

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Analisis Perpindahan Panas pada Material Baja dan Aluminium untuk Aplikasi Pertahanan Menggunakan Metode Beda Hingga

Heat Transfer Analysis on Steel and Aluminum Materials for Defense Applications Using the Finite Difference Method

Nalom Parasian Sianipar*, Sovian Aritonang
*Program Studi Matematika, Universitas Pertahanan, Indonesia

nalomparasians@gmail.com*

Abstract

This study compares one-dimensional transient heat conduction in AISI 1018 steel and 6061-T6 aluminium for preliminary assessment of thermal behavior in defense engineering. The heat diffusion equation was solved using the explicit forward-time central-space (FTCS) finite difference method. A 0.10 m slab had an initial temperature of 25 °C, with left and right boundary temperatures of 100 °C and 25 °C. Simulations ran for 30 s using 51, 101, 201, and 401 spatial nodes. A Fourier number of approximately 0.4 satisfied the explicit stability criterion. Numerical results were verified against an analytical Fourier-series solution; sensitivity to ±10% changes in thermal diffusivity was assessed analytically. At 401 nodes, midpoint temperatures were 31.0077 °C for steel and 56.3161 °C for aluminium, with maximum analytical-reference errors of 0.000588 °C and 0.000123 °C, respectively. Aluminium heated faster because of its higher thermal diffusivity. Grid refinement reduced errors and strengthened agreement with the analytical solution. Thus, FTCS supports preliminary comparisons of temperature distribution and thermal response. This study assumes one-dimensional conduction and constant thermophysical properties, without experimental validation or representation of complex defense operating conditions.

Keywords: *Aluminium, Finite Difference Method, Heat Conduction, Steel, Thermal Diffusivity*

Abstrak

Penelitian ini menganalisis konduksi panas transien satu dimensi pada baja AISI 1018 dan aluminium 6061-T6 sebagai kajian awal perilaku termal material untuk rekayasa pertahanan. Persamaan difusi panas diselesaikan secara numerik menggunakan metode beda hingga eksplisit forward-time central-space (FTCS). Pelat sepanjang 0,10 m memiliki temperatur awal 25 °C, batas kiri 100 °C, dan batas kanan 25 °C. Simulasi dilakukan hingga 30 detik dengan 51, 101, 201, dan 401 titik spasial serta bilangan Fourier sekitar 0,4 untuk memenuhi syarat kestabilan. Hasil numerik diverifikasi menggunakan solusi analitik deret Fourier, sedangkan sensitivitas terhadap perubahan difusivitas termal ±10% dihitung secara analitik. Pada 401 titik, temperatur tengah baja mencapai 31,0077 °C dan aluminium 56,3161 °C. Galat maksimum terhadap solusi analitik masing-masing sebesar 0,000588 °C dan 0,000123 °C. Aluminium memanas lebih cepat karena difusivitas termalnya lebih tinggi. Peningkatan resolusi spasial menurunkan galat dan memperkuat kesesuaian hasil FTCS dengan solusi analitik. Metode FTCS dapat digunakan untuk analisis awal distribusi temperatur dan perbandingan respons termal kedua material. Perbandingan dilakukan pada kondisi batas dan waktu pengamatan yang sama, sehingga perbedaan respons temperatur terutama mencerminkan pengaruh parameter termal masing-masing material dalam model. Kajian ini terbatas pada model satu dimensi dengan sifat termofisika konstan, tanpa validasi eksperimen maupun pemodelan kondisi operasional pertahanan yang kompleks.

Kata Kunci: Aluminium, Baja, Difusivitas Termal, Konduksi Panas, Metode Beda Hingga

Penulis Korespondensi: Nalom Parasian Sianipar

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

I. PENDAHULUAN

Penggunaan material logam pada komponen rekayasa menuntut pemahaman terhadap perubahan temperatur selama pengoperasian. Pada konteks aplikasi pertahanan, komponen dapat mengalami pemanasan akibat kondisi lingkungan atau sumber panas di sekitarnya, sehingga distribusi temperatur di dalam material menjadi salah satu aspek yang perlu diperhitungkan pada tahap analisis awal. Perbedaan temperatur antarbagian komponen menimbulkan perpindahan energi melalui konduksi dan menghasilkan respons termal yang berkembang terhadap waktu. Oleh karena itu, pemodelan konduksi panas transien diperlukan untuk menggambarkan bagaimana temperatur berubah di dalam material ketika kondisi termalnya tidak seragam. Analisis ini memberikan informasi mengenai respons termal, tetapi tidak dengan sendirinya membuktikan kekuatan mekanik, ketahanan balistik, ataupun kelayakan suatu material untuk digunakan pada sistem pertahanan (Carslaw & Jaeger, 1959).

Baja dan aluminium memiliki karakteristik termofisika yang berbeda sehingga dapat memperlihatkan respons temperatur yang tidak sama ketika menerima kondisi pemanasan serupa. Dalam model konduksi satu dimensi dengan sifat material dianggap konstan, perubahan temperatur dipengaruhi oleh difusivitas termal, yaitu $\alpha = k/(\rho c_p)$, dengan k menyatakan konduktivitas termal, ρ massa jenis, dan c_p kalor jenis. Besaran tersebut menggambarkan hubungan antara kemampuan material menghantarkan energi panas dan kemampuan menyimpan energi termal. Karena itu, perbandingan baja AISI 1018 dan aluminium 6061-T6 perlu dilakukan dengan panjang pelat, kondisi awal, kondisi batas, dan waktu pengamatan yang sama agar perbedaan hasil terutama mencerminkan parameter termofisika yang digunakan. Nilai parameter dalam kajian komputasional tetap harus diperlakukan sebagai asumsi model apabila belum diperoleh dari pengukuran yang konsisten pada rentang temperatur yang diteliti.

Penyelesaian persamaan konduksi panas dapat diperoleh secara analitik pada geometri dan kondisi batas tertentu. Namun, pendekatan numerik tetap penting karena memungkinkan distribusi temperatur dihitung pada sejumlah titik ruang dan waktu serta memberikan kesempatan untuk menguji pengaruh ukuran grid terhadap ketelitian solusi. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah metode beda hingga, yang mengganti turunan dalam persamaan diferensial dengan aproksimasi pada grid diskret (Özışık, 1994). Pada persamaan panas, pemilihan skema waktu dan ruang berkaitan erat dengan kestabilan dan galat numerik. Kovács (2020) serta Kovács, Nagy, dan Saleh (2021) membahas pengembