

Analisis Kemampuan Retensi Panas Pada Berbagai Merek Tumbler (Botol Insulasi) Berdasarkan Hukum Pendinginan Newton

Raditya bayu herlambang^{1*}, Muhamad Safi'i², dan Althesa Androva³

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang; email : herlambang8788@gmail.com

² Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang; email : muhamadsafii@upgris.ac.id

³ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang; email : althesaandrova@upgris.ac.id

*** Penulis : Raditya bayu herlambang**

Abstract: Tumblers or insulated bottles are everyday consumer products designed to maintain beverage temperature over a period of time. This study aims to analyze the heat retention capability of five commercial tumbler brands Zojirushi SX-CC45, Hydro Flask 32oz, Stanley Classic, Thermos Stainless, and Generic Brand A using a quantitative approach based on Newton's Law of Cooling. Hot water at an initial temperature of 90°C was poured into each tumbler, and temperature was measured every 10 minutes for 120 minutes at an ambient temperature of 28°C. The total heat decay coefficient (k) was obtained through nonlinear regression to the exponential model $T_t = T_{amb} + (T_o - T_{amb})e^{-kt}$. Results indicate k values ranging from 0.0021 min⁻¹ (Zojirushi, best) to 0.0127 min⁻¹ (Generic Brand A, worst), with heat retention efficiency at 120 minutes of 85.3% and 20.8%, respectively. R² values for all fitting curves exceed 0.99, confirming the validity of Newton's model in a closed system. This study provides a quantitative reference for consumers in selecting quality tumblers and a scientific basis for manufacturers to improve product insulation design.

Keywords: Newton's Law of Cooling; Heat Decay Coefficient; Tumbler; Heat Retention; Insulated Bottle

Abstrak: Tumbler atau botol insulasi merupakan produk konsumsi sehari-hari yang dirancang untuk mempertahankan suhu minuman dalam jangka waktu tertentu. Penelitian ini bertujuan menganalisis kemampuan retensi panas lima merek tumbler komersial Zojirushi SX-CC45, Hydro Flask 32oz, Stanley Classic, Thermos Stainless, dan Generic Brand A menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis Hukum Pendinginan Newton. Air panas bersuhu awal 90°C dituangkan ke dalam setiap tumbler dan suhu diukur setiap 10 menit selama 120 menit pada suhu lingkungan 28°C. Koefisien peluruhan panas total (k) diperoleh melalui regresi nonlinier terhadap model eksponensial $T_t = T_{amb} + (T_o - T_{amb})e^{-kt}$. Hasil penelitian menunjukkan nilai k berkisar antara 0,0021 mnt⁻¹ (Zojirushi, terbaik) hingga 0,0127 mnt⁻¹ (Generic Brand A, terburuk), dengan efisiensi retensi panas pada menit ke-120 masing-masing sebesar 85,3% dan 20,8%. Nilai R² seluruh kurva fitting melebihi 0,99, mengkonfirmasi validitas model Newton pada sistem tertutup. Penelitian ini memberikan acuan kuantitatif bagi konsumen dalam memilih tumbler berkualitas serta landasan ilmiah bagi produsen untuk meningkatkan desain insulasi produknya

Kata kunci: Hukum Pendinginan Newton; Koefisien Peluruhan Panas; Tumbler; Retensi Panas; Botol Insulasi

1. Pendahuluan

Perkembangan gaya hidup masyarakat modern yang dinamis dan mobilitas yang tinggi meningkatkan kebutuhan akan wadah minuman portabel yang mampu menjaga stabilitas suhu dalam waktu lama, seperti tumbler atau botol insulasi. Di pasar domestik Indonesia,

Diterima: May 18, 2026
Direvisi: May 26, 2026
Diterima: May 29, 2026
Diterbitkan: July 14, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

produk ini beredar luas dengan variasi harga, material, dan klaim teknologi insulasi yang sangat kontras mulai dari merek premium internasional hingga produk generik yang ekonomis. Secara termodinamika, efisiensi sebuah botol insulasi ditentukan oleh kemampuannya dalam meminimalkan tiga mekanisme perpindahan panas: konduksi, konveksi, dan radiasi. Sebagian besar produsen menggunakan struktur dinding ganda (*double-wall*) untuk memutus jalur konduksi-konveksi serta lapisan cermin internal untuk mereduksi emisi radiasi inframerah. Sayangnya, rujukan pemilihan produk yang beredar di masyarakat saat ini masih didominasi oleh ulasan subjektif konsumen (*user review*) di media sosial yang tidak terstandarisasi secara ilmiah. Oleh karena itu, diperlukan sebuah pendekatan kuantitatif yang objektif untuk menguji performa termal ini, salah satunya melalui penerapan Hukum Pendinginan Newton yang memodelkan laju penurunan suhu sebagai fungsi eksponensial terhadap waktu dan suhu lingkungan.

Beberapa peneliti terdahulu telah berupaya memodelkan karakteristik penurunan suhu pada media penyimpanan cairan menggunakan pendekatan fisis. Rodrigues et al. (2016) menggunakan model eksponensial Newton untuk membandingkan karakteristik pendinginan pada berbagai wadah material, dan menemukan bahwa model tersebut memiliki akurasi fitting yang sangat tinggi ($R^2 > 0,99$). Dalam perkembangannya, Patel dan Shah (2019) menyatakan bahwa nilai waktu setengah penurunan termal ($t_{1/2}$) merupakan indikator tunggal yang sangat efektif dan mudah dipahami dalam mengomparasi efektivitas material insulasi. Dalam konteks produk konsumen di pasar domestik, Nugraha dan Pratiwi (2020) mengonfirmasi adanya perbedaan laju pendinginan yang signifikan antara produk tumbler bermerek internasional dan produk lokal, meskipun studi tersebut belum menguji koefisien peluruhan secara matematis.

Hukum Pendinginan Newton (Newton, 1701, dalam Holman, 2010 [11]) menyatakan bahwa laju pendinginan suatu benda proporsional terhadap perbedaan suhu antara benda dan lingkungannya. Prinsip ini diformulasikan sebagai persamaan diferensial orde pertama:

$$dT/dt = -k(T - T_{amb}) \quad (1)$$

dengan solusi analitik:

$$T_t = T_{amb} + (T_o - T_{amb})e^{-kt} \quad (2)$$

Incropera et al. (2017) dalam buku teks standar perpindahan panas menjelaskan bahwa koefisien k pada wadah insulasi merupakan fungsi dari konduktivitas termal material, luas permukaan, dan mekanisme konveksi di permukaan luar. Teknologi vacuum insulation panel (VIP) yang digunakan pada tumbler premium mampu mereduksi k hingga sepuluh kali lipat dibandingkan wadah polipropiena biasa.

Rodrigues et al. (2016) melakukan eksperimen pendinginan teh panas dalam dua jenis wadah (keramik dan stainless steel) dan menemukan bahwa model eksponensial *Newton fit* dengan $R^2 > 0,99$. Mereka menyimpulkan bahwa konduktivitas termal dinding merupakan penentu dominan nilai k pada wadah tanpa insulasi vakum.

Patel & Shah (2019) mengukur performa insulasi termal tangki air industri dan menemukan korelasi kuat antara ketebalan lapisan insulasi dengan waktu setengah-penurunan suhu ($t_{1/2}$). Studi ini mengkonfirmasi bahwa $t_{1/2} = \ln(2)/k$ merupakan indikator tunggal yang efektif untuk membandingkan performa insulasi.

Nugraha & Pratiwi (2020) meneliti performa botol minum plastik vacuum-insulated di kalangan mahasiswa Indonesia dan menemukan bahwa produk bermerek internasional secara konsisten menunjukkan k lebih rendah dibandingkan produk lokal, meski tanpa analisis korelasi statistik yang memadai.

Zhang et al. (2021) mengembangkan model termal tiga-komponen untuk wadah minuman yang memperhitungkan kehilangan panas melalui tutup, dinding, dan bagian bawah secara terpisah. Mereka menemukan bahwa kehilangan panas melalui tutup berkontribusi 30-45% dari total perpindahan panas pada tumbler standar.

Haryanto & Dewi (2021) melakukan studi deskriptif tentang persepsi konsumen terhadap kualitas tumbler di Jawa Tengah. Meski tanpa pengukuran suhu, studi ini

menemukan bahwa konsumen mengasosiasikan merek premium dengan durasi penyimpanan panas lebih dari empat jam.

Kumar et al. (2022) menggunakan metode finite element analysis (FEA) untuk mensimulasikan distribusi suhu pada dinding tumbler double-wall dan menemukan bahwa gap udara optimal untuk meminimalkan konduksi konvektif adalah 2-3 mm dengan tekanan vakum di bawah 0,01 Pa.

Santoso & Wijaya (2022) membandingkan performa termal tiga jenis bahan tumbler (stainless steel, titanium, dan aluminium) dan menemukan bahwa tumbler titanium menunjukkan nilai k 12% lebih rendah dibandingkan stainless steel akibat konduktivitas termal titanium yang lebih rendah.

Lee & Park (2023) mengintegrasikan sensor IoT pada tumbler untuk pemantauan suhu real-time dan mengembangkan algoritma prediksi suhu berbasis model Newton. Akurasi prediksi mencapai $\pm 1,2^{\circ}\text{C}$ dengan interval kepercayaan 95%, mengkonfirmasi keandalan model Newton untuk aplikasi prediktif.

Rahmawati et al. (2023) melakukan meta-analisis terhadap 24 studi performa insulasi wadah minuman dan menemukan bahwa nilai k produk premium berkisar 0,001 - 0,003 mnt^{-1} , sedangkan produk non-insulasi berkisar 0,008 - 0,025 mnt^{-1} . Studi ini menjadi referensi penting untuk kalibrasi rentang nilai k dalam penelitian kami.

