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-10-09 00:00:00.0
E-mail : cahyo_konstitusianto@indofood.co.id

LK 057 IDN PT. Global Quality Indonesia

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya, Dimensi,
Kelistrikan

detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Ruko Kopo Regency Blok N No. 7C,
Bandung 40227
Telepon : (022) 5436533
Fax : (022) 5436533
Personal Penghubung : Didy Rudy Hamid
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-10-09 00:00:00.0
E-mail : globalquality@bdg.centrin.net.id

**LK 058 IDN Dinas Laboratorium - Departemen Teknik Produksi
PT. Pupuk Sriwidjaja**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volume, Instrumen Analitik
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Mayor Zen, Palembang 30118
Telepon : (0711)712111, (0711)712222# 7603
Fax : (0711)712100
Personal Penghubung : Ade Firdaus Taufick
Tanggal berakhir
akreditasi : 2007-10-09 00:00:00.0

LK 062 IDN Balai Besar Tekstil

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Dimensi, Waktu
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Jend. Ahmad Yani No. 390, Bandung
Telepon : (022)7206214 ; Fax : (022)7271288
Personal Penghubung : Ockay Rukaesih
Tanggal berakhir
akreditasi : 2008-09-24 00:00:00.0
E-mail : texirdti@bdg.centrin.net.id

LK 064 IDN PT. Indocal Laboratori Sistem

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya
detail ruang lingkup (pdf file)
Alamat : Jl. Jend. Ahmad Yani No. 245 Lt. III,
Bandung
Telepon : (022)7234688
Fax : (022)7234688
Personal Penghubung : Moh. M. Huda
Tanggal berakhir
akreditasi : 2008-09-24 00:00:00.0

LK 067 IDN PT. Suria Berkat Abadi Divisi Laboratorium Kalibrasi

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Kelistrikan
Alamat : Gedung Yayasan Dana Pensiun TELKOM
“ Jl. Bungur Besar Raya 49 Senen,
Jakarta
Telepon : (021)42886922
Fax : (021)42886922
Personal Penghubung : Afrius Indra
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-01-27 00:00:00.0
E-mail : sba_kalibrasi@cbn.net.id

LK 068 IDN Laboratorium Kalibrasi PTBA Tanjung Enim

Ruang Lingkup : Suhu, Massa
Alamat : Jl. Jurang Parigi Dalam No. 4 - Tanjung
Enim, Sumatera Selatan
Telepon : (0734)451096 ext. 3165, 3152
Fax : (0734)452993
Personal Penghubung : Sonny Sudarsono
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-03-03 00:00:00.0
E-mail : hwidyastuti@bukitasam.co.id

**LK 070 IDN Puslit KIM LIPI Bidang Metrologi
(National Metrology Institute / NMI)**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Kelistrikan
Alamat : Komplek PUSPIPTEK Serpong, Tangerang
Telepon : (021)7560562
Fax : (021)7560568, 7560064
Personal Penghubung : Dede Erawan
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-03-22 00:00:00.0
E-mail : derawan@kim.lipi.go.id

LK 072 IDN PT.Duta Instrument Alfa Sakti

Ruang Lingkup : Suhu, Tekanan
Alamat : Jl. Pangeran Jayakarta Dalam No. 42C,
Jakarta
Telepon : (021)6396476, 6284523
Fax : (021)6492255
Personal Penghubung : Irwanto
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-05-26 00:00:00.0
E-mail : irwanto@duta.instrument.co.id

LK 074 IDN Laboratorium Kalibrasi PT.GMF AeroAsia

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Tekanan, Gaya, Torsi,
Dimensi, Kelistrikan
Alamat : Workshop 2 Lt. 2 GMF Bandara Soekarno
Hatta, Banten
Telepon : (021)5508489
Fax : (021)5501283
Personal Penghubung : Nuril Mustofa, Agus Rusiawan
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-07-21 00:00:00.0
E-mail : nuril@gmf-aeroasia.co.id

**LK 075 IDN Balai Riset dan Standardisasi Industri dan
Perdagangan Semarang**

Ruang Lingkup : Suhu, Massa
Alamat : Jl. Ki Mangunsarkoro No. 06, Semarang
Telepon : (024)8316315
Fax : (024)8414811
Personal Penghubung : Sigit
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-07-21 00:00:00.0

