

PERAN KRITIS EMISIVITAS SEBAGAI FAKTOR INTERFERENSI DALAM AKURASI PENGUKURAN TERMOMETER

Gilbert Situmorang^{1*}, Soha Khairunnisa Siregar², Raja Khairani³, Reiphandy Ananda Purba⁴,
Kanaya Aisyah Dina⁵, Habibi Azka Nasution⁶, Winsyahputra Ritonga⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Universitas Negeri Medan. Indonesia

*Corresponding Author: gilbertstmrg.4251121013@mhs.unimed.ac.id

ABSTRAK

Termometer merupakan instrumen fundamental dalam pengukuran suhu yang digunakan di berbagai bidang sains, teknologi, industri, dan kesehatan. Kajian ini bertujuan mengevaluasi kinerja berbagai jenis termometer, menganalisis faktor-faktor interferensi pengukuran suhu, serta menegaskan peran kritis emisivitas (ϵ) sebagai parameter yang bersifat lintas teknologi dalam mempengaruhi akurasi instrumen, khususnya termometer inframerah. Metode yang digunakan adalah tinjauan sistematis terhadap 22 artikel ilmiah terindeks internasional (2021–2025) menggunakan protokol PRISMA dengan sintaks *Boolean search* pada basis data PubMed, Scopus, Frontiers, MDPI, dan arXiv. Hasil kajian menunjukkan termometer bekerja berdasarkan empat prinsip fisika: pemuaian termal, perubahan hambatan listrik, efek termoelektrik, dan radiasi inframerah. Faktor interferensi dikelompokkan menjadi: (1) faktor lingkungan, (2) faktor instrumental, (3) faktor teknis penggunaan, dan (4) faktor karakteristik objek ukur, di mana emisivitas permukaan menjadi variabel dominan yang menghubungkan keempat kelompok faktor tersebut. Kajian menegaskan tidak ada jenis termometer yang unggul di semua kondisi; pemilihan instrumen harus mempertimbangkan karakteristik emisivitas objek, kondisi lingkungan, dan akurasi yang dipersyaratkan secara simultan. Matriks rekomendasi dan kerangka kompensasi emisivitas yang dihasilkan diharapkan berkontribusi sebagai panduan praktis dalam perancangan sistem sensor suhu cerdas berbasis IoT.

Kata kunci: *Termometer; Emisivitas; Akurasi Pengukuran Suhu; Kalibrasi; Tinjauan Sistematis*

ABSTRACT

A thermometer is a fundamental instrument for temperature measurement used across science, technology, industry, and healthcare. This study aims to evaluate the performance of various thermometer types, analyze interference factors in temperature measurement, and establish the critical role of emissivity (ϵ) as a cross-technology parameter affecting instrument accuracy, particularly in infrared thermometers. The method is a systematic review of 22 internationally indexed articles (2021–2025) using the PRISMA protocol with *Boolean search* syntax across PubMed, Scopus, Frontiers, MDPI, and arXiv databases. Findings show thermometers operate on four physical principles: thermal expansion, electrical resistance change, thermoelectric effect, and infrared radiation. Interference factors are grouped into: (1) environmental factors, (2) instrumental factors, (3) technical usage factors, and (4) characteristics of the measured object, where surface emissivity is the dominant variable connecting all four factor groups.

This review concludes no single thermometer type is superior under all conditions; instrument selection must simultaneously consider object emissivity characteristics, environmental conditions, and required accuracy. The resulting recommendation matrix and emissivity compensation framework are expected to serve as practical guidelines for designing IoT-based intelligent temperature sensing systems.

Keywords: *Thermometer; Emissivity; Temperature Measurement Accuracy; Calibration; Systematic Review*

PENDAHULUAN

Pengukuran suhu merupakan salah satu pengukuran fisika paling fundamental yang dilakukan secara luas dalam kehidupan sehari-hari, penelitian ilmiah, industri, dan layanan kesehatan. Suhu sebagai besaran termodinamika memiliki peran kritis dalam pengendalian proses industri, diagnosis medis, pemantauan lingkungan, serta pengembangan teknologi sensor modern. Instrumen utama dalam pengukuran suhu adalah termometer, yang telah berkembang dari bentuk paling sederhana berupa tabung cairan hingga perangkat digital canggih berbasis radiasi inframerah tanpa sentuhan (Zhao & Bergmann, 2023). Perkembangan ini mencerminkan meningkatnya tuntutan akan akurasi, kecepatan respons, dan kemudahan penggunaan dalam berbagai konteks pengukuran, termasuk sistem sensor berbasis *Internet of Things* (IoT) yang kini mendominasi arah pengembangan instrumentasi modern.

Seiring perkembangan teknologi, berbagai jenis termometer telah dikembangkan dengan prinsip kerja yang berbeda, antara lain termometer cairan, termometer bimetal, Resistance Temperature Detector (RTD), termokopel, termistor, dan termometer inframerah. Masing-masing jenis memiliki karakteristik unik dalam hal rentang pengukuran, kecepatan respons, dan tingkat akurasi yang sangat bergantung pada kondisi penggunaannya (Pan et al., 2025; Liu et al., 2024). Pemahaman yang mendalam tentang prinsip kerja masing-masing jenis termometer, serta faktor-faktor yang mengganggu akurasinya, menjadi prasyarat penting sebelum seorang perancang sistem dapat mengoptimalkan kualitas pengukurannya.

Di antara seluruh faktor interferensi yang dikenal, emisivitas (ϵ) permukaan objek ukur menempati posisi yang paling kritis namun sering diremehkan. Emisivitas didefinisikan sebagai rasio energi radiasi yang dipancarkan suatu permukaan terhadap energi yang dipancarkan benda hitam sempurna pada suhu yang sama, dengan nilai berkisar antara 0 (reflektor sempurna) hingga 1 (benda hitam sempurna). Kulit manusia, sebagai contoh, memiliki nilai emisivitas yang sangat tinggi ($\epsilon \approx 0,95\text{--}0,98$), menjadikannya objek yang relatif ideal untuk pengukuran inframerah. Sebaliknya, permukaan logam mengkilap seperti baja poles memiliki nilai emisivitas yang sangat rendah ($\epsilon \approx 0,05\text{--}0,20$), sehingga sebagian besar energi yang diterima detektor inframerah adalah pantulan radiasi lingkungan sekitar, bukan emisi asli dari objek. Fenomena ini dapat menghasilkan kesalahan pengukuran yang mencapai puluhan derajat Celsius (Pan et al., 2025).

Urgensi kajian ini semakin nyata ketika dihadapkan pada dua fakta lapangan yang sering diabaikan. Pertama, dalam konteks klinis, penyebaran masif termometer inframerah dahi selama pandemi COVID-19 ternyata menyimpan risiko tersembunyi: studi Ravi et al. (2022) membuktikan bahwa sensitivitas termometer nirkontak dahi dalam mendeteksi demam hanya

13%, yang berarti delapan dari sepuluh pasien demam berpotensi lolos dari *screening* tanpa terdeteksi. Kedua, dalam konteks industri, kegagalan kompensasi emisivitas pada sensor inframerah dapat menghasilkan kesalahan suhu hingga puluhan derajat Celsius, yang pada sistem kendali proses bersuhu tinggi dapat berujung pada kerusakan alat atau bahaya keselamatan (Pan et al., 2025).

Kajian terhadap literatur yang ada menunjukkan bahwa penelitian-penelitian terdahulu cenderung membahas aspek-aspek tersebut secara terfragmentasi. Belum ditemukan kajian yang secara sistematis memposisikan emisivitas sebagai variabel penghubung lintas kategori faktor interferensi dalam satu kerangka analisis terpadu. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menyusun kajian pustaka yang mengintegrasikan berbagai faktor interferensi pengukuran suhu dengan menempatkan emisivitas sebagai variabel penghubung utama. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah: (1) menganalisis prinsip kerja berbagai jenis termometer; (2) mengidentifikasi dan mengklasifikasikan faktor-faktor interferensi pengukuran suhu dengan penekanan pada peran lintas-teknologi emisivitas; dan (3) menyusun matriks rekomendasi pemilihan instrumen berbasis skenario operasional yang dapat diadopsi dalam perancangan sistem sensor IoT dan instrumentasi medis presisi tinggi.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan sistematis (*systematic literature review*) yang dilaksanakan mengacu pada protokol PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Penelusuran artikel dilakukan pada lima basis data internasional: PubMed, Scopus, Frontiers, MDPI, dan arXiv. Pemilihan pendekatan kajian pustaka didasarkan pada keterbatasan akses laboratorium serta tujuan penelitian yang bersifat analitis-deskriptif.

Penelusuran dilakukan menggunakan sintaks *Boolean search* sebagai berikut: ("thermometer" OR "temperature sensor" OR "infrared thermometer") AND ("working principle" OR "accuracy" OR "calibration" OR "emissivity" OR "measurement error") AND ("IoT" OR "medical" OR "industrial"). Selain itu, digunakan pula kombinasi terpisah: ("RTD" OR "thermocouple" OR "thermistor") AND ("drift" OR "interference factor" OR "precision"), serta ("infrared" OR "non-contact thermometer") AND ("emissivity" OR "ambient temperature" OR "humidity").

Kriteria inklusi ditetapkan sebagai berikut: (1) artikel dipublikasikan antara tahun 2021 hingga 2025; (2) diterbitkan dalam jurnal ilmiah internasional terindeks atau prosiding ilmiah bereputasi; (3) membahas prinsip kerja termometer atau faktor-faktor interferensi pengukuran suhu; dan (4) tersedia dalam versi full-text.

Proses seleksi artikel dilaksanakan secara bertahap sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1. Dari 60 artikel yang ditemukan pada tahap identifikasi awal, dilakukan eliminasi 9 artikel duplikasi, sehingga tersisa 51 artikel. Selanjutnya, 18 artikel dieksklusikan setelah pembacaan judul dan abstrak. Dari 33 artikel yang lolos, dilakukan pembacaan full-text dan 11 artikel kembali dieksklusikan. Dengan demikian, 22 artikel memenuhi seluruh kriteria inklusi.

Tabel 1. Proses Seleksi Artikel Berdasarkan Protokol PRISMA

Tahapan Seleksi	Jumlah Artikel
Identifikasi: artikel ditemukan dari penelusuran database (PubMed, Scopus, Frontiers, MDPI, arXiv)	60
Eliminasi duplikasi antar database	-9 (tersisa 51)
Eksklusi berdasarkan judul & abstrak (tidak relevan)	-18 (tersisa 33)
Eksklusi setelah baca full-text (di luar rentang tahun, tidak tersedia full-text, atau duplikasi konten)	-11 (tersisa 22)
Artikel final yang memenuhi kriteria inklusi	22

HASIL PENELITIAN

Prinsip Kerja Berbagai Jenis Termometer

Termometer bekerja berdasarkan prinsip bahwa perubahan suhu menyebabkan perubahan terukur pada sifat fisika suatu material. Berdasarkan sintesis literatur, terdapat empat prinsip fisika utama yang mendasari cara kerja berbagai jenis termometer. Prinsip radiasi inframerah adalah satu-satunya yang secara langsung dan fundamental bergantung pada nilai emisivitas (ϵ) permukaan objek ukur. Gambaran skematik keempat prinsip disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Diagram Skematik Prinsip Kerja Berbagai Jenis Termometer

No.	Jenis Termometer	Prinsip Fisika	Skema Proses	Contoh Alat
1	Termometer Cairan (Merkuri/Alkohol)	Pemuaian termal: kenaikan suhu $\rightarrow$ volume zat cair bertambah $\rightarrow$ cairan naik dalam kapiler $\rightarrow$ dibaca pada skala	Suhu $\uparrow \rightarrow$ Volume $\uparrow \rightarrow$ Kolom cairan $\uparrow \rightarrow$ Skala terbaca	Termometer klinis, termometer lab
2	RTD (Pt-100) & Termistor	Perubahan hambatan listrik: kenaikan suhu $\rightarrow$ Hambatan logam/semikonduktor berubah $\rightarrow$ dibaca jembatan Wheatstone	Suhu $\uparrow \rightarrow$ R berubah $\rightarrow \Delta V$ terdeteksi $\rightarrow$ Suhu terbaca	Sensor industri presisi, probe laboratorium
3	Termokopel	Efek Seebeck: dua logam berbeda disambung $\rightarrow$ perbedaan suhu antar sambungan	ΔT antar sambungan $\rightarrow$ EMF (mV) $\rightarrow$ Konversi ke suhu	Sensor tungku, turbin, mesin industri

		→ timbul beda potensial listrik (EMF)		
4	Termometer Inframerah (NCIT)	Radiasi Planck: semua objek memancarkan energi IR sebanding suhu → detektor menangkap fluks IR → dikonversi ke suhu. Emisivitas (ϵ) permukaan objek Menentukan efisiensi emisi radiasi ini	Objek → Emisi IR (fungsi ϵ) → Detektor → Sinyal listrik → Suhu terbaca	Termometer dahi/telinga, termometer industri tanpa kontak

Termometer cairan bekerja berdasarkan pemuaian termal zat cair. Merkuri memiliki keunggulan berupa koefisien pemuaian yang hampir linier di rentang -39°C hingga 357°C . Termometer cairan bersifat kontak langsung, sehingga emisivitas permukaan tidak relevan sebagai faktor interferensi pengukuran. Namun dalam konteks klinis, termometer merkuri semakin ditinggalkan karena risiko toksisitasnya (Dolibog et al., 2022; Wang et al., 2022).

RTD berbasis platinum (Pt-100) memiliki karakteristik hambatan-suhu yang sangat linier dan stabil, menjadikannya standar internasional untuk pengukuran presisi tinggi. Akurasi yang sangat tinggi dapat dicapai melalui metode *oversampling* berbasis Central Limit Theorem dalam sistem pengukuran terintegrasi (Belo et al., 2023). Li et al. (2024) berhasil mengembangkan metode koreksi linear dan nonlinear untuk memitigasi error *self-heating* pada RTD platinum. Berbeda fundamental dengan termometer inframerah, RTD dikalibrasi melalui metode imersi dalam medium bersuhu stabil, sehingga emisivitas tidak memiliki peran dalam prosedur kalibrasi RTD.

Termokopel memanfaatkan efek Seebeck, yaitu timbulnya beda potensial listrik ketika dua logam berbeda disambungkan pada dua titik dengan perbedaan suhu. Majdi et al. (2024) melaporkan pengembangan alat ukur berbasis termokopel tipe-K dengan galat rata-rata hanya 0,348%. Namun termokopel rentan terhadap *drift* dan inhomogenitas termoelektrik akibat perubahan kondisi kawat sensor pada suhu tinggi, yang dapat menyebabkan akumulasi galat hingga puluhan derajat (Li & Chen, 2024).

Termometer inframerah bekerja berdasarkan Hukum Planck, di mana energi radiasi yang dipancarkan objek sebanding dengan pangkat empat suhu absolutnya. Persamaan Stefan-Boltzmann yang diterapkan adalah $W = \epsilon\sigma T^4$, di mana ϵ adalah emisivitas permukaan dan σ adalah konstanta Stefan-Boltzmann. Tanpa nilai ϵ yang tepat, tidak mungkin mengonversi fluks radiasi yang diterima detektor menjadi nilai suhu yang akurat. Popularitas termometer inframerah non-kontak terus meningkat seiring kemampuannya mengukur suhu tanpa kontak fisik (Zhao & Bergmann, 2023).

Peran Kritis Emisivitas sebagai Faktor Interferensi Lintas Teknologi

Emisivitas bukan hanya sekadar parameter teknis termometer inframerah; ia adalah variabel penghubung yang muncul di semua lapisan faktor interferensi: dari karakteristik objek ukur, melalui kondisi lingkungan, hingga prosedur kalibrasi instrumen. Pan et al. (2025) secara

komprehensif menjelaskan bahwa objek dengan permukaan mengkilap (ϵ rendah) akan memantulkan radiasi lingkungan ke detektor, sehingga pembacaan mencampurkan suhu objek dengan suhu lingkungan yang dipantulkan, suatu kesalahan yang tidak dapat dikoreksi tanpa pengetahuan nilai ϵ yang tepat.

Tabel 3 menyajikan nilai emisivitas representatif berbagai material dan implikasinya terhadap akurasi termometer inframerah, sebagai referensi praktis dalam pemilihan dan pengoperasian instrumen.

Tabel 3. Nilai Emisivitas Representatif Berbagai Material dan Implikasi Terhadap Akurasi Termometer IR

Material/Permukaan	Nilai ϵ	Kategori	Implikasi Akurasi Termometer IR
Kulit manusia	0,95–0,98	Tinggi	Error minimal; pengaturan ϵ standar di termometer klinis sudah memadai
Kayu / Cat matte	0,85–0,95	Tinggi	Error kecil; termometer IR dapat digunakan langsung dengan akurasi baik
Beton / Aspal	0,90–0,95	Tinggi	Stabil; cocok untuk pemantauan suhu jalan dan infrastruktur
Aluminium teroksidasi	0,20–0,70	Menengah	Error signifikan jika ϵ tidak dikalibrasi; koreksi manual diperlukan
Baja mengkilap	0,05–0,20	Sangat Rendah	Error besar (dapat mencapai puluhan °C); refleksi lingkungan mendominasi pembacaan
Tembaga poles	0,01–0,05	Sangat Rendah	Termometer IR tidak direkomendasikan tanpa sistem koreksi emisivitas khusus

Faktor-Faktor Interferensi Pengukuran Suhu

a. Faktor Lingkungan

Suhu ambien merupakan faktor lingkungan paling signifikan. Radiasi pantulan dan radiasi atmosfer yang diterima detektor sangat dipengaruhi oleh fluktuasi suhu lingkungan; kompensasi berbasis model polinomial orde tinggi terbukti mampu meningkatkan akurasi di rentang -40°C hingga 60°C (Pan et al., 2025). Kaitan dengan emisivitas sangat erat: permukaan dengan ϵ rendah lebih rentan terhadap variasi suhu ambien karena proporsi energi yang diterima detektor dari pantulan lingkungan lebih besar dibandingkan emisi asli objek.

Radiasi matahari adalah faktor yang sering diabaikan namun berdampak besar. Teichmann et al. (2024) membuktikan bahwa sensor suhu tanpa pelindung radiasi berventilasi di luar ruangan dapat menghasilkan pembacaan hingga $2,8^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi dari suhu udara aktual pada hari cerah berangin rendah. Kelembapan udara turut memengaruhi akurasi inframerah karena uap air menyerap sebagian radiasi sebelum mencapai detektor.

Mazdeyasna et al. (2023) menunjukkan bahwa pada rentang kelembapan relatif 15–80%, termometer inframerah tanpa referensi eksternal dapat menghasilkan kesalahan absolut hingga 0,97°C.

b. Faktor Instrumental

Kalibrasi merupakan faktor instrumental paling fundamental. Tanpa prosedur operasional standar yang ketat, seluruh perangkat inframerah yang diuji terbukti menghasilkan korelasi buruk ($ICC < 0,8$) terhadap suhu inti tubuh (Holder et al., 2023). Alper (2023) memperdalam temuan ini dengan menunjukkan bahwa ketepatan nilai emisivitas alat kalibrasi, bukan hanya prosedurnya, merupakan penentu utama ketidakpastian hasil. Yang et al. (2024) mengkonfirmasi bahwa degradasi emisivitas permukaan kalibrator akibat kontaminasi merupakan sumber ketidakpastian kalibrasi yang substansial.

Drift sensor menjadi isu kritis jangka panjang. Frank (2023) melaporkan bahwa termometer cairan kaca menunjukkan *Joule-drift* sekitar 0,7°C per abad. Pada termometer kontak berbasis termokopel, Li & Chen (2024) membuktikan bahwa ketidakhomogenan termoelektrik yang terakumulasi selama pemakaian jangka panjang merupakan sumber *drift* yang paling berbahaya dan dapat mencapai puluhan derajat pada suhu pengukuran tinggi.

c. Faktor Teknis Penggunaan

Jarak pengukuran adalah faktor teknis paling kritis untuk termometer inframerah. Holder et al. (2023) membuktikan bahwa pengukuran pada jarak 3 cm dari dahi menghasilkan bias hanya 0,19°C, sementara pengukuran dari titik hidung menghasilkan bias hingga 1,40°C. Semakin jauh jarak pengukuran, semakin besar area permukaan yang diukur (*spot size*), dan semakin heterogen distribusi ε pada area tersebut. Data dari Ravi et al. (2022) mengungkapkan bahwa sensitivitas termometer nirkontak dahi dalam mendeteksi demam $>38^\circ\text{C}$ hanya mencapai 13%, jauh di bawah *temporal artery thermometer* yang mencapai 88%.

d. Faktor Karakteristik Objek Ukur: Emisivitas sebagai Variabel Dominan

Di antara seluruh faktor karakteristik objek, emisivitas permukaan (ε) adalah variabel yang paling dominan dan paling sering diremehkan. Pan et al. (2025) menjelaskan bahwa objek dengan permukaan mengkilap (*low emissivity*) akan memantulkan radiasi lingkungan ke detektor, sehingga pembacaan termometer mencampurkan suhu objek dengan suhu lingkungan yang dipantulkan. Secara kuantitatif, jika suhu lingkungan T_{amb} dan suhu objek T_{obj} , maka suhu yang terbaca detektor tanpa koreksi ε dapat diformulasikan sebagai: $T_{\text{measured}} \approx [\varepsilon \cdot T_{\text{obj}}^4 + (1-\varepsilon) \cdot T_{\text{amb}}^4]^{(1/4)}$. Pada objek dengan $\varepsilon = 0,1$ (logam mengkilap), sebesar 90% sinyal yang diterima detektor berasal dari pantulan lingkungan, bukan dari objek itu sendiri.

Sintesis Komparatif: Profil Kinerja dan Kerentanan Emisivitas

Berdasarkan sintesis seluruh literatur yang dikaji, profil akurasi dan karakteristik operasional masing-masing jenis termometer disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Prinsip Kerja, Akurasi, dan Kerentanan terhadap Emisivitas

Jenis	Prinsip	Rentang	Akurasi	Kerentanan Utama & Emisivitas	Sumber
Merkuri/Alkohol	Pemuaian termal	-39°C s/d 357°C	$\pm 0,1-0,5^{\circ}\text{C}$	Toksik, lambat. Emisivitas: tidak relevan (kontak langsung).	Dolibog et al. (2022)
RTD (Pt-100)	Hambatan listrik	-200°C s/d 850°C	$\pm 0,1-0,15^{\circ}\text{C}$	Mahal, rapuh. Emisivitas: tidak relevan (kontak langsung).	Belo et al. (2023)
Termokopel	Efek Seebeck	-270°C s/d 1372°C	$\pm 1-4^{\circ}\text{C}$	Drift metalurgi. Emisivitas: tidak langsung berpengaruh, kecuali di lingkungan oksidatif ekstrem.	Sánchez de la Rosa & Paniagua (2025)
Termistor (NTC)	Hambatan listrik	-50°C s/d 150°C	$\pm 0,1-0,2^{\circ}\text{C}$	Rentang sempit, nonlinier. Emisivitas: tidak relevan (sensor kontak).	Liu et al. (2024)
Inframerah (NCIT)	Radiasi Planck	-70°C s/d 380°C	$\pm 0,2-1,4^{\circ}\text{C}$	Emisivitas (ϵ) adalah faktor interferensi PALING KRITIS: permukaan ϵ rendah memantulkan radiasi lingkungan, error hingga beberapa derajat Celsius.	Zhao & Bergmann (2023)
IR Fleksibel (Wearable)	Resistansi/termal	0°C s/d 100°C	$\pm 0,1-0,3^{\circ}\text{C}$	Drift akibat tekukan berulang. Emisivitas: perubahan kontak kulit memengaruhi akurasi.	Liu et al. (2024)

