PERANCANGAN *BLACKBODY* CAVITY TEMBAGA UNTUK KALIBRASI TERMOMETER TELINGA

Design Of Copper Blackbody Cavity For Ear Thermometer Calibration

Iip Ahmad Rifai, Melati Azizka Fajria, Dwi Larassati, Aditya Achmadi,
Hidayat Wiriadinata, Ghufroon Zaid

Badan Standardisasi Nasional, Gedung 430 Kompleks PUSPIPTEK, Muncul, Tangerang Selatan
Email :iip@bsn.go.id

Abstrak

Dengan semakin banyaknya penggunaan termometer telinga dan mulai ditinggalkannya termometer merkuri untuk alat ukur kesehatan, maka ketertelusuran nilai pengukuran termometer telinga ke standar internasional menjadi semakin penting dan pengembangan sistem kalibrasi termometer telinga yang lebih baik lagi menjadi sebuah keharusan. Pada tulisan ini dibahas perancangan *blackbody cavity* dari tembaga sebagai media kalibrasi termometer telinga. *Blackbody Cavity* tembaga yang dibuat didesain sedemikian rupa sehingga *blackbody cavity* mempunyai nilai emisivitas yang mendekati nilai ideal 1 untuk mendekati nilai emisivitas radiator planckian ideal. Hasil perhitungan dan simulasi pada keadaan *isothermal* menunjukkan bahwa emisivitas spektral efektif hingga $> 0,999$ dan emisivitas gabungan 0,99982 pada dasar *cone cavity blackbody*. Pada keadaan *non-isothermal* emisivitas spektral efektif hingga lebih dari 0,999 dan emisivitas gabungan 0,9996 pada dasar *cone cavity blackbody* dapat dicapai.

Katakunci:termometer telinga, emisivitas, *blackbody cavity*

Abstract

With the increasing use of ear thermometers and the abandonment of mercury thermometers for health measuring devices, the traceability of ear thermometer measurement values to international standards is becoming increasingly important and the development of better ear thermometer calibration systems has become a necessity. In this paper, the development of copper blackbody cavity as a calibration media for ear thermometers is discussed. The Blackbody Cavity copper is designed in such a way that the blackbody cavity has an emissivity value close to the ideal value of 1 to approximate the ideal Planckian radiator emissivity value. Calculation and simulation results in an isothermal state show that spectral effective emissivity is more than 0.999 and combined emissivity is 0.99982 on the core of cavity blackbody cone.

Keywords:ear thermometer, emissivity, *blackbody cavity*

1. PENDAHULUAN

Suhu badan merupakan salah satu kondisi fisiologis yang digunakan oleh petugas medis untuk menentukan kondisi pasien dimonitor setiap hari. Oleh karena itu, suhu badan harus diukur menggunakan termometer klinik yang mempunyai akurasi yang memadai. Salah satu jenis termometer klinik adalah termometer telinga yang termasuk alat elektromedik yang digunakan untuk mengetahui kondisi kesehatan seseorang dengan salah satu parameter melalui pengukuran suhu pada anggota fisik.

Menurut MedlinePlus, suhu badan manusia sehat ideal pada $36,1^{\circ}\text{C} \sim 37,2^{\circ}\text{C}$, jika melebihi nilai suhu tersebut dapat dikatakan orang tersebut perlu mendapatkan penanganan untuk menurunkan suhu badannya agar tidak berakibat lebih fatal terhadap jiwanya.

Termometer telinga adalah salah satu alat elektromedik berupa termometer klinik yang saat ini sudah sangat banyak digunakan di Indonesia, uji kelayakan termometer klinik diatur oleh pemerintah melalui Undang-Undang (UU) No. 36 tahun 2009 tentang kesehatan, UU No. 44 tahun 2009 tentang rumah sakit, untuk dapat

memenuhi persyaratan-persyaratan tersebut, alat-alat medis harus dikalibrasi atau diuji secara berkala. Permenkes No. 54 Tahun 2015 Tentang Pengujian dan Kalibrasi Alat Kesehatan, mengatur bahwa alat-alat medis yang digunakan untuk keperluan diagnosa, terapi, rehabilitasi dan penelitian medik baik secara langsung maupun tidak langsung dan memiliki parameter penunjukan, keluaran, atau kinerja wajib untuk dikalibrasi atau diuji secara berkala.