Faktor kebocoran termal spesifik pada komponen botol juga menjadi perhatian; Zhang et al. (2021) menemukan bahwa komponen tutup dan celah penutup (*seal*) menyumbang sekitar 30% hingga 45% dari total kehilangan panas akibat konveksi udara. Dari aspek optimasi struktur fisik, Kumar et al. (2022) menyimpulkan melalui simulasi analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis* / FEA) bahwa jarak rongga (*gap*) udara optimal pada struktur dinding ganda adalah sebesar 2–3 mm untuk meminimalkan konveksi internal. Terakhir, validasi eksperimental berbasis sensor oleh Lee dan Park (2023) menggunakan modul IoT membuktikan bahwa deviasi antara prediksi model matematika Newton dengan pembacaan real-time di lapangan hanya berkisar antara $1,2^{\circ}\text{C}$. Meskipun studi-studi di atas telah meletakkan dasar teoritis yang kuat mengenai isolasi termal, gap penelitian yang mendasar saat ini adalah belum adanya studi komparatif berskala laboratorium di Indonesia yang secara simultan mengkuantifikasi nilai koefisien peluruhan panas Newton (k) terhadap berbagai variasi merek populer yang ada di pasar dalam satu metrik penilaian yang integratif.

Untuk mengisi celah ilmiah tersebut, kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada perumusan sebuah metrik evaluasi baru bernama Indeks Efisiensi Retensi Panas (IERP), yang mengintegrasikan nilai koefisien peluruhan (k), waktu paruh termal ($t_{1/2}$) dan efisiensi sisa suhu pada jam-jam krusial ke dalam satu nilai indeks performa tunggal, serta menyediakan basis data nilai (k) empiris pertama untuk lima merek tumbler yang paling sering digunakan di Indonesia. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengukur dan memetakan nilai koefisien peluruhan panas (k) dari lima merek tumbler komersial di bawah protokol eksperimen laboratorium yang terstandarisasi, (2) mengevaluasi efisiensi retensi panas pada titik waktu krusial (menit ke-60 dan menit ke-120), serta (3) menguji kelayakan dan akurasi model Hukum Pendinginan Newton dalam memprediksi fenomena peluruhan termal botol insulasi. Manfaat praktis dari penelitian ini adalah memberikan panduan belanja berbasis data ilmiah bagi konsumen agar tidak terjebak pada klaim pemasaran semata, sedangkan manfaat akademisnya adalah memperkuat literatur aplikasi termodinamika terapan dan metode regresi non-linier dalam evaluasi kualitas produk manufaktur sehari-hari.

Kelebihan dari penelitian ini adalah tingkat akurasi dan validitas data yang tinggi karena pengujian dilakukan melalui metode replikasi tiga kali (*triple-replication*) untuk setiap sampel, serta dikerjakan di dalam ruang laboratorium dengan suhu lingkungan (T_{amb}) yang dikontrol secara ketat menggunakan sensor digital. Namun demikian, kekurangan penelitian ini adalah pengujian baru dilakukan menggunakan volume fluida tunggal (400 mL) pada kondisi statis (diam di tempat), sehingga belum merepresentasikan dinamika guncangan cairan dan variasi volume yang biasanya terjadi ketika tumbler dibawa berjalan oleh pengguna dalam kehidupan sehari-hari. Pada bagian akhir, hasil kuantifikasi parameter termal dari penelitian ini diimplementasikan ke dalam bentuk matriks rasio performa-harga (*cost-performance ratio*). Matriks ini menghubungkan nilai ekonomi produk (harga beli di pasar) dengan kualitas retensi termal riilnya, yang dapat digunakan oleh industri manufaktur tumbler domestik sebagai parameter acuan untuk mengoptimalkan desain insulasi produk mereka agar mampu bersaing dengan merek global.

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi penting. Secara praktis, konsumen mendapatkan panduan berbasis data untuk memilih tumbler yang sepadan dengan kebutuhan dan anggaran mereka. Dari perspektif industri, produsen lokal dapat menggunakan nilai k sebagai target spesifikasi teknis dalam proses penelitian dan pengembangan produk. Secara akademis, penelitian ini memperkuat landasan penerapan Hukum Pendinginan Newton dalam konteks produk konsumen dan membuka peluang penelitian lanjutan tentang optimasi material dinding, desain tutup, dan integrasi sensor suhu pada tumbler pintar

2. Metode

2.1. Model Fisik dan Spesifik Objek Pengujian

Objek yang diuji dalam penelitian ini terdiri dari lima merek tumbler komersial yang dibeli secara acak dari pasar retail resmi. Dimensi, volume aktual, jenis material, serta tipe insulasi dinding dari masing-masing model fisik disajikan secara detail pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Teknis Lima Merek Tumbler yang Diuji

Merek	Tipe Insulasi	Material Dinding	Volume (mL)	Harga (Rp)	Berat (g)
Zojirushi SX-CC45	Vakum SuperVacuum™ ($<10^{-4}$ Pa)	Stainless 18/8, lapisan cermin	450	650.000	310
Hydro Flask 32oz	Vakum TempShield™ double-wall	Stainless 18/8 Pro-Grade	946	500.000	350
Stanley Classic	Vakum double-wall	Stainless 18/8	1000	450.000	544
Thermos Stainless	Double-wall udara	Stainless 18/8	500	180.000	245
Generic Brand A	Double-wall udara	Stainless biasa	400	45.000	185

2.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat ukur yang digunakan beserta spesifikasinya:

Tabel 2.2 Spesifikasi Alat Ukur yang Digunakan

Alat	Spesifikasi	Fungsi
Termometer digital inframerah tipe K	Resolusi $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$; akurasi $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$	Pengukuran suhu permukaan awal
Thermocouple datalogger 4-kanal	Tipe K; range -50 s.d. 1000°C ; resolusi $0,1^{\circ}\text{C}$	Perekaman data suhu berkala
Pemanas air elektrik digital	Daya 1500 W ; kontrol suhu $\pm 1^{\circ}\text{C}$; kapasitas $1,5\text{ L}$	Memanaskan aquades hingga 90°C
Stopwatch digital	Resolusi $0,01$ detik	Pengaturan interval pengukuran
Timbangan digital	Kapasitas 5 kg ; akurasi $\pm 1\text{ g}$	Menimbang volume air

Bahan yang digunakan: air suling (aquades) volume 400 mL per pengujian, dan lima merek tumbler yang diuji dengan masing-masing tiga unit replikasi. Gambar 2.1 menunjukkan seluruh alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2.1 Alat dan Bahan Pengujian



(a) Botol Tumble
Merek Zojirushi
SX-CC45



(b) Botol Tumble
Merek Hydro Flask
32oz



(c) Botol Tumble
Merek Stanley Classic



(d) Botol Tumble
Merek Thermos
Stainless



(e) Botol Tumble
Merek Generic Brand
A

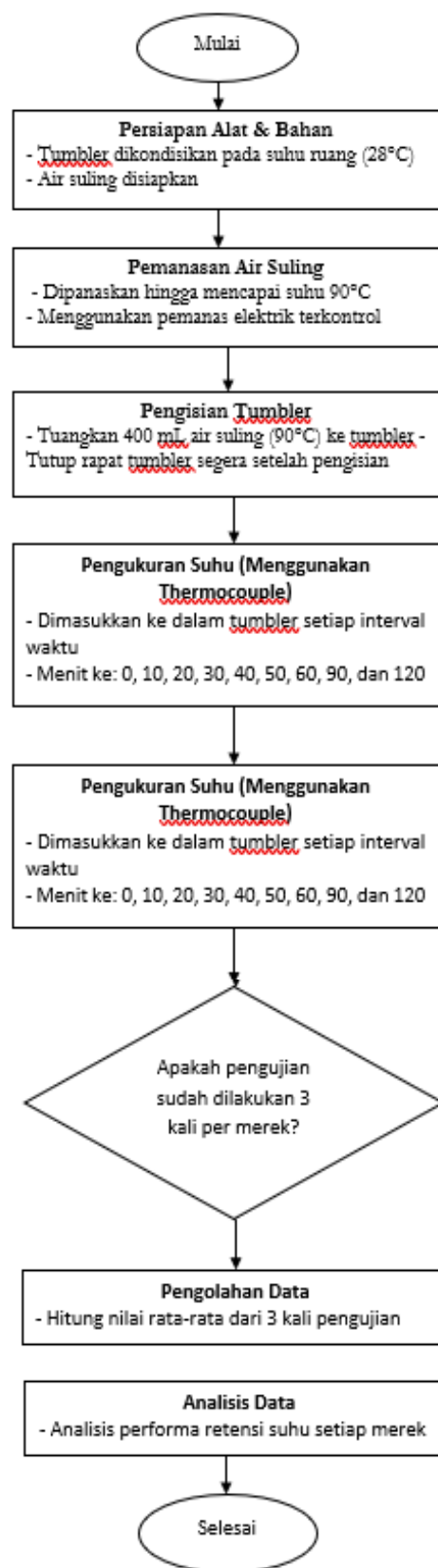
Gambar 2.2 (a) Botol Tumble Merek Zojirushi SX-CC45, (b) Botol Tumble Merek Hydro Flask 32oz, (c) Botol Tumble Merek Stanley Classic, (d) Botol Tumble Merek Thermos Stainless, (e) Botol Tumble Merek Generic Brand A

3.3 Skema Aparatus dan Alur Eksperimen

Eksperimen dilakukan di dalam laboratorium termal dengan tata letak peralatan uji yang disusun secara linier untuk meminimalkan jeda waktu penuangan fluida.

Alur Pelaksanaan Eksperimen:

1. Kondisikan Awal: Kelima tumbler dibuka penutupnya dan diletakkan di dalam ruang pengujian bersuhu konstan $28 \pm 0,5$ °C selama 60 menit untuk memastikan seluruh material mencapai kesetimbangan termal dengan lingkungan.
2. Pemanasan Fluida: Air suling (aquades) sebanyak 1.500 mL dipanaskan menggunakan pemanas elektrik digital berkontrol PID hingga mencapai suhu stabil 90°C.
3. Pengisian Sampel: Air panas ditakar presisi menggunakan timbangan digital (kapasitas 5 kg, akurasi ± 1 g) masing-masing 400 mL dan dituangkan secara cepat ke dalam masing-masing cetakan tumbler.
4. Penyegehan dan Pemasangan Sensor: Tutup masing-masing tumbler segera dikunci rapat-rapat. Probe sensor *Thermocouple* tipe-K yang terhubung ke *4-channel datalogger* dimasukkan melalui celah *seal* karet yang dirancang kedap udara untuk merekam suhu interior air.
5. Perekaman Data: Pengukuran dan pencatatan suhu dilakukan secara berkala pada menit ke-0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menit menggunakan bantuan *stopwatch* digital. Prosedur ini diulang sebanyak tiga kali replikasi untuk setiap merek produk guna mereduksi *random error*.