Kerangka Pemilihan Termometer Berbasis Emisivitas dan Skenario Operasional

Berdasarkan sintesis faktor-faktor interferensi dengan penekanan pada peran sentral emisivitas, kajian ini menyusun matriks rekomendasi pemilihan termometer berbasis skenario operasional (Tabel 5) dan mengusulkan kerangka kompensasi emisivitas dua tahap untuk sistem sensor IoT.

Tabel 5. Matriks Rekomendasi Pemilihan Termometer dengan Pertimbangan Emisivitas

Jenis Termometer	Kebutuhan Kontak	Rentang Suhu & Lingkungan	Syarat Akurasi	Skenario & Pertimbangan Emisivitas
Termokopel	Kontak	Suhu Ekstrem ($>600^{\circ}\text{C}$) / Industri berat	Rendah–Menengah	Tungku industri, mesin turbin. Emisivitas kawat perlu dimonitor di lingkungan oksidatif ekstrem.
RTD (Pt-100)	Kontak	Suhu Normal–Tinggi / Indoor (Lab)	Sangat Tinggi	Instrumentasi medis presisi tinggi & kalibrasi laboratorium. Emisivitas tidak relevan; perhatian utama: self-heating dan drift jangka panjang.
Termistor (NTC)	Kontak	Suhu Normal / Indoor maupun Outdoor terlindung	Menengah–Tinggi	Perangkat smart home & sistem pemantauan lingkungan IoT. Emisivitas tidak relevan; perhatian utama: nonlinieritas.

Inframerah (NCIT)	Tanpa Kontak	Suhu Normal–Menengah / Area minim hambatan radiasi	Menengah	<i>Screening</i> medis, objek bergerak, area berbahaya. WAJIB mempertimbangkan emisivitas (ϵ) objek target: setel nilai ϵ alat sesuai material permukaan; hindari permukaan mengkilap ($\epsilon < 0,5$) tanpa koreksi khusus.
Sensor Fleksibel	Kontak	Suhu Tubuh / Pemakaian dinamis (Wearable)	Tinggi	Pemantauan suhu pasien kontinu berbasis IoT medis. Emisivitas kulit ($\epsilon \approx 0,98$) umumnya stabil, tetapi keringat dapat memengaruhi kualitas kontak.

Sebagai panduan praktis tambahan untuk pengembang sistem IoT berbasis termometer inframerah, kajian ini mengusulkan kerangka kompensasi emisivitas dua tahap: (1) Karakterisasi ϵ : identifikasi material permukaan target dan tetapkan nilai ϵ dari tabel referensi atau ukur langsung menggunakan metode *differential emissivity*; (2) Kompensasi algoritmik: implementasikan koreksi menggunakan persamaan $T_{obj} = [(T_{measured}^4 - (1 - \epsilon) \cdot T_{amb}^4) / \epsilon]^{(1/4)}$ pada *firmware* sensor. Mazdeyasna et al. (2023) membuktikan bahwa penggunaan *temperature reference source* mampu menekan error pengukuran inframerah dari 0,97°C menjadi di bawah 0,12°C, yang menunjukkan peningkatan akurasi sebesar 88%.

PEMBAHASAN

Hasil kajian ini memperkuat argumentasi bahwa emisivitas (ϵ) bukan sekadar parameter teknis termometer inframerah, melainkan variabel lintas-kategori yang meresap ke dalam seluruh lapisan faktor interferensi pengukuran suhu. Repositioning konseptual ini membuka cara pandang baru dalam perancangan sistem sensor suhu cerdas yang selama ini cenderung mengabaikan dinamika emisivitas sebagai variabel aktif.

Zhao & Bergmann (2023) menyimpulkan bahwa termometer inframerah timpani memiliki sensitivitas tertinggi di antara termometer periferik untuk konteks klinis. Namun Dolibog et al. (2022) menunjukkan bahwa metode kontak aksila tetap menghasilkan korelasi lebih baik dengan suhu inti tubuh. Temuan yang tampaknya bertentangan ini sebenarnya dapat direkonsiliasi: akurasi mutlak (mendekati suhu inti) dan sensitivitas deteksi (mendeteksi perubahan suhu) adalah dua dimensi berbeda. Kontribusi emisivitas kulit pada berbagai lokasi pengukuran (dari $\epsilon \approx 0,97$ vs. ketiak yang tidak relevan untuk termometer kontak) menentukan dimensi mana yang lebih unggul.