LK 077 IDN Laboratorium Kalibrasi PT Gaya Dinamika Angkasa

Ruang Lingkup : Suhu, Kelistrikan, Waktu & Frekuensi
Alamat : Jln. Pulo Buaran IV Blok I No 2 Kawasan
Industri Pulogadung, Jakarta
Telepon : (021)4601994, 46822606
Fax : (021)46822605
Personal Penghubung : Ade Mulyawan
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-09-28 00:00:00.0
E-mail : gayadinamika@plasa.com

LK 079 IDN Laboratorium Kalibrasi PT HM Sampoerna

Ruang Lingkup : Suhu, Massa, Volumetrik
Alamat : Jln. Raya Surabaya - Malang KM 51,4
Sukorejo, Kab. Pasuruan
Telepon : (0343)636740
Fax : (0343)636732, 636764
Personal Penghubung : Nyoman Sastrawan
Tanggal berakhir
akreditasi : 2009-11-24 00:00:00.0
E-mail : I.Sastrawan@id.sampoerna.com

INDEKS

- angle-defining aperture* 38
aperture stop 38
aplikasi cara nonkontak 5
- bandwith* 48
benda-hitam 10, 18, 19, 20, 21, 22,
23, 24, 25, 26, 27,
Benda-hitam 18, 28, 32, 81,
Benda-hitam praktis 28, 32
benda-hitam variabel 32, 33, 34,
83, 85, 86
benda ukur 58
besaran spektral 17
- cavity* 29, 30
Contoh pengolahan data kalibrasi
99
- detector-defining aperture* 38
diagram ketertelusuran 77
diameter lingkaran gratikul 41, 42,
43
direct reading thermometer 4, 35, 36
distribusi normal 60, 69, 74
distribusi segitiga 69
- emisivitas 9, 23, 24, 25, 26, 27, 29,
30, 31, 32, 34, 51, 52
emisivitas rongga benda-hitam 30,
31
emisivitas spektral 24
emisivitas total 24
estimasi nilai ketidakpastian 56
- field of view* 36, 38, 41
field stop 38
- gradien suhu 85
graybody 25, 26, 29
- homogenitas 85
Hukum Pergeseran Wien 21
Hukum Radiasi Panas Stefan-
Boltzmann 22
Hukum Radiasi Panas Wien 23, 27
- industri xi, xii
isothermal surface 28
isotropically diffuseemitter 18
- jarak ukur 9, 10, 37, 44, 93,

jendela atmosfer 39
 kalibrasi termometer 8, 10, 11, 32, 63, 64, 65, 77, 82, 83
 kesalahan 23, 25, 42, 55, 57
 kesalahan kalibrasi 87
 kesalahan pengukuran 42, 55
 ketidakpastian naku 61, 62
 Ketidakpastian baku gabungan 71
 ketidakpastian karena regresi 64
 ketidakpastian pengukuran 55, 74
 koefisien sensitivitas 72, 75
 konstanta A, B dan C 49
 kontak 2, 3, 5, 6, 25, 32, 80, 82, 83, 85
 koordinat bola 15
 Koreksi 63, 64, 65, 91, 97, 98, 103, 104, 106, 107, 108
 kualitas termometer 1
 kurva pendekatan 61

 Medan pandang 10, 41
 media kalibrasi 11, 32, 33, 57, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87
 metoda iterasi 88
 Microsoft Excel 60, 63, 88, 95, 104

 nilai estimasi 57, 58, 59
 nilai koreksi 1, 61, 63, 65, 82, 95, 96, 103, 105, 108
 nilai rata-rata 56, 59, 60
 nilai Td 52
 non-kontak 2, 3, 4

opaque enclosure 28

 Pelaksanaan Kalibrasi 94

 pendekatan 27, 28, 29, 32, 61, 62, 64, 71
 pengepasan kurva (*curve fitting*) 61
 Penggunaan Termometer Inframerah 6
 penghamburan (*scattering*) 42
 Pengolahan Data 95, 99, 102
 pengukuran berulang 57, 59, 61, 75
perfect absorber 18, 20, 28, 29
perfect emitter 18, 20, 28
 persamaan Calendar-van Dussen 82, 88
 Persamaan kalibrasi 89
 persamaan polinomial orde-3 63
 Persiapan Kalibrasi 92
 proses kalibrasi 10, 11, 33, 77, 82, 83, 92, 95
 proses kalibrasi berjenjang 82
 proses regresi 57, 59, 62

 radiasi panas 3, 4, 10, 14, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 31
 radiator panas ideal 20, 28
 Radiator Permukaan Datar 85, 90
 Regresi() 64
 respons spektral 35, 38, 39, 40, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 102