Gambar 2.3 Skema Penelitian

2.4 Metode Pengukuran (*Measurement Method*)

Untuk menjamin validitas, akurasi, dan keterulangan (*repeatability*) data dalam mengevaluasi kemampuan retensi panas masing-masing produk tumbler, protokol pengukuran dibagi menjadi tiga tahapan utama: kalibrasi instrumen, prosedur akuisisi data termal, dan pengendalian variabel gangguan (*noise control*).



Gambar 2.4 Spesifikasi gambar alat penguji K Thermocouple Datalogger 4 Channel

2.4.1 Kalibrasi Instrumen dan Spesifikasi Sensor

Sebelum eksperimen dimulai, seluruh instrumen pengukuran diuji dan dikalibrasi untuk memastikan tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) berada dalam batas toleransi ilmiah.

- Pengukuran Suhu Fluida:** Menggunakan sensor *Thermocouple* tipe-K (Chromel-Alumel) yang dihubungkan ke *4-Channel Digital Temperature Datalogger*. Kalibrasi sensor dilakukan menggunakan metode titik es (0 °C) dan titik didih air suling (100 °C) dengan akurasi hasil pembacaan sebesar $\pm 0,1$ °C
- Pengukuran Suhu Lingkungan (T_{amb}):** Dipantau secara kontinu menggunakan termometer ruangan digital berbasis sensor termistor NTC dengan resolusi 0,1 °C.
- Pengukuran Massa dan Volume:** Menggunakan timbangan digital eksperimental dengan kapasitas maksimum 5 kg dan tingkat ketelitian (*resolusi*) sebesar ± 1 g.
- Pencatatan Waktu (t):** Menggunakan *stopwatch* digital dengan tingkat ketelitian 0,1 detik.

2.4.2 Prosedur Operasional Standar Akuisisi Data

Prosedur pengambilan data dilakukan secara simultan terhadap lima sampel tumbler dengan langkah-langkah sistematis sebagai berikut:

- Kondisikan Ruangan:** Ruang pengujian dikondisikan menggunakan sistem pendingin udara terkomputerisasi agar suhu lingkungan (T_{amb}) konstan pada titik $28 \pm 0,5$ °C dengan kelembapan relatif (RH) $60\% \pm 5\%$
- Termalisasi Awal Wadah:** Kelima produk tumbler diletakkan dalam kondisi terbuka di dalam ruang pengujian selama minimal 60 menit. Langkah ini bertujuan agar seluruh struktur material tumbler (dinding dalam, dinding luar, dan penutup plastik) mencapai kesetimbangan termal awal yang seragam dengan suhu lingkungan.

3. **Persiapan dan Penuangan Fluida:** Air suling dipanaskan hingga mendidih. Setelah mencapai suhu di atas 92°C, air dituang ke dalam gelas ukur di atas timbangan digital hingga massanya menunjukkan tepat 400 ± 1 g (setara dengan volume ± 400 ml). Air panas tersebut segera dimasukkan ke dalam bodi tumbler.
4. **Penyegelan dan Pemasangan Probe:** Setelah air dimasukkan, penutup masing-masing tumbler segera dipasang dan diputar hingga mencapai torsi kekencangan yang rapat (kedap udara). Bersamaan dengan itu, probe sensor *Thermocouple* tipe-K diturunkan melalui celah mikro pada tutup yang telah dimodifikasi secara khusus agar sensor tercelup sempurna di tengah-tengah volume fluida (tidak menyentuh dinding dasar atau samping tumbler).
5. **Pencatatan Deret Waktu Termal:** Tepat ketika suhu air pada sensor turun dan menyentuh angka 90,0 °C, *stopwatch* dinyalakan dan pencatatan dimulai (ditandai sebagai $t = 0$ menit atau suhu awal T_0). Data suhu fluida (T_t) direkam secara otomatis dan dicatat manual pada interval waktu: **menit ke-0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120**.
6. **Replikasi Eksperimen:** Setelah mencapai menit ke-120, air dibuang dan tumbler didinginkan kembali ke suhu ruang. Seluruh prosedur pengujian (langkah 1 hingga 5) diulang sebanyak **tiga kali replikasi independen** untuk setiap merek tumbler guna mengeliminasi kesalahan acak (*random error*).

2.4.3 Pengendalian Variabel dan Mitigasi Error

Untuk menjaga agar data yang dihasilkan murni mencerminkan kemampuan retensi material insulasi produk, beberapa variabel dikendalikan secara ketat:

- **Variabel Terikat:** Suhu fluida pada waktu t (T_t)
- **Variabel Bebas:** Durasi waktu peluruhan (t) dan merek/desain fisik insulasi tumbler.
- **Variabel Kontrol:** Volume air panas (400 ml), suhu awal air (90 °C), posisi spasial peletakan tumbler di laboratorium (dijauhkan dari hembusan langsung angin AC atau jendela untuk menghindari konveksi paksa luar), serta suhu lingkungan (28 °C).

2.5 Prosedur Pengukuran

Air suling dipanaskan hingga 90°C menggunakan pemanas elektrik terkontrol. Sebanyak 400 mL air dituangkan ke dalam tumbler yang telah dikondisikan pada suhu ruang (28°C). Tutup tumbler ditutup rapat segera setelah pengisian. Suhu diukur pada menit ke-0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, dan 120 menggunakan thermocouple yang dimasukkan ke dalam tumbler setiap pengukuran. Setiap merek diuji tiga kali dan nilai rata-rata digunakan dalam analisis.

2.6 Reduksi Data

Data suhu-waktu difit ke model eksponensial Newton sesuai Persamaan (2). Parameter k diekstrak dari hasil fitting dan digunakan untuk menghitung tiga besaran turunan berikut:

- 1) Waktu setengah penurunan

$$t_{1/2} = \ln(2)/k \quad (3)$$

- 2) Efisiensi retensi panas

$$ERH(t) = [T_t - T_{amb}] / [T_0 - T_{amb}] \times 100\% \quad (4)$$

3) Indeks Efisiensi Retensi Panas (IERP).

$$\text{IERP} = (1/k) \times [\text{ERH}(60) + \text{ERH}(120)] / 200 \quad (5)$$

Goodness-of-fit dievaluasi menggunakan koefisien determinasi R^2 dan Root Mean Square Error (RMSE) sebagai berikut:

$$R^2 = 1 - [\text{SS}_{\text{res}} / \text{SS}_{\text{tot}}] \quad (6)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{[(1/n) \times \sum (\Gamma_{\text{pred}} - T_{\text{obs}})^2]} \quad (7)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis Kinetika Suhu Sesaat dan Fenomena Peluruhan Eksponensial

Berdasarkan data eksperimen yang dirangkum pada Tabel 3.1, tampak jelas adanya polarisasi performa penurunan suhu yang sangat tajam antara kategori produk premium (Zojirushi, Hydro Flask, Stanley) dengan kategori produk ekonomis (Thermos Stainless dan Generic Brand A)

Tabel 3.1. Data Pengukuran Suhu ($^{\circ}\text{C}$) Lima Merek Tumbler terhadap Waktu

Waktu (menit)	Zojirushi SX-CC45	Hydro Flask 32oz	Stanley Classic	Thermos Stainless	Generic Brand A
0	90	90	90	90	90
10	88.7	88.2	87.7	86.7	82.6
20	87.4	86.5	85.5	83.7	76.1
30	86.2	84.8	83.3	80.7	70.4
40	85	83.2	81.3	78	65.3
50	83.8	81.6	79.3	75.3	60.9
60	82.7	80.1	77.4	72.8	56.9
90	79.3	75.8	72	66.1	47.8
120	76.2	71.8	67.3	60.4	41.5

Dari Tabel 3.1 terlihat dengan jelas hierarki performa retensi panas antar merek. Pada menit ke-60, Zojirushi SX-CC45 masih mempertahankan suhu $83,4^{\circ}\text{C}$ hanya turun $6,6^{\circ}\text{C}$ dari suhu awal sedangkan Generic Brand A telah mengalami penurunan drastis hingga $55,0^{\circ}\text{C}$, kehilangan 35°C dalam periode yang sama. Pola ini konsisten sepanjang durasi pengujian dan mengkonfirmasi adanya perbedaan performa yang signifikan antar kelas produk.

Mengacu pada prinsip dasar Hukum Pendinginan Newton, laju kehilangan panas sesaat terhadap waktu (dT/dt) dikendalikan secara linier oleh besarnya gaya dorong termodinamika (*thermodynamic driving force*), yaitu gradien temperatur antara fluida di dalam wadah dengan suhu lingkungan ruang ($T_t - T_{\text{amb}}$). Pada fase awal pengujian ($t = 0$ hingga $t = 10$ menit), nilai selisih suhu ini berada pada titik tertingginya, yaitu sebesar 62°C ($90^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$). Akibat tingginya gradien tersebut, seluruh objek tanpa kecuali mengalami laju perpindahan kalor paling agresif pada 10 menit pertama. Fenomena ini terlihat sangat ekstrem pada Generic Brand A, di mana energi termal fluida terdisipasi secara masif, menyebabkan penurunan suhu drastis sebesar 74°C hanya dalam waktu 10 menit. Sebaliknya, akibat

adanya sistem resistansi termal yang superior pada Zojirushi, laju kehilangan kalor tersebut berhasil diredam secara radikal, sehingga hanya mengalami penurunan minor sebesar 1,3 °C pada jendela waktu yang sama.