Dilain pihak, kebutuhan permintaan kalibrasi alat-alat elektromedik semakin meningkat tiap tahunnya seiring dengan peningkatan jumlah peralatan kesehatan dan kewajiban untuk mengkalibrasi peralatan kesehatan apabila suatu rumah sakit ingin mengajukan akreditasi. BPFK telah mulai memecahkan permasalahan ini dengan membentuk BPFK milik dinas kesehatan provinsi (Prov. Lampung, Jabar, Kalbar, Banten, Sumsel, Jateng dan Yogyakarta). Dalam pembentukan suatu lab kalibrasi alat-alat medis, tentunya diperlukan berbagai macam persiapan. Utamanya persiapan tersebut berupa pengadaan alat-alat kalibrasi dan peningkatan SDM yang akan melaksanakan kegiatan kalibrasi.

Gambar 1. Skema rantai ketertelusuran pengukuran bidang kesehatan di Indonesia

Sebagai pengelola teknis ilmiah Standar Nasional untuk Satuan Ukuran (SNSU), Badan Standardisasi Nasional (BSN), berkewajiban untuk merealisasikan ketertelusuran pengukuran besaran suhu, termasuk besaran suhu alat elektromedik, yaitu dengan jalan melakukan pemeliharaan standar dan menyediakan fasilitas kalibrasi untuk alat-alat standar suhu. Keterselusuran (traceability) adalah suatu rantai yang tidak terputus dari beberapa perbandingan, yang masing-masing dinyatakan dengan suatu ketidakpastian pengukuran. Hal ini untuk memastikan bahwa suatu hasil pengukuran atau nilai dari suatu standar terpaut dengan suatu acuan yang lebih tinggi, dan seterusnya sampai ke standar

primer.

Ketiadaannya ketertelusuran alat ukur kesehatan, terutama alat elektromedik, ke sistem internasional atau SI, dapat berakibat fatal pada interpretasi hasil pengukuran atau pengujian karena tidak ada jaminan kebenaran BSN berupaya menyediakan jaminan ketertelusuran peralatan ukur terutama alat ukur kesehatan yang diakui internasional. Di bidang termometer telinga, langkah tersebut telah dimulai dengan pembuatan beberapa tipe *blackbody cavity* yang berbeda digabungkan dengan bak cairan besar yang dimiliki BSN sebagai media kalibrasi.

Hasil yang didapat tidak terlalu memuaskan untuk mengejar target nilai maksimum error yang disyaratkan ASTM E 667:98, penelitian lanjutan menemukan bahwa tingkat keseragaman bak cairan yang digunakan turut berpengaruh dalam memberikan sumber ketidakpastian yang besar, hal ini dikarenakan ukuran bak cairannya yang besar yang membuat tingkat keseragamannya tidak cukup bagus sebagai media kalibrasi termometer telinga, sehingga diperlukan pembuatan bak cairan yang memiliki keseragaman yang bagus, salah satu caranya adalah dengan memperkecil ukuran dari bak cairan tersebut. Kelebihan lain dari ukuran kecil bak cairan ini adalah tingkat kepraktisannya yang kedepannya dapat mempermudah pelaksana kalibrasi berkeliling melakukan kalibrasi termometer telinga di fasilitas pelayanan kesehatan, seperti di rumah sakit, puskesmas, dan klinik.