Tabel 4 mengungkapkan pola yang konsisten bahwa terdapat trade-off fundamental antara akurasi dan kemudahan penggunaan. RTD menawarkan akurasi tertinggi namun paling rentan terhadap kerusakan fisik dan memerlukan biaya tertinggi. Termokopel memberikan fleksibilitas rentang suhu terluas namun dengan akurasi terendah dan kebutuhan kalibrasi paling sering. Kerentanan terhadap emisivitas membentuk spektrum kontinum: dari termometer kontak yang tidak terpengaruh secara langsung, hingga termometer inframerah yang sepenuhnya bergantung pada akurasi nilai ϵ yang digunakan.

Yang et al. (2024) mengkonfirmasi bahwa degradasi emisivitas permukaan kalibrator akibat kontaminasi atau paparan suhu ekstrem merupakan sumber ketidakpastian kalibrasi yang substansial dan sering diabaikan. Temuan ini membuktikan bahwa emisivitas adalah variabel dinamis, bukan konstanta material yang statis. Oleh karena itu, aspek tersebut harus diintegrasikan dalam setiap prosedur *Quality Assurance* sistem sensor suhu berbasis

inframerah.

SIMPULAN

Kajian ini menegaskan satu argumen inti yang memiliki implikasi luas: emisivitas (ϵ) bukan sekadar parameter teknis termometer inframerah, melainkan variabel lintas-kategori yang meresap ke dalam seluruh lapisan faktor interferensi pengukuran suhu, mulai dari lingkungan, instrumen, teknis penggunaan, hingga karakteristik objek ukur.

Dari sisi praktis, matriks rekomendasi dan kerangka kompensasi emisivitas dua tahap yang dihasilkan dapat langsung diadopsi oleh praktisi: pilih RTD Pt-100 untuk kebutuhan akurasi di bawah $\pm 0,2^\circ\text{C}$; gunakan termometer inframerah hanya setelah karakterisasi nilai ϵ objek target dilakukan; dan waspadai penurunan kualitas kontak kulit pada sensor *wearable* IoT. Secara khusus, temuan bahwa sensitivitas termometer nirkontak dahi dalam mendeteksi demam hanya 13%, dibandingkan temporal artery thermometer yang mencapai 88%, merupakan implikasi praktis kritis yang harus menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan instrumen pada konteks *screening* medis massal.

Sebagai catatan batasan penelitian, kajian ini sepenuhnya berbasis tinjauan literatur tanpa validasi eksperimental langsung. Studi lanjutan yang melakukan uji lapangan kerangka kompensasi emisivitas dua tahap, khususnya pada skenario *screening* medis dan industri makanan beku, sangat direkomendasikan untuk memperkuat validitas praktis dari temuan kajian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Habibi Azka Nasution dan Winsyahputra Ritonga selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan bimbingan dalam penyusunan artikel ilmiah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Pendidikan Fisika Bilingual, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan atas dukungan akademis yang diberikan selama proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Alper, F. M. P. (2024). Calibration Method of Clinical Type Infrared Thermometers and Estimation Uncertainty in Different Blackbody Cavities. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 27(5), 3–10. <https://doi.org/10.1109/MIM.2024.10622085>
- Belo, F. A., Soares, M. B., Lima Filho, A. C., Lima, T. L. de V., & Adissi, M. O. (2023). Accuracy and Precision Improvement of Temperature Measurement Using Statistical Analysis/Central Limit Theorem. *Sensors*, 23(6), 3210. <https://doi.org/10.3390/s23063210>
- Cui, S., & Xing, J. (2022). Research on Calibration Method of Infrared Temperature Measurement System Near Room Temperature Field. *Frontiers in Physics*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.786443>
- Dolibog, P., Pietrzyk, B., Kierszniok, K., & Pawlicki, K. (2022). Comparative Analysis of Human Body Temperatures Measured with Noncontact and Contact Thermometers. *Healthcare*, 10(2), 331. <https://doi.org/10.3390/healthcare10020331>
- Frank, P. (2023). LiG Metrology, Correlated Error, and the Integrity of the Global Surface Air-Temperature Record. *Sensors*, 23(13), 5976. <https://doi.org/10.3390/s23135976>