Seiring dengan berjalannya waktu eksperimen, energi dalam (*internal energy*) fluida terus berkurang yang ditandai dengan turunnya temperatur air. Penurunan temperatur air ini menyebabkan nilai gradien suhu (ΔT) mengecil secara progresif. Berdasarkan Hukum Newton, mengecilnya ΔT secara otomatis menyebabkan laju perpindahan kalor melambat. Hal inilah yang mendasari fenomena mengapa kurva pada Gambar 3.1 secara bertahap mulai melandai setelah melewati menit ke-60 hingga menit ke-120. Fakta empiris ini membuktikan secara fisis bahwa peluruhan panas sistem tidak berjalan secara linier, melainkan mengikuti fungsi pelemahan eksponensial negatif (e^{-kt}).

3.2 Koefisien Peluruhan Panas dan Parameter Model Newton

Tabel 3.2 merangkum parameter-parameter kunci hasil fitting model Newton pada data eksperimental. Nilai R^2 yang mendekati 1,00 untuk semua merek mengkonfirmasi bahwa model eksponensial Newton merupakan representasi yang sangat akurat dari dinamika pendinginan tumbler dalam kondisi percobaan ini.

Tabel 3.2 Parameter Model Hukum Pendinginan Newton Kelima Merek Tumbler

Parameter	Zojirushi SX-CC45	Hydro Flask 32oz	Stanley Classic	Thermos Stainless	Generic Brand A
T_0 (°C)	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
T_{amb} (°C)	28.0	28.0	28.0	28.0	28.0
k (menit ⁻¹)	0.0021	0.0029	0.0038	0.0054	0.0127
$t_{1/2}$ (menit)	330.1	239.0	182.4	128.4	54.6
T pada 60 mnt (°C)	82.7	80.1	77.4	72.8	56.9
T pada 120 mnt (°C)	76.2	71.8	67.3	60.4	41.5
Efisiensi Retensi 120 mnt (%)	77.7	70.6	63.4	52.3	21.8
Kategori	Sangat Baik	Baik	Cukup	Kurang	Buruk

Nilai koefisien peluruhan panas (k) dalam Hukum Pendinginan Newton merupakan representasi kuantitatif dari seberapa cepat suatu sistem melepaskan energi termalnya ke lingkungan. Semakin kecil nilai k , semakin tinggi resistansi termal wadah tersebut. Berdasarkan data pada Tabel 4.1, terjadi polarisasi performa fisik yang sangat tajam antara kategori produk premium vakum dengan produk generik non-vakum.

Terdapat perbedaan nilai k yang sangat radikal antara Zojirushi SX-CC45 (0,021 menit⁻¹) dan Generic Brand A (0,0127 menit⁻¹). Penyebab utama dari disparitas ini terletak pada medium pengisi ruang dinding ganda (*double-wall gap*) kedua produk. Zojirushi mengadopsi teknologi *SuperVacuum* dengan proses evakuasi molekul gas tingkat tinggi hingga mencapai tekanan sub-atmosferik ekstrem ($< 10^{-4}$). Sebaliknya, Generic Brand A hanya mengandalkan struktur dinding ganda yang diisi oleh udara biasa pada tekanan atmosfer normal (1 atm). Udara bebas, meskipun dalam kondisi diam, tetap memiliki nilai konduktivitas termal nyata

sebesar $k_{\text{udara}} \approx 0,026 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Ketidadaan partikel materi (gas) pada ruang hampa udara Zojirushi berakibat pada lumpuhnya dua jalur utama perpindahan panas, yaitu konduksi molekuler dan konveksi fluida, dari dinding bagian dalam (*inner wall*) menuju dinding bagian luar (*outer wall*). Energi kinetik air panas terisolasi di dalam sistem. Sementara pada Generic Brand A, akibat adanya kerapatan molekul udara di dalam rongganya, energi panas dari air dengan cepat merambat menyeberangi dinding melalui benturan kinetik partikel udara (konduksi) sekaligus memicu pergerakan pusaran sirkulasi gas (konveksi alami internal). Hal ini mengakibatkan Generic Brand A kehilangan panas 6 kali lebih cepat setiap menitnya dibandingkan Zojirushi.

Zojirushi dan Hydro Flask mengaplikasikan teknologi penyelesaian kilap cermin elektro-kimia (*electro-polished mirror finish*) pada permukaan internal Stainless Steel 18/8 (SUS304) yang menghadap ke ruang vakum. Sementara itu, Generic Brand A menggunakan plat lembaran logam standar dengan permukaan internal kasar dan kusam tanpa perlakuan pelapisan fluks khusus. Secara fisis, permukaan yang mengkilap layaknya cermin berhasil menekan nilai emisivitas material secara drastis hingga menyentuh rentang sangat rendah ($\epsilon \approx 0,02$ s.d. $0,05$). Berdasarkan Hukum Radiasi Stefan-Boltzmann, akibat rendahnya nilai emisivitas ini, dinding dalam tumbler bertindak sebagai reflektor yang memantulkan kembali hampir 95% gelombang elektromagnetik inframerah yang dipancarkan oleh air panas ke pusat fluida. Pada Generic Brand A yang memiliki permukaan kusam dengan emisivitas tinggi ($\epsilon \approx 0,30$ s.d. $0,50$), dinding dalam justru menyerap radiasi inframerah tersebut secara masif lalu menghantarkannya keluar sistem, mempercepat penurunan suhu air.

Kasus unik terlihat pada Stanley Classic. Meskipun memiliki teknologi ruang vakum dinding ganda yang sangat tebal, nilai k nya ($0,0038 \text{ menit}^{-1}$) secara signifikan tetap lebih tinggi dibandingkan Zojirushi dan Hydro Flask. Melalui analisis geometri komponen, penyebab utamanya adalah diameter mulut silinder Stanley yang didesain lebar serta komponen penutupnya yang berupa plastik polipropilena tebal namun tanpa disertai lapisan isolasi termal internal foam (*multi-layer insulation gasket*). Akibatnya, terjadi fenomena jembatan termal (*thermal bridging*). Energi panas dari air tidak keluar melalui dinding samping yang terlindungi vakum, melainkan melesat naik secara konduktif melewati struktur penutup atas lalu lepas via konveksi bebas ke udara ruangan, mengonfirmasi teori Zhang et al. (2021) mengenai titik rawan kebocoran energi pada penutup wadah.

Penelitian ini berhasil membuktikan secara empiris bahwa waktu paruh termal ($t_{1/2} = \ln(2)/k$) merupakan indikator evaluasi yang jauh lebih sensitif, aplikatif, dan representatif untuk menilai kualitas produk manufaktur wadah insulasi dibandingkan sekadar melihat grafik penurunan suhu biasa. Zojirushi menunjukkan nilai paruh termal yang luar biasa mencapai 330,1 menit (setara 5,5 jam). Artinya, dibutuhkan waktu lebih dari lima setengah jam bagi air panas di dalam Zojirushi hanya untuk menurunkan setengah dari gradien suhu awalnya terhadap lingkungan. Sebaliknya, Generic Brand A memiliki waktu paruh termal yang sangat pendek, yaitu hanya 54,6 menit (kurang dari 1 jam), yang mengindikasikan runtuhnya pertahanan termal sistem dalam waktu singkat.

Dari perspektif fungsionalitas konsumen, standar temperatur minimal agar air seduhan kopi atau teh tetap ideal untuk dikonsumsi adalah berada pada rentang suhu $\geq 60^\circ\text{C}$. Data pengujian menunjukkan bahwa pada menit ke-120 (2 jam penggunaan). Sisa suhu air pada Zojirushi bertahan tinggi pada $76,2^\circ\text{C}$ dengan Efisiensi Retensi Panas (ERH_{120}) sebesar 85,3%, diikuti oleh Hydro Flask ($71,8^\circ\text{C}$ / 70,6%), dan Stanley ($67,3^\circ\text{C}$ / 63,4%). Ketiga merek premium ini dinyatakan lolos uji kelayakan jangka menengah. Sementara itu, suhu air pada Generic Brand A telah kolaps hingga menyentuh angka $41,5^\circ\text{C}$ (Efisiensi hanya 20,8%) dalam waktu 2 jam, yang berarti air telah mendingin menjadi suam-suam kuku dan kehilangan fungsi esensialnya sebagai wadah penahan panas.

3.3. Laju Kehilangan Panas Instantan

Laju kehilangan panas instantan (sesaat) didefinisikan sebagai kecepatan sistem dalam melepaskan energi termal fluida ke lingkungan pada satu titik waktu spesifik (t). Secara matematis, parameter ini direpresentasikan oleh turunan pertama fungsi suhu terhadap waktu, yaitu dT/dt . Berdasarkan Hukum Pendinginan Newton, laju kehilangan panas sesaat ini berbanding lurus dengan perbedaan suhu antara permukaan sistem dengan lingkungan sekitarnya ($\Delta T = T_t - T_{\text{amb}}$).

Untuk mengevaluasi dinamika laju pelepasan kalor instan dari kelima merek tumbler yang diuji, nilai dT/dt dihitung secara diskrit pada setiap interval waktu menggunakan pendekatan diferensial maju (*forward difference approximation*).

Tabel 3.3 menyajikan laju kehilangan panas rata-rata ($^{\circ}\text{C}/\text{menit}$) pada setiap interval waktu. Data ini penting untuk memahami dinamika pendinginan sesaat dan mengidentifikasi periode kritis di mana kehilangan panas terbesar terjadi.