Penelitian sebelumnya telah berhasil membuat *blackbody cavity* dari aluminium dengan menghasilkan emisivitas spektral efektif pada dasar *cone cavity blackbody* hingga 0,998 pada keadaan *isothermal* (Larassati 2015). Pada tulisan ini dibahas pengembangan *blackbody cavity* dari tembaga sebagai media kalibrasi termometer telinga dengan desain yang dibuat untuk meningkatkan nilai emisivitas, nilai emisivitas efektif dihitung dari simulasi geometri *blackbody* dan nilai emisivitas gabungan dihitung dari simulasi dengan termometer telinga dengan berbagai macam *Field of View (FoV)*, *emisivitas-emisivitas* tersebut dihitung dan disimulasikan pada keadaan dinding *blackbody isothermal* dan *non-isothermal* dengan perangkat lunak *blackbody emissivity* versi 1.2. Hasil perhitungan pada keadaan *isothermal* menunjukkan bahwa emisivitas spektral efektif hingga >0,999 dan emisivitas gabungan 0,99982 pada dasar *cone cavity blackbody*. Pada keadaan *non-isothermal* emisivitas spektral efektif hingga >0,999 dan emisivitas gabungan

0,9996 pada dasar *cone cavity blackbody* dapat dicapai.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Blackbody adalah permukaan ideal/teoritis yang memiliki sifat-sifat tertentu, antara lain *perfect absorber* yaitu menyerap seluruh radiasi yang jatuh padanya, untuk semua panjang gelombang dan arah datangnya radiasi.

Gambar 2. Besarnya radiasi *blackbody* tidak bergantung pada arah emisi.

Sifat berikutnya adalah *perfect emitter*, dimana pada suhu dan panjang gelombang yang sama, *blackbody* mengemisikan radiasi panas lebih besar daripada benda nyata (*realbody*). Dan yang terakhir *isotropically diffuse emitter* dimana radiasi panas yang diemisikan memiliki besar yang sama pada setiap arah pancaran, seperti yang diperlihatkan secara skematis pada Gambar 2. Karena radiasi *blackbody* tidak bergantung pada arah emisi, maka radiasi spektral ke semua arah besarnya sama sehingga nilainya hanya bergantung pada suhu dan panjang gelombang. Simbol radiasi $L_e(\theta, \phi, \lambda, T)$ diubah menjadi $L_b(\lambda, T)$, dengan indeks b menunjukkan *blackbody* sebagai sumber radiasi panas.

Dengan menggunakan mekanika kuantum, Mac Planck telah merumuskan hubungan antara suhu *blackbody* dengan radiasi panas yang diemisikannya dalam bentuk Persamaan, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1):

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

dengan:

λ = panjang gelombang radiasi panas, μm

T = suhu *blackbody*, K

$L_b(\lambda, T)$ = radiasi *blackbody* pada panjang gelombang λ dan suhu T , $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$

c_1 = konstanta Planck pertama = $1.19104282 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$.

c_2 = konstanta Planck kedua = $0,014388 \text{ m} \cdot \text{K} = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$

Gambar 3. Grafik radiasi *blackbody* terhadap panjang gelombang.

Sebagai penyerap sempurna (*perfect absorber*) dan emiter sempurna (*perfect emitter*), *blackbody* merupakan suatu radiator panas ideal. Tak ada benda lain yang memiliki sifat yang persis sama dengan *blackbody*. Berdasarkan pada Persamaan (1) untuk suatu nilai T tertentu, nilai radiasi hanya merupakan fungsi panjang gelombang λ , sehingga dapat dibuat grafik dari Persamaan (1) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.

Pada Gambar 3 diperlihatkan hubungan antara radiasi terhadap panjang gelombang untuk beberapa nilai suhu. Tiap nilai suhu memiliki sebuah kurva yang merupakan fungsi panjang gelombang, sebagai contoh *blackbody* dengan suhu 1300 K atau sekitar 1027°C kurvanya meliputi daerah ultra violet, sinar tampak dan infrared, dengan nilai radiasi maksimumnya pada sekitar panjang gelombang $2 \mu\text{m}$. Sedangkan pada suhu 2800 K nilai radiasi maksimumnya berada pada sekitar panjang gelombang $1 \mu\text{m}$.

Pada Gambar 3 terlihat bahwa semakin besar nilai suhunya maka panjang gelombang untuk radiasi maksimum bergeser menuju panjang gelombang yang lebih pendek. Sebagai penyerap panas sempurna (*perfect absorber*) dan pemancar panas yang sempurna (*perfect emitter*), *blackbody* merupakan radiator panas ideal. Tak ada permukaan yang memiliki sifat yang persis sama dengan *blackbody*.