- Holder, T., Hooper, F. S. W., Yates, D., Tse, Z., Patil, S., Moussa, A., Batten, L., Radhakrishnan, V., Allison, M., Hewitt, C., Keding, A., Forshaw, G., & Jayagopal, V. (2023). Clinical accuracy of infrared temperature measurement devices: a comparison against non-invasive core-body temperature. *Clinical Medicine*, 23(2), 157–163. <https://doi.org/10.7861/clinmed.2022-0252>
- Juan, Y., Yuan, Z., Chen, Z., Chen, J., Bian, L., Zhang, J., & Liu, Y. (2025). Digitalization technology based research on intelligent temperature sensing device for transformers. *Scientific Reports*, 15(1), 14975. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-99082-w>
- Li, J., Pei, H., Kochan, O., Wang, C., Kochan, R., & Ivanyshyn, A. (2024). Method for Correcting Error Due to Self-Heating of Resistance Temperature Detectors Suitable for Metrology in Industry 4.0. *Sensors*, 24(24), 7991. <https://doi.org/10.3390/s24247991>
- Li, Z., & Chen, J. (2024). Simulating Error Due to Acquired Thermoelectric Inhomogeneity. *Sensors*, 24(16), 5256. <https://doi.org/10.3390/s24165256>
- Liu, J., Wang, Y., Li, X., Wang, J., & Zhao, Y. (2023). Graphene-Based Wearable Temperature Sensors: A Review. *Nanomaterials*, 13(16), 2339. <https://doi.org/10.3390/nano13162339>
- Liu, L., Dou, Y., Wang, J., Zhao, Y., Kong, W., Ma, C., He, D., Wang, H., Zhang, H., Chang, A., & Zhao, P. (2024). Recent Advances in Flexible Temperature Sensors: Materials, Mechanism, Fabrication, and Applications. *Advanced Science*, 11(36). <https://doi.org/10.1002/advs.202405003>
- Lundström, H., & Mattsson, M. (2021). Modified Thermocouple Sensor and External Reference Junction Enhance Accuracy in Indoor Air Temperature Measurements. *Sensors*, 21(19), 6577. <https://doi.org/10.3390/s21196577>
- Majdi, L. M., Kumendong, I., Huwaidah, I., & Aziz, M. F. A. (2024). Pemanfaatan Termokopel sebagai Sensor Suhu untuk Analisis Kelarutan Zat Terlarut. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, 5(2), 85–92. <https://doi.org/10.53682/fista.v5i2.406>
- Manop, D., Wangtong, S., Na Ayuthaya, W. P., Noulkhow, N., & Khaenamkaew, P. (2025). Innovative low-temperature calibration system for infrared thermometers in frozen food industry: effects of measurement distance and temperature uniformity. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1668949>
- Mazdeyasna, S., Ghassemi, P., & Wang, Q. (2023). Best Practices for Body Temperature Measurement with Infrared Thermography: External Factors Affecting Accuracy. *Sensors*, 23(18), 8011. <https://doi.org/10.3390/s23188011>
- Pan, D., Mo, T., Jiang, Z., Duan, Y., Li, Z., Maldague, X., & Gui, W. (2025). Interference Factors and Compensation Methods When Using Infrared Thermography for Temperature Measurement: A Review. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 74, 1–24. <https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3597695>
- Ravi, N., Vithyananthan, M., & Saidu, A. (2022). Are all thermometers equal? A study of three infrared thermometers to detect fever in an African outpatient clinic. *PeerJ*, 10, e13283. <https://doi.org/10.7717/peerj.13283>
- Sánchez de la Rosa, D., & Paniagua, G. (2025). Enhancing Total Temperature Measurement Accuracy: Calibration Procedures and Novel Two-Wire Probes. *Journal of Turbomachinery*, 147(5). <https://doi.org/10.1115/1.4066964>

- Teichmann, F., Pichlhöfer, A., Sulejmanovski, A., & Korjenic, A. (2024). Measurement Errors When Measuring Temperature in the Sun. *Sensors*, 24(5), 1564. <https://doi.org/10.3390/s24051564>
- Wang, Q., Zhou, Y., Ghassemi, P., McBride, D., Casamento, J. P., & Pfefer, T. J. (2022). Infrared Thermography for Measuring Elevated Body Temperature: Clinical Accuracy, Calibration, and Evaluation. *Sensors*, 22(1), 215. <https://doi.org/10.3390/s22010215>
- Yang, W., Cao, C., Huang, P., Bai, J., Zhao, B., Zhu, S., Jin, H., Jin, K., He, X., Li, C., Wang, J., Liu, S., & Qi, H. (2024). Temperature-Automated Calibration Methods for a Large-Area Blackbody Radiation Source. *Sensors*, 24(5), 1707. <https://doi.org/10.3390/s24051707>
- Zhao, Y., & Bergmann, J. H. M. (2023). Non-Contact Infrared Thermometers and Thermal Scanners for Human Body Temperature Monitoring: A Systematic Review. *Sensors*, 23(17), 7439. <https://doi.org/10.3390/s23177439>