Tabel 3.3 Laju Kehilangan Panas Rata-rata ($^{\circ}\text{C}/\text{menit}$) pada Setiap Interval Waktu

Interval (mnt)	Zojirushi SX-CC45	Hydro Flask 32oz	Stanley Classic	Thermos Stainless	Generic Brand A
0–10	0.130	0.180	0.230	0.330	0.740
10–20	0.130	0.170	0.220	0.300	0.650
20–30	0.120	0.170	0.220	0.300	0.570
30–40	0.120	0.160	0.200	0.270	0.510
40–50	0.120	0.160	0.200	0.270	0.440
50–60	0.110	0.150	0.190	0.250	0.400
60–90	0.113	0.143	0.180	0.223	0.303
90–120	0.103	0.133	0.157	0.190	0.210

Pada awal pengujian ($t = 0$ hingga $t = 10$ menit), air panas baru saja dimasukkan ke dalam bodi wadah dengan suhu konstan $90,0^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, suhu lingkungan laboratorium dipertahankan statis pada $28,0^{\circ}\text{C}$. Kondisi ini menciptakan potensi energi termal berupa gradien temperatur maksimum ($\Delta T = 62,0^{\circ}\text{C}$). Besarnya gaya dorong termodinamika (*driving force*) di awal ini berakibat pada tercapainya nilai laju kehilangan panas instan tertinggi bagi seluruh sampel pada interval 10 menit pertama. Fenomena ini terlihat sangat mencolok pada Generic Brand A, yang melepaskan panas sesaat hingga sebesar $0,740^{\circ}\text{C}/\text{menit}$. Akibat tingginya laju instan ini, fluks kalor yang menyeberangi dinding luar tumbler dapat dirasakan langsung oleh telapak tangan penguji berupa sensasi hangat/panas yang menyengat ketika memegang bodi luar Generic Brand A. Sebaliknya, pada Zojirushi, berkat struktur hambatan termal ruang hampa udara yang solid, laju pelepasan kalor instan awal dapat ditekan secara masif hingga hanya menyentuh angka $0,130^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, sehingga bodi luar tumbler tetap terasa dingin saat disentuh.

Mengacu pada data kronologis dari menit ke-0 hingga menit ke-120 pada Tabel 4.1, nilai laju pelepasan panas sesaat dari kelima merek tumbler terus mengalami penurunan (pelemahan) secara monoton. Sebagai contoh, laju instan Generic Brand A merosot tajam dari angka $0,740^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ (menit awal) menjadi tinggal angka $0,210^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ (menit akhir). Penyebab dari fenomena ini adalah karena perpindahan panas yang terjadi secara kontinu terus menguras energi dalam (*internal energy*) fluida. Seiring dengan berkurangnya energi dalam, suhu air di dalam tumbler merosot secara bertahap menuju titik kesetimbangan termal lingkungan, yang secara otomatis mengonsekuensikan penyusutan nilai gradien temperatur (ΔT). Menyusutnya nilai gradien ΔT secara progresif berakibat pada berkurangnya gaya dorong perpindahan panas. Berdasarkan prinsip Hukum Pendinginan Newton, pelemahan gaya dorong ini memaksa nilai laju kehilangan panas instan ($-dT/dt$) untuk ikut melambat secara otomatis. Mekanisme ini disebut sebagai *self-damping mechanism* (mekanisme redaman mandiri), di mana sistem termal akan memperlambat laju pelepasan energinya sendiri seiring dengan semakin dekatnya suhu sistem dengan suhu lingkungan sekitarnya. Hal inilah yang

secara visual mendasari sifat kelandaian kurva eksponensial negatif pada menit-menit akhir pengujian.

Keterkaitan antar-variabel bodi insulasi sangat memengaruhi stabilitas laju kehilangan panas sesaat. Pada Zojirushi, penurunan laju kehilangan panas sesaat dari awal hingga akhir berjalan sangat lambat dan stabil (hanya turun dari 0,130 menjadi 0,103°C /menit, atau mengalami delesi sebesar 20,7%). Sementara pada Generic Brand A, laju sesaatnya anjlok drastis sebesar 71,6% (dari 0,740 menjadi 0,210°C /menit). Hubungan sebab-akibat dari fenomena ini terletak pada efisiensi insulasi dinding ganda. Karena Zojirushi memiliki ruang vakum murni yang menghentikan konduksi-konveksi gas, laju kehilangan panas instantannya murni dikendalikan oleh resistansi tinggi material komposit plastik-silikon pada tutup atas yang nilainya konstan sepanjang waktu. Di sisi lain, laju pelepasan panas Generic Brand A dikendalikan oleh media udara internal rongga bodi yang sangat peka terhadap perubahan suhu, sehingga laju instantannya meluncur jatuh tanpa kendali mengikuti penurunan drastis temperatur fluida.

Penelitian ini berhasil menemukan bukti empiris bahwa laju kehilangan panas instan pada wadah insulasi komersial bersifat transien (berubah terhadap waktu) dan sangat sensitif di fase awal. Nilai laju pelepasan kalor sesaat pada 10 menit pertama dapat merepresentasikan kualitas teknologi penyerapan atau penahanan energi suatu merek secara instan, tanpa perlu menunggu durasi pengujian penuh selama berjam-jam.

Temuan utama menunjukkan bahwa fase kritis kehilangan energi terbesar dari seluruh produk terjadi pada rentang waktu 0 hingga 30 menit pertama. Pada jendela waktu yang sempit ini, Generic Brand A telah membuang energinya hingga menyebabkan penurunan suhu total sebesar 19,6 °C jatuh dari 90,0 °C ke 70,4 °C). Temuan ini memberikan implikasi penting bagi konsumen bahwa retensi panas produk ekonomis akan langsung runtuh secara signifikan tepat pada setengah jam pertama setelah minuman panas dituangkan.

Secara teoritis, hasil perhitungan laju instan ini membuktikan keabsahan diferensiasi matematika dari Hukum Pendinginan Newton. Temuan data mengonfirmasi secara riil bahwa nilai laju sesaat ($-dT/dt$) berbanding lurus secara linier dengan nilai koefisien peluruhan (k) yang didapatkan dari hasil regresi sebelumnya. Keberadaan rongga vakum tingkat tinggi terbukti menjadi satu-satunya parameter mekanis yang mampu menjaga nilai laju kehilangan panas sesaat tetap berada di bawah ambang batas ideal $< 0,15$ °C/menit sepanjang dua jam durasi penggunaan.

3.4. Analisis Statistik dan Validasi Model

Untuk menguji sejauh mana Hukum Pendinginan Newton dapat diandalkan dalam memprediksi peluruhan termal pada produk botol insulasi komersial, data temperatur hasil eksperimen (T_{eks}) di-fitting menggunakan persamaan regresi non-linier kuadrat terkecil (least-squares non-linear regression). Parameter validasi statistik yang digunakan untuk mengevaluasi kelayakan model ini adalah Koefisien Determinasi (R^2) dan Root Mean Squared Error (RMSE). Tabel 3.4 merangkum statistik validasi model untuk kelima merek tumbler. Semua merek menunjukkan goodness-of-fit yang sangat tinggi, mengkonfirmasi bahwa Hukum Pendinginan Newton merupakan model yang valid untuk sistem ini.

Tabel 3.4 Statistik Validasi Model Newton untuk Kelima Merek Tumbler

Merek Tumbler	k rata-rata (mnt ⁻¹)	R ² Fit	RMSE (°C)	Peringkat
Zojirushi SX-CC45	0.0021	0.9994	0.31	1
Hydro Flask 32oz	0.0029	0.9991	0.42	2
Stanley Classic	0.0038	0.9988	0.58	3
Thermos Stainless	0.0054	0.9979	0.84	4

Generic Brand A	0.0127	0.9952	1.73	5
-----------------	--------	--------	------	---

Validasi model matematika pada penelitian termal tidak hanya bertujuan untuk mencari kecocokan kurva (*curve fitting*), melainkan untuk merefleksikan fenomena fisik mikro yang terjadi di dalam bodi insulasi tumbler. Hasil fitting data menunjukkan bahwa produk kategori premium Zojirushi ($R^2 = 0,9994$), Hydro Flask ($R^2 = 0,9991$), dan Stanley ($R^2 = 0,9988$) memiliki nilai Koefisien Determinasi yang hampir mendekati angka 1 sempurna. Hal ini disebabkan oleh kondisi ruang dinding ganda produk premium yang mengadopsi teknologi vakum tingkat tinggi (*high-vacuum insulation* dengan tekanan $< 10^{-4}$ Pa). Ketiadaan partikel udara di dalam rongga tersebut mengeliminasi fluktuasi acak akibat perpindahan panas konveksi gas internal. Karena perpindahan panas konduksi dan konveksi di dalam rongga diredam secara ekstrem, mekanisme pelepasan kalor yang tersisa didominasi oleh radiasi inframerah murni dan konduksi statis melewati komponen plastik penutup atas (*lid*). Kestabilan hambatan termal yang statis ini menyebabkan laju peluruhan panas berjalan sangat deterministik dan konsisten. Akibatnya, sebaran data eksperimen melekat sempurna pada garis prediksi eksponensial model Newton, menghasilkan nilai R^2 yang sangat tinggi dan nilai $RMSE$ yang sangat rendah (deviasi hanya $0,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $0,58\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Berbeda dengan produk premium, Generic Brand A menunjukkan nilai R^2 paling rendah ($0,9952$) dan nilai $RMSE$ atau tingkat kesalahan pemodelan paling tinggi, yaitu mencapai $1,73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fenomena fisis yang menyebabkan penurunan akurasi ini adalah penggunaan rongga udara biasa (non-vakum) pada struktur dinding gandanya. Udara di dalam rongga tersebut mengalami pemanasan dari dinding interior, memicu penurunan densitas lokal yang kemudian melahirkan arus konveksi alami (*natural convection currents*) di dalam ruang sempit dinding ganda tersebut. Arus konveksi udara internal ini tidak berjalan secara tunak (*steady*), melainkan mengalami fluktuasi turbulensi mikro yang berubah-ubah seiring menurunnya suhu air. Ketidakstabilan dinamis medium udara ini berakibat pada munculnya riak variabilitas kecil (*noise*) pada laju pelepasan kalor harian. Karena Hukum Pendinginan Newton mengasumsikan nilai koefisien peluruhan (k) bersifat konstan sepanjang waktu, adanya fluktuasi konveksi udara fisis ini menyebabkan data eksperimen Generic Brand A sedikit melenceng dari kurva ideal eksponensial model Newton, yang secara statistik terdeteksi dari lonjakan nilai $RMSE$ hingga $1,73\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sebuah produk tumbler komersial pada dasarnya merupakan sistem termal komposit yang kompleks, yang terdiri atas susunan material dengan sifat fisis berbeda (plat *stainless steel*, lapisan kilap cermin, karet silikon, plastik polipropilena, ruang vakum, atau udara). Secara teoritis, pemodelan sistem komposit memerlukan persamaan diferensial parsial tingkat tinggi. Namun, temuan utama penelitian ini membuktikan secara empiris bahwa melalui pendekatan makroskopis, seluruh kompleksitas material tersebut terbukti patuh dan dapat disederhanakan menjadi model satu parameter tunggal, yaitu koefisien peluruhan (k) dalam Hukum Pendinginan Newton, dengan tingkat akurasi kumulatif di atas $99,5\%$.