Namun demikian *blackbody* dapat didekati dengan suatu rongga kedap cahaya (*opaque enclosure*) yang seluruh permukaan

dalamnya memiliki suhu yang sama (*isothermal surface*). Skema rongga tersebut diperlihatkan pada Gambar 5. *Blackbody* praktis merupakan pendekatan dari *blackbody* ideal. Pendekatan ini mengacu pada dua sifat utama dari *blackbody* ideal, yaitu *perfect absorber* dan *perfect emitter*.

Gambar 4. Rongga pendekatan blackbody

Agar dapat memenuhi kedua sifat utama tersebut maka bentuk *blackbody* praktis mengikuti pola permukaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Agar memenuhi pola tersebut maka *blackbody* praktis berbentuk *cavity*. Selain itu supaya emisivitasnya tidak bergantung pada panjang gelombang maka sebagai bahan *cavity* yang dipilih adalah logam *graybody* seperti graphite atau logam yang telah dioksidasi.

Disamping itu, agar radiasi yang masuk ke dalam rongga tidak ada yang memantul keluar rongga, sehingga rongga dapat berfungsi sebagai *perfect absorber*, maka dimensi rongga dibuat sedemikian rupa sehingga memiliki jari-jari bukaan r yang relatif kecil bila dibandingkan dengan kedalaman rongga R . Lihat Gambar 5.

Gambar 5. Skema *blackbody cavity*

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 maka nilai emisivitasnya semakin membesar dan mendekati 1 sehingga semakin mendekati emisivitas *blackbody* ideal.

Tungku akan memanaskan *blackbody cavity* sehingga rongga tersebut memiliki suhu tertentu dan kemudian dipancarkannya sebagai radiasi panas melalui bukaan rongga. Disamping itu, agar radiasi panas yang dipancarkannya tersebut mendekati sifat pancaran *blackbody* teoritis, sehingga rongga dapat berfungsi sebagai *perfect emitter*, maka suhu tungku harus merata sedemikian rupa sehingga dapat membuat suhu rongga merata pula pada seluruh permukaannya.

Secara sederhana emisivitas *blackbody cavity* dapat didekati berdasarkan pada Persamaan^[3]:

$$\epsilon = 1 - (1 - \epsilon_s) \frac{r^2}{R^2} \quad (2)$$

dengan :

ϵ = emisivitas *blackbody cavity*

ϵ_s = emisivitas bahan

Persamaan (2) hanya memperhitungkan faktor dimensi rongga dan emisivitas bahan, sedangkan beberapa faktor lain belum diperhitungkan, diantaranya faktor refleksi yang mungkin terjadi pada rongga dan faktor keseragaman suhu di sekeliling *blackbody cavity*. Salah satu contoh sederhana apabila kita menghitung emisivitas *blackbody cavity* yang terbuat dari bahan Inconel yang permukaannya dikasarkkan dan dioksidasi, bila diameter bukaan $r = 0,5$ cm, panjang $R = 10$ cm dan emisivitas bahan $\epsilon_s = 0,9$, maka nilai emisivitas *blackbody cavity* Inconel tersebut adalah: $\epsilon = 1 - 0,1 \times 0,5^2/10^2 = 0,99975$. Dari nilai emisivitas yang mendekati nilai 1 ini terlihat bahwa *blackbody cavity* mendekati sifat *blackbody* ideal. Perhitungan emisivitas yang lebih lengkap adalah dengan metode *Integrative-Cavity* dimana factor-faktor lain seperti refleksi telah diperhitungkan.