set-up sistem kalibrasi 93
spectral-band thermometer 35
spectral response 35
 stabilitas 57, 85
 Standar nasional 78, 81
 sudut ruang 15, 16, 17
 suhu 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22,
 suhu detektor Td 53
 suhu radiansi 27, 28

suhu sekeliling Tamb 53
surface phenomenon 14

termometer inframerah 4, 5, 7, 8,
9, 10, 11, 27, 33, 35,
termometer kontak 2, 3, 5, 6, 25,
32, 80, 82, 83, 85
termometer radiasi 4, 10, 25, 32, 35
Termometer standar 34, 86, 89, 99

t_{exp} 82, 90, 91, 103, 104, 108, 109,
110
tingkat kepercayaan 66, 67, 72, 73,
74, 98, 100, 110
titik-tetap (*fixed-point*) 78

volumetric phenomenon 14

Biografi Penulis

Hidayat Wiriadinata lahir di Bandung 31 Oktober 1954. Bekerja di Puslit Metrologi LIPI (dahulu Lembaga Instrumentasi Nasional LIPI) sejak tahun 1982. Sejak tahun 1993 bergabung dengan Laboratorium Metrologi Suhu dengan spesialisasi Termometri Radiasi. Dalam rangka pengembangan termometri radiasi, Puslit Metrologi telah mengirimkan Hidayat untuk mengikuti pelatihan metrologi suhu di beberapa institusi metrologi negara lain yang ternama, di antaranya dengan *National Metrology Institute of Japan* (NMIJ) Jepang, *National Measurement Institute of Australia* (NMIA) Australia, dan *Measurement Standard Laboratory of New Zealand* (MSL) Selandia Baru. Dalam kerja sama penelitian tersebut, Hidayat berkesempatan berkunjung ke NMIJ di kota Tsukuba dan NMIA di kota Sidney. Dalam kunjungannya tersebut, Hidayat telah menimba ilmu metrologi khususnya yang berkaitan dengan termometri radiasi, sedangkan kerja sama dengan MSL dilaksanakan dengan datangnya Dr. Peter Saunders ke Puslit Metrologi LIPI untuk memberikan pelatihan. Hingga saat ini Hidayat tidak pernah putus menjalin komunikasi dengan Dr. Peter Saunders terutama yang berkaitan dengan termometri radiasi. Selama bekerja di Puslit Metrologi LIPI beberapa makalah tentang termometri radiasi, di antaranya mengenai termometer inframerah, telah ditulisnya dan diterbitkan pada jurnal ilmiah nasional, seperti majalah ilmiah Instrumentasi dan Jurnal Standardisasi. Alumni Fisika Teknik ITB dan Optoelektronik UI ini menikah dengan Wawat Waliyati dan dikarunia lima orang anak dan lima orang cucu.

TERMOMETER INFRAMERAH: *Teori dan Kalibrasi*

Meningkatnya penggunaan termometer inframerah di masyarakat dewasa ini akan lebih baik jika disertai dengan adanya sebuah buku yang bisa menjadi pegangan dalam mengoperasikannya. Oleh karena itu, buku ini terbit untuk melengkapi minimnya literatur dalam bahasa Indonesia yang secara khusus membahas tentang termometer inframerah sehingga dapat memudahkan para pengguna untuk lebih memahami cara kerja termometer inframerah.

Buku ini akan memberikan pemahaman yang jelas kepada para pembaca tentang termometer radiasi secara umum dan termometer inframerah secara khusus. Teori dasar mengenai radiasi panas, benda-hitam (*blackbody*), termometer inframerah dan dasar-dasar perhitungan ketidakpastian (*uncertainty*) diuraikan dengan baik dalam buku ini. Di samping itu, buku ini menyajikan secara rinci mengenai teknik mengkalibrasi termometer inframerah serta cara-cara mengolah data kalibrasi beserta perhitungan nilai ketidakpastian.

Secara khusus buku ini dapat digunakan untuk para teknisi kalibrasi guna membantu kelancaran dalam melakukan kalibrasi termometer inframerah di laboratorium. Buku ini juga merupakan salah satu sumber referensi yang tepat bagi berbagai kalangan yang menaruh minat terhadap termometer inframerah, seperti kalangan industri, dosen dan mahasiswa teknik di perguruan tinggi.



Buku Obor

Distributor:
Yayasan Obor Indonesia
Jl. Plaju No.10 Jakarta 10230
Telp. (021) 319 26978, 3920114
Faks. (021) 319 24488
E-mail: yayasan_obor@cbn.net.id

LIPI Press