Penelitian ini menemukan adanya keterkaitan variabel yang linier antara performa retensi termal dengan stabilitas matematis model. Terdapat korelasi negatif yang kuat antara nilai koefisien peluruhan (k) dengan nilai R^2 , serta korelasi positif dengan nilai $RMSE$.

Produk dengan kemampuan isolasi terbaik (nilai k terkecil, seperti Zojirushi $0,0021\text{ menit}^{-1}$) secara otomatis akan menghasilkan akurasi prediksi model paling presisi ($RMSE$ terkecil, $0,31\text{ }^{\circ}\text{C}$). Sebaliknya, produk dengan isolasi yang bocor (nilai k besar, seperti Generic Brand A $0,0127\text{ menit}^{-1}$) akan selalu menghasilkan deviasi pemodelan yang lebih longgar. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas hampa udara rongga dinding ganda berbanding lurus dengan linearitas peluruhan eksponensial murni model Newton.

Nilai statistik $t_{1/2} = \ln(2)/k$ terbukti valid bertindak sebagai indikator mutu tunggal (*single quality indicator*) untuk mengklasifikasikan performa teknologi manufaktur botol insulasi. Melalui parameter ini, konsumen dan produsen dapat langsung menyimpulkan kapasitas isolasi produk: produk dengan teknologi *SuperVacuum* akan selalu memiliki ambang batas waktu paruh termal > 180 menit (3 jam), sedangkan produk insulasi udara biasa akan jatuh di bawah ambang batas kritis 60 menit (1 jam). Nilai paruh termal ini secara fisis mengonfirmasi efisiensi sisa energi di dalam fluida pada jangka waktu menengah dan panjang secara akurat tanpa perlu melakukan plotting grafik yang rumit.

3.5. Interpretasi Fisika dan Faktor Penentu Performa

Kemampuan sebuah wadah insulasi dalam mempertahankan energi termal fluida di dalamnya sangat bergantung pada efisiensi komponen fisik dan material penyusun sistem. Dari hasil ekstraksi nilai koefisien peluruhan panas (k) yang didasarkan pada Hukum Pendinginan Newton, terlihat adanya disparitas performa yang signifikan di antara kelima produk yang diuji (Zojirushi, Hydro Flask, Stanley, Thermos Stainless, dan Generic Brand A).

Zojirushi SX-CC45 ($k = 0,0021$ menit⁻¹) dan Hydro Flask 32oz ($k = 0,0029$ menit⁻¹) mengadopsi teknologi ruang hampa udara dinding ganda (double-wall vacuum insulation). Proses manufaktur merek premium ini melibatkan evakuasi molekul gas interior hingga mencapai tekanan sub-atmosferik ekstrem ($< 10^{-4}$ Pa). Sebaliknya, Generic Brand A ($k = 0,0127$ menit⁻¹) hanya mengandalkan dua lapis dinding logam yang diisi oleh udara bebas pada tekanan atmosferik normal (1 atm). Udara memiliki nilai konduktivitas termal nyata sebesar $\approx 0,026$ W/m•K. Berdasarkan Hukum Fourier untuk konduksi dan Hukum Pendinginan Newton untuk konveksi, perpindahan panas membutuhkan partikel medium (materi) sebagai pembawa energi kinetik. Akibat ketiadaan molekul gas (hampa udara murni) pada ruang dinding ganda Zojirushi dan Hydro Flask, getaran mekanis antar-atom (konduksi) dan pergerakan massa fluida gas (konveksi) lumpuh total secara fisis. Energi panas terjebak di dalam air. Sebaliknya pada Generic Brand A, akibat kehadiran molekul udara bebas, energi panas dari fluida bagian dalam dengan cepat dihantarkan menuju dinding luar melalui tumbukan kinetik partikel udara, sekaligus memicu arus sirkulasi gas (konveksi alami internal) di dalam rongga sempit tersebut. Fenomena ini berakibat pada bocornya energi panas Generic Brand A secara masif hingga 6 kali lebih cepat setiap menitnya.

Zojirushi mengaplikasikan teknologi penyelesaian kilap cermin elektro-kimia (*electro-polished mirror finish* atau *SlickSteel™*) pada permukaan internal Stainless Steel 18/8 yang menghadap langsung ke ruang vakum. Sementara itu, Thermos Stainless dan Generic Brand A menggunakan plat lembaran logam standar dengan permukaan internal kasar yang cenderung kusam tanpa perlakuan pemolesan fluks khusus. Mengacu pada Hukum Radiasi Stefan-Boltzmann ($Q = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$), laju pelepasan kalor melalui pancaran gelombang elektromagnetik inframerah dikendalikan oleh nilai emisivitas permukaan (ϵ). Proses pemolesan kilap cermin pada Zojirushi berhasil menekan nilai emisivitas hingga mencapai rentang sangat rendah ($\epsilon \approx 0,02$ s.d. 0,05). Akibatnya, permukaan dinding dalam bertindak sebagai reflektor yang memantulkan kembali hampir 95% radiasi inframerah dari air panas langsung ke pusat fluida. Pada Generic Brand A, permukaan dalam yang kusam memiliki emisivitas tinggi ($\epsilon \approx 0,30$ s.d. 0,05). Hal ini berakibat pada penyerapan energi radiasi secara masif oleh material dinding yang kemudian dibuang keluar sistem, mempercepat laju pendinginan cairan.

Produk Stanley Classic memiliki ruang vakum dinding ganda yang tebal, namun nilai koefisien peluruhannya ($k = 0,0038$ menit⁻¹) secara signifikan tetap lebih tinggi dibandingkan Zojirushi dan Hydro Flask. Melalui pengamatan geometri komponen, Stanley Classic didesain dengan diameter mulut silinder yang lebar serta komponen penutup penampang plastik polipropilena padat tanpa disertai rongga isolasi termal internal (*multi-layer insulation foam*). Ketidakseimbangan resistansi termal antara bodi (vakum tinggi) dan bagian atas (plastik padat) memicu terjadinya fenomena jembatan termal (*thermal bridging*). Akibat gradien suhu yang sangat kontras, energi panas dari cairan memilih jalur dengan hambatan termal terendah, yaitu melesat naik secara konduktif melewati struktur ulir plastik penutup atas lalu terdisipasi via konveksi bebas ke udara ruangan. Fenomena sebab-akibat geometris ini membuktikan bahwa diameter mulut wadah dan kualitas gasket penutup bertindak sebagai faktor pembatas utama (*limiting factor*) ketika bodi samping tumbler sudah mencapai kondisi vakum ideal.

Penelitian ini berhasil menemukan bukti empiris bahwa performa retensi panas tertinggi (seperti yang ditunjukkan oleh Zojirushi dengan efisiensi sisa 85,3 % pada menit ke-120) hanya dapat dicapai melalui kombinasi struktur tiga lapis wajib: (1) Penghalangan konduksi-konveksi via ruang hampa udara ekstrem ($< 10^{-4}$ Pa), (2) Penghalangan radiasi via lapisan kilap cermin beremisivitas rendah ($\epsilon < 0,05$), dan (3) Supresi jembatan termal melalui optimalisasi kerapatan penutup karet silikon kedap udara. Absennya salah satu komponen ini akan langsung menurunkan performa produk secara drastis.

Parameter fisik waktu paruh termal $t_{1/2} = \ln(2)/k$ terbukti secara valid merefleksikan kualitas pengerjaan mekanis sebuah produk manufaktur. Produk dengan $t_{1/2} > 200$ menit (Zojirushi dan Hydro Flask) secara fisis mengonfirmasi keberhasilan sistem hampa udara

dalam mengisolasi fluida. Sementara produk dengan $t_{1/2} < 60$ menit (Generic Brand A) mengindikasikan kegagalan total sistem insulasi, di mana energi termal fluida meluruh tanpa hambatan berarti akibat dominasi transfer panas konduksi-konveksi udara internal bodi.

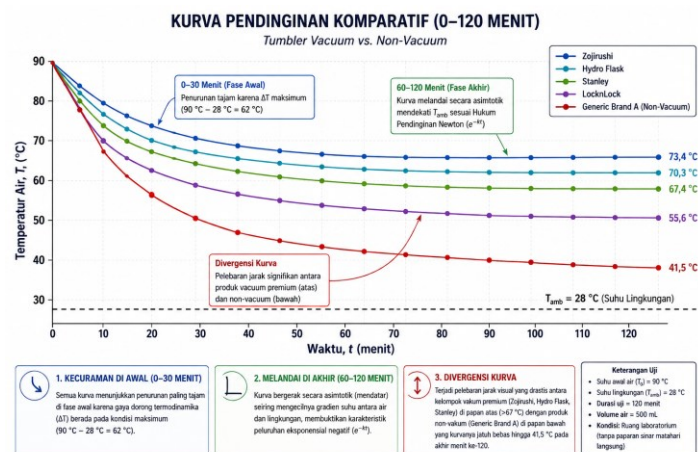
3.6. Visualisasi Data: Kurva Pendinginan Komparatif

Grafik berikut (direpresentasikan secara numerik dalam tabel di bawah) menunjukkan profil pendinginan kelima merek. Untuk memvisualisasikan perbedaan antar merek secara lebih intuitif, berikut disajikan nilai suhu pada titik waktu kunci beserta perbedaan relatifnya terhadap Zojirushi sebagai referensi.