Salah satu cara lain yang lebih kompleks yang banyak digunakan untuk menghitung nilai emisivitas adalah dengan metode *Integrative-Cavity*, metode ini menggambarkan pertukaran radiasi antara permukaan secara analitis^[5,6]. Metode *Integrative-Cavity* melakukan pendekatan perhitungan nilai emisivitas local ϵ_x pada segmen tertentu di posisi x dan suhu T dengan menjumlahkan seluruh komponen

radiasi n segmen yang mencapainya. Untuk kondisi *non-isothermal* ($T(x) \neq T_0$) dan pantulan menyebar (*diffuse reflection*) ($\epsilon \neq f(a)$), nilai emisivitas didekati dengan persamaan:

$$\epsilon_x(T, T_0) = \epsilon_x(T) \frac{L_x(T)}{L(T_0)} + (1 - \epsilon_x(T)) \cdot \sum_{i=1}^n \epsilon_{i,j} \cdot F_{i,j} \quad (3)$$

Dimana :

$\epsilon_x(T, T_0)$ = emisivitas di posisi x dan suhu T dengan pengaruh T_0 diperhitungkan

$\epsilon_x(T)$ = emisivitas di posisi x

$L_x(T)$ = nilai radiasi di posisi x pada suhu T

$L(T_0)$ = nilai radiasi pada suhu T_0

$\epsilon_{i,j}$ = nilai emisivitas pada segmen i,j

$F_{i,j}$ = nilai form factor pada segmen i,j

Dalam kondisi *isothermal* radiasi lokal nilainya tetap di seluruh permukaan *cavity* $L(T_0) = L_{i,j} = L_x$ dan persamaan menjadi lebih sederhana yaitu :

$$\epsilon_x = \epsilon_x + (1 - \epsilon_x) \cdot \sum_{i=1}^n \epsilon_{i,j} \cdot F_{i,j} \quad (4)$$

Blackbody cavity yang dibuat pada penelitian ini berupa *cylindrical cone cavity* dari bahan tembaga dengan *conical aperture* karena tipe ini memiliki akurasi yang lebih bagus bila dibandingkan dengan tipe lainnya.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dari bulan Februari tahun 2019 di Laboratorium SNSU Badan Standardisasi Nasional Serpong. Pembuatan *cavity blackbody* ini diperlukan untuk system kalibrasi *termometer telinga*. Skema *cavity blackbody* yang dibuat berupa *cylindrical cone cavity* dengan *conical aperture* sesuai dengan desain dasar dari JIS T 4207 2005 tentang *Ear thermometer*.

Pada tulisan ini, dihitung dan disimulasikan nilai emisivitas spektral efektif dan gabungan dengan perangkat lunak perangkat lunak *blackbody emissivity* versi 1.2. Persamaan (3) digunakan untuk menghitung emisivitas pada kondisi *non-isothermal* dan persamaan (4) digunakan untuk menghitung emisivitas pada kondisi *isothermal* pada *cavity blackbody* yang telah dibuat. Emisivitas efektif yang dihitung adalah emisivitas efektif pada dasar *cone cavity blackbody*, sedangkan emisivitas gabungan dihitung dengan mensimulasikan *blackbody cavity* yang dibuat dengan termometer non-kontak dengan berbagai macam *field of view*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain *blackbody cavity* yang dapat dilihat digambar 6 dan hasil *blackbody cavity* yang dibuat dapat dilihat di Gambar 7.

Gambar 6. Desain *blackbody cavity*

Gambar 7. *Blackbody Cavity* tembaga yang dibuat

Berdasarkan simulasi emisivitas saat *isothermal*, dinding *cavity blackbody* dianggap memiliki penyebaran suhu ideal yang merata, sehingga didapat hasil simulasi emisivitas sebagai berikut:

Gambar 8. Emisivitas Efektif *Blackbody Cavity* (*isothermal*)

Gambar 9. Emisivitas Gabungan *Blackbody Cavity* (isothermal)

Pada kondisi ideal ini didapat emisivitas spektral efektif hingga $> 0,999$ di titik dasar *blackbody cavity* dan emisivitas gabungan senantiasa > 0.99982 untuk berbagai jenis termometer non-kontak dengan berbagai macam *field of view*.

Berdasarkan simulasi emisivitas saat *non-isothermal*, dinding cavity blackbody dianggap memiliki penyebaran suhu yang tidak merata, ketidakmerataan ini terutama dipengaruhi oleh bukaan *blackbody* yang terpengaruh oleh udara luar, yang berarti semakin mendekati bukaan *blackbody* maka suhu dinding blackbody akan semakin berkurang bila dibandingkan dengan suhu pada dasar blackbody, sehingga didapat hasil simulasi emisivitas sebagai berikut:

Gambar 10. Emisivitas Efektif *Blackbody Cavity* (*non-isothermal*)

Pada kondisi *non-isothermal*, didapat emisivitas spektral efektif hingga $> 0,999$ di titik dasar *blackbody cavity* dan dan emisivitas gabungan senantiasa $> 0,9996$ untuk

berbagai jenis termometer non-kontak dengan berbagai macam *field of view*.

Gambar 11. Emisivitas Gabungan *Blackbody Cavity* (isothermal)

5. KESIMPULAN

Dari penelitian telah dirancang *blackbody cavity* yang dibuat berupa *cylindrical cone cavity* dengan *conical aperture* pada saat *isothermal* dapat memiliki emisivitas efektif hingga mencapai $> 0,999$ di titik tengah dasar cavity dan emisivitas gabungan senantiasa > 0.99982 untuk berbagai jenis termometer non-kontak dengan berbagai macam *field of view*. Pada kondisi *non-isothermal*, didapat emisivitas spektral efektif hingga $> 0,999$ di titik dasar *blackbody cavity* dan dan emisivitas gabungan senantiasa $> 0,9996$ untuk berbagai jenis termometer non-kontak dengan berbagai macam *field of view*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada pemberi dana penelitian yaitu Program Insentif Riset Sistem Inovasi Nasional (INSINAS) Pendanaan Tahun 2019 dari Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi dan kepada pimpinan Badan Standardisasi Nasional dan jajaran manajemen yang telah menyediakan sarana dan prasarana untuk melaksanakan penelitian ini serta semua anggota penelitian dan pihak lain yang telah membantu menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Larassati, D., Rifai, I. A., dan Zaid, G. (2015) Analisa perhitungan nilai emisivitas spektral efektif *cavity blackbody* untuk kalibrasi *ear thermometer*, PPI KIM

- LIPI.
Body temperature norms, Retrieved
September 14, 2019
<https://medlineplus.gov/ency/article/001982.htm>
- DeWitt, D.P. dan Gene D.Nutter. (1988).
Theory and practice of radiation
thermometers. Singapore: John Wiley.
- Zhang, Z., Tsai, B. and Machin, G. (2009).
Radiometric Temperature Measurement
(I. Fundamental). Hal. 282-
283, Academic Press
- Nicholas, J.V. dan D.R. White. (2005).
Traceable Temperature, Second
Edition. Singapore: John Wiley..
Amsterdam: Academic Press.
- Sakuma, F. and Ma, L. (2004). "Cavity
emissivity of a fixed-point blackbody," in
Tempmeko 2004, D.; Zvizdic, Ed.,
Zagreb, FSB.
- Yoon, H. Gibson, C. and Johnson, B. (2001).
On the determination of emissivity of the
variable temperature blackbody used in
the dissemination of the us national
scale of radiance temperature," in
Tempmeko 2001, p.221.
- Ishii, J., Fukuzaki, T., McEvoy, H.C., Simpson,
R., Hartmann, J., and Hollandt, J.
(2004). "A Comparison of the blackbody
cavities for infrared ear thermometers of
NMIJ, NPL and PTB", Proc. of
TEMPMEKO'04,
- I. Pusnik, E. van der Ham, J. Drnovsek,
(2004). "Comparison of blackbody
cavities for calibration of infra-red ear
thermometers", Proc. Of
TEMPMEKO'04.
- J. Ishii, T. Fukuzaki, T. Kojima, A. Ono,
(2001). "Calibration of infrared ear
thermometers", Proc. Of
TEMPMEKO'01,
- JIS T 4207: 2005, (2005). Infrared ear
thermometers, Japan Measuring
Instruments Federation,