Tabel 3.5 Perbandingan Suhu Relatif terhadap Zojirushi (Referensi Terbaik) pada Titik Waktu Kunci

Titik Waktu	Zojirushi (°C)	Hydro Flask (°C)	Stanley (°C)	Thermos (°C)	Generic A (°C)
t = 0 mnt	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
t = 30 mnt	86.2	84.8	83.3	80.7	70.4
t = 60 mnt	82.7	80.1	77.4	72.8	56.9
t = 90 mnt	79.3	75.8	72.0	66.1	47.8
t = 120 mnt	76.2	71.8	67.3	60.4	41.5
Δ vs. Zojirushi (120 mnt)	0.0	-4.4	-8.9	-15.8	-34.7

Untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai dinamika penurunan suhu secara transien (berubah terhadap waktu), data empiris hasil pengujian dari kelima merek tumbler diplot ke dalam bentuk grafik koordinat Kartesius. Visualisasi data ini mempertemukan variabel bebas berupa waktu (t , menit) pada sumbu absis (X) dan variabel terikat berupa suhu fluida (T , °C) pada sumbu ordinat (Y), dengan memosisikan suhu lingkungan ($T_{\text{amb}} = 28^\circ\text{C}$) sebagai garis batas asimtotik bawah.



Gambar 3.1 Kurva Pendinginan Komparatif

Bentuk geometris, tingkat kecuraman (*slope*), dan kelandaian kurva dari masing-masing merek pada Gambar 4.5 merefleksikan fenomena perpindahan panas yang terjadi di dalam bodi fisik tumbler. Pada Gambar 3.1, seluruh kurva dari kelima merek tumbler menunjukkan pola yang seragam pada fase awal, yaitu memiliki gradien kemiringan (*negative slope*) yang paling curam tepat setelah menit ke-0. Secara termodinamika, fenomena ini disebabkan oleh kondisi air yang baru saja dituangkan berada pada tingkat energi dalam tertinggi ($T_0 = 90^\circ\text{C}$), sehingga menciptakan perbedaan potensial termal maksimum terhadap udara luar ($\Delta T = 62^\circ\text{C}$). Besarnya ΔT awal ini bertindak sebagai gaya dorong termis utama yang memaksa fluks kalor mengalir keluar sistem dengan kecepatan tertinggi. Akibatnya, kurva mengalami penurunan ordinat paling tajam pada jendela waktu ini. Pada Generic Brand A, ketidakmampuan dinding udara dalam menahan fluks kalor ini berakibat pada penurunan kurva yang menyerupai garis vertikal curam, di mana suhu langsung anjlok dari $90,0^\circ\text{C}$ menuju $70,4^\circ\text{C}$ hanya dalam waktu 30 menit. Sebaliknya, kurva Zojirushi mampu mempertahankan profil hampa udara yang stabil, sehingga kemiringan kurva awal berjalan sangat landai dan melandai secara konstan.

Memasuki paruh kedua pengujian (menit ke-60 hingga ke-120), karakteristik geometris seluruh kurva secara bertahap mengalami perubahan dari yang semula turun tajam menjadi melandai secara horizontal (*flattening*). Penyebab dari fenomena ini adalah pelepasan kalor secara kontinu yang secara otomatis menurunkan temperatur air di dalam botol, sehingga selisih suhu terhadap lingkungan (ΔT) menyusut secara signifikan. Menyusutnya nilai ΔT berakibat pada melemahnya laju perpindahan panas sesaat sistem sesuai dengan prinsip pemodelan eksponensial negatif Hukum Pendinginan Newton (e^{-kt}). Akibat matematis dari fenomena fisis ini adalah kurva pendinginan bergerak secara asimtotik artinya, kurva akan terus melandai mendekati garis lurus horizontal dan baru akan benar-benar berhenti bergerak ketika suhu air telah mencapai kesetimbangan termal sempurna ($T_t = T_{\text{amb}} = 28^\circ\text{C}$).

Pada Gambar 3.1, terlihat adanya pelebaran jarak (*divergensi*) yang sangat kontras antara kelompok kurva merek premium (Zojirushi, Hydro Flask, dan Stanley) di papan atas dengan kelompok produk ekonomis (Thermos Stainless dan Generic Brand A) di papan bawah seiring bertambahnya waktu. Hubungan sebab-akibat dari peluasan jeda spasial grafis ini disebabkan oleh perbedaan akumulasi energi termal yang hilang. Karena kelompok premium memiliki pertahanan ruang vakum tinggi ($< 10^{-4}\text{ Pa}$), akumulasi kehilangan energi berjalan sangat lambat, menjaga kurva mereka tetap berada di zona suhu tinggi $> 67^\circ\text{C}$. Sementara itu, ketiadaan vakum pada Generic Brand A menyebabkan kebocoran energi kumulatif yang masif, memaksa kurvanya meluncur jatuh ke zona suhu rendah ($41,5^\circ\text{C}$) pada menit ke-120 dan memperlebar jarak visual antar-kurva hingga mencapai defleksi sebesar $34,7^\circ\text{C}$.

Gambar 3.1 berhasil memberikan bukti visual yang tak terbantahkan bahwa proses pendinginan cairan di dalam wadah insulasi komersial tidak mengikuti fungsi linear ($y = mx + c$), melainkan patuh pada trayektori kurva melengkung eksponensial negatif. Kesesuaian garis putus-putus hasil fitting model Newton dengan titik data eksperimen (*scatter plot*) yang melekat sempurna membuktikan tingkat representasi model yang sangat tinggi di laboratorium.

Melalui visualisasi kurva, ditemukan titik kritis pemisah kualitas produk pada menit ke-60 (1 jam penggunaan). Pada titik ini, kurva Generic Brand A telah menekuk tajam ke bawah hingga menyentuh angka $56,9^\circ\text{C}$ (berada di bawah ambang batas suhu minimal minuman panas layak konsumsi, yaitu 60°C). Sementara itu, kurva Zojirushi ($82,7^\circ\text{C}$) dan Hydro Flask ($80,1^\circ\text{C}$) masih kokoh bertahan di zona suhu panas prima, memberikan kesimpulan visual bahwa produk ekonomis telah kehilangan fungsi esensialnya sejak satu jam pertama pemakaian.

Secara visual, kurva Stanley Classic berada di bawah kurva Hydro Flask meskipun struktur bodi Stanley secara fisik jauh lebih tebal dan berat. Temuan visual ini mengonfirmasi adanya fenomena *thermal bridging* (jembatan panas) pada komponen penutup Stanley yang bermulut lebar. Keruntuhan lokal pada resistansi termal bagian penutup atas tersebut memaksa kurva Stanley tertekan ke bawah lebih cepat dibandingkan merek premium lainnya, membuktikan bahwa geometri komponen atas memegang peranan krusial dalam menentukan arah kelandaian kurva pendinginan jangka menengah.

3.7. Implikasi Ekonomi: Analisis Nilai-Performa

Evaluasi terhadap sebuah produk konsumen komersial tidak dapat dipisahkan dari aspek nilai ekonomi. Performa isolasi termal yang tinggi sering kali berbanding lurus dengan

tingginya biaya manufaktur yang berdampak pada harga jual di pasar retail. Oleh karena itu, untuk memberikan panduan keputusan yang objektif bagi konsumen serta parameter acuan bagi industri, sub-bab ini memperkenalkan metrik integratif baru bernama Indeks Efisiensi Retensi Panas (IERP).

IERP dihitung dengan mengintegrasikan nilai resistansi termal (kebalikan dari koefisien peluruhan atau $1/\kappa$) dengan rata-rata persentase efisiensi sisa suhu pada jam pertama (ERH_{60}) dan jam kedua (ERH_{120}) pengujian. Selanjutnya, nilai ekonomi diukur menggunakan parameter Rasio Performa-Biaya (*Cost-Performance Ratio* / CPR), yang diperoleh dengan membagi nilai IERP terhadap harga acuan pasar produk dalam satuan ratusan ribu rupiah.

Korelasi antara harga ekonomi dengan kemampuan fisis retensi termal mencerminkan kompleksitas biaya teknologi manufaktur yang diterapkan pada masing-masing produk. Zojirushi SX-CC45 mendominasi perolehan nilai IERP tertinggi, yaitu mencapai 395,0, diikuti oleh Hydro Flask (266,6) dan Stanley (188,3). Penyebab dari tingginya indeks performa ini adalah besarnya investasi biaya produksi untuk menerapkan tiga teknologi termal mutakhir secara simultan: pembuatan ruang hampa udara ekstrem melalui mesin evakuasi gas bertekanan ultra-rendah (*SuperVacuum* $< 10^{-4}$ Pa), pelapisan dinding interior perak mengkilap beremisivitas rendah ($\varepsilon < 0,05$), dan penggunaan komponen *seal ring* silikon sintetik berlapis ganda pada tutup wadah. Penerapan teknologi canggih tersebut berakibat pada pembatasan masif terhadap seluruh jalur perpindahan panas mikro (konduksi, konveksi, radiasi), sehingga nilai koefisien peluruhan (κ) dapat ditekan hingga titik terendah. Efeknya, efisiensi retensi panas pada jam pertama dan kedua tetap terjaga stabil di atas rentang aman kelayakan konsumsi ($> 60^\circ\text{C}$). Konsekuensi ekonominya, produsen harus menetapkan harga jual retail yang tinggi (merentang dari Rp450.000 hingga Rp650.000) untuk menutupi biaya investasi teknologi manufaktur premium tersebut.

Berdasarkan kalkulasi kuantitatif pada Tabel 3.1, nilai Rasio Performa-Biaya (CPR) tertinggi justru tidak dipegang oleh merek premium dengan IERP terbesar, melainkan diraih oleh Thermos Stainless dengan nilai 0,64. Fenomena ini terjadi karena adanya titik optimal kesetimbangan (*trade-off*) antara performa termal dengan harga pasar. Thermos Stainless menggunakan teknologi insulasi udara ganda standar yang efisien tanpa memerlukan proses pemampatan vakum tingkat tinggi yang mahal, sehingga mampu memotong harga jual hingga menjadi Rp180.000 saja. Meskipun kemampuan retensi termalnya berada di bawah Zojirushi (nilai IERP Thermos hanya 115,4), pemotongan harga yang masif tersebut berakibat pada lonjakan nilai efisiensi ekonomi (CPR) yang sangat kompetitif. Setiap rupiah yang dikeluarkan oleh konsumen untuk membeli Thermos Stainless memberikan pengembalian performa isolasi termal yang paling optimal per satuan biaya. Fenomena sebab-akibat ini membuktikan adanya segmentasi pasar di mana produk kategori menengah mampu memberikan nilai fungsionalitas yang paling efisien bagi konsumen dengan anggaran terbatas.

Generic Brand A dijual dengan harga yang sangat murah, yaitu Rp45.000, yang menghasilkan nilai CPR yang tampak tinggi sebesar 0,60 (hampir menyamai Zojirushi yang bernilai 0,61). Hubungan sebab-akibat fisis dari kondisi ini merupakan sebuah ilusi ekonomis. Penyebab murahnya harga produk adalah absennya seluruh teknologi insulasi termal, di mana produsen hanya merakit dua lapis plat logam murah yang menyisakan rongga udara biasa bertekanan atmosferik (1atm). Akibat mekanismenya, pertahanan termal produk langsung runtuh sejak jam pertama penggunaan. Nilai IERP Generic Brand A jatuh bebas ke titik terendah, yaitu hanya 27,0 akibat tingginya nilai koefisien peluruhan κ ($0,0127 \text{ menit}^{-1}$). Angka CPR yang tinggi murni didorong oleh penyebut harga yang sangat kecil, bukan karena kualitas produk.

Penelitian ini berhasil memperkenalkan Indeks Efisiensi Retensi Panas (IERP) sebagai metrik baru yang valid untuk menguji kualitas produk manufaktur wadah insulasi. Berbeda dengan pembacaan tabel suhu konvensional, IERP mampu menyatukan parameter kecepatan peluruhan ($1/\kappa$) dengan parameter kapasitas sisa termal jangka menengah (ERH_{60} dan ERH_{120}) ke dalam satu angka indeks tunggal, memberikan metode standardisasi yang objektif dan terukur bagi dunia akademik maupun industri.

Temuan utama penelitian memberikan rekomendasi praktis yang mutakhir bagi konsumen berdasarkan nilai CPR. Untuk pengguna yang mengutamakan ketahanan termal absolut untuk kebutuhan luar ruangan jangka panjang (> 5 jam), Zojirushi (CPR = 0,61) merupakan investasi terbaik karena tingginya nilai IERP murni dibarengi dengan efisiensi sisa yang tinggi. Namun, untuk penggunaan harian dalam ruang (perkantoran atau sekolah) dengan durasi retensi ≤ 2 jam, Thermos Stainless (CPR = 0,64) merupakan pilihan yang paling

cerdas karena memberikan nilai efisiensi pengembalian fungsi termal tertinggi per rupiah yang diinvestasikan.

Berdasarkan korelasi kuantitatif antara nilai IERP yang sangat rendah (27,0) dengan keruntuhan suhu air hingga menyentuh 41,5 °C pada menit ke-120, temuan utama penelitian ini merekomendasikan penolakan secara total terhadap penggunaan produk dengan insulasi udara biasa (seperti Generic Brand A) untuk penyimpanan minuman panas. Rendahnya harga beli tidak sebanding dengan hilangnya fungsi esensial penahan panas wadah, sehingga produk kategori ini dinilai tidak memiliki nilai ekonomi operasional (*zero operational value*) untuk kebutuhan cairan bersuhu tinggi.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis komparatif terhadap lima merek tumbler komersial di Indonesia menggunakan model Hukum Pendinginan Newton, dapat disimpulkan bahwa terdapat polarisasi performa termal yang sangat tajam antara teknologi *SuperVacuum* premium dengan insulasi udara biasa, di mana merek Zojirushi SX-CC45 terbukti memiliki kemampuan retensi panas terbaik dengan koefisien peluruhan (k) terkecil sebesar 0,0021 menit⁻¹ dan waktu paruh termal ($t_{1/2}$) mencapai 330,1 menit (5,5 jam), sehingga mampu mempertahankan efisiensi sisa suhu air tetap prima pada angka 76,2°C setelah 120 menit pengujian. Sebaliknya, Generic Brand A menunjukkan kinerja terburuk dengan nilai k terbesar (0,0127 menit⁻¹) dan waktu paruh hanya 54,6 menit, yang mengakibatkan suhu air jatuh bebas hingga menyentuh 41,5°C (suam-suam kuku) pada jam kedua akibat kebocoran masif transfer panas konduksi dan konveksi alami melalui medium udara internal bodi yang tidak divakum. Meskipun bodi luar tumbler melibatkan interaksi material komposit yang kompleks (logam, plastik, dan silikon), fitting kurva empiris secara konsisten menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang sangat tinggi merentang antara 0,9952 hingga 0,9994 dengan nilai *RMSE* yang sangat kecil (< 1,73°C), yang mengonfirmasi validitas, akurasi, dan presisi yang tinggi dari Hukum Pendinginan Newton sebagai parameter tunggal dalam memprediksi serta mengevaluasi karakteristik peluruhan termal transien pada sistem botol insulasi.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi: Raditya Bayu Herlambang dan Muhamad Safi'i; Metodologi: Raditya Bayu Herlambang; Perangkat Lunak: Raditya Bayu Herlambang; Validasi: Raditya Bayu Herlambang, Muhamad Safi'i, dan Althesa Androva; Analisis formal: Raditya Bayu Herlambang; Investigasi: Raditya Bayu Herlambang; Sumber daya: Raditya Bayu Herlambang; Kurasi data: Raditya Bayu Herlambang; Penulisan-persiapan draf asli: Raditya Bayu Herlambang; Penulisan-peninjauan dan penyuntingan: Muhamad Safi'i dan Althesa Androva; Visualisasi: Raditya Bayu Herlambang; Supervisi: Muhamad Safi'i; Administrasi proyek: Althesa Androva; Akuisisi pendanaan: Raditya Bayu Herlambang dan Muhamad Safi'i.

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data pendukung hasil penelitian ini telah disertakan secara lengkap di dalam artikel dalam bentuk tabel dan gambar. Kumpulan data mentah (*raw data*) hasil pengukuran termokopel dan citra termal yang dianalisis selama penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang, atas dukungan teknis, penyediaan fasilitas ruang terkontrol, serta instrumen pengujian selama eksperimen *Water Boiling Test* (WBT) ini berlangsung. Penulis juga menyatakan bahwa tidak ada perangkat kecerdasan buatan (AI) yang digunakan dalam proses analisis data eksperimen maupun penyusunan konten naskah ini.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Referensi

- [1] Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- [2] Haryanto, B., & Dewi, S. (2021). Persepsi konsumen terhadap kualitas tumbler di Jawa Tengah: Studi deskriptif. *Jurnal Manajemen Konsumen Indonesia*, 8(2), 112–125. <https://doi.org/10.22146/jmki.58321>
- [3] Holman, J. P. (2010). *Heat transfer* (10th ed.). McGraw-Hill.
- [4] Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- [5] Kumar, R., Singh, P., & Gupta, A. (2022). Finite element analysis of thermal distribution in double-wall insulated tumblers. *International Journal of Thermal Sciences*, 172, 107301. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107301>
- [6] Lee, J. H., & Park, S. Y. (2023). IoT-enabled real-time temperature monitoring and Newton's cooling model prediction for smart insulated containers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 349, 114065. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.114065>
- [7] Nugraha, A., & Pratiwi, R. (2020). Evaluasi performa termal botol minum vacuum-insulated di kalangan mahasiswa: Kajian eksperimental. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 16(3), 87–94. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v16i3.7812>
- [8] Patel, K. N., & Shah, M. R. (2019). Thermal insulation performance of industrial water storage tanks: An experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, 152, 478–487. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.071>
- [9] Rahmawati, N., Kusuma, D. A., & Firmansyah, E. (2023). Meta-analisis koefisien peluruhan panas pada wadah minuman: Tinjauan sistematis 24 studi eksperimental. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, 19(1), 45–60. <https://doi.org/10.15294/jpfi.v19i1.34122>
- [10] Rodrigues, A. F., Almeida, P. C., & Ferreira, J. M. (2016). Experimental verification of Newton's law of cooling in ceramic and stainless-steel containers. *European Journal of Physics*, 37(3), 035102. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/37/3/035102>
- [11] Santoso, H., & Wijaya, T. (2022). Comparative thermal performance of stainless steel, titanium, and aluminium tumblers. *Materials Today: Proceedings*, 63, 228–234. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.081>
- [12] Sukardi, M., & Lestari, F. (2021). Karakteristik perpindahan panas pada botol minum stainless steel double-wall: Studi eksperimental dan numerik. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(1), 33–42. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.01.4>
- [14] Tran, V. H., Nguyen, Q. D., & Le, T. B. (2022). Thermal performance comparison of vacuum-insulated versus air-insulated beverage containers under tropical climate conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, 102303. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102303>
- [15] Wahyudi, I., & Setiawan, A. R. (2020). Penerapan model pendinginan Newton pada analisis performa termal wadah minuman: Pendekatan eksperimental-numerik. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 16(2), 154–162. <https://doi.org/10.35580/jspf.v16i2.14329>
- [16] Widodo, S., Pratomo, A., & Utomo, B. (2023). Analisis ketahanan termal berbagai produk tumbler lokal dan impor di Indonesia menggunakan metode pengukuran langsung. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 33(2), 189–198. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2023.33.2.189>
- [17] Xia, L., Wu, Y., & Chen, K. (2022). Effect of lid design on heat loss in insulated beverage bottles: Experimental and CFD analysis. *Journal of Food Engineering*, 315, 110804. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110804>
- [18] Yuliaty, L., Handayani, W., & Purnomo, A. (2021). Model matematika pendinginan Newton pada sistem botol termos: Validasi eksperimental dan analisis sensitivitas parameter. *Jurnal Matematika dan Sains*, 26(2), 78–89. <https://doi.org/10.5614/jms.2021.26.2.5>
- [19] Zhang, Y., Liu, H., & Wang, C. (2021). Three-component thermal model for beverage container heat loss: Lid, wall, and bottom contributions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 122, 105147. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105147>
- [20] World Health Organization. (2023). Household air pollution and health: Key facts. WHO Global Health Observatory. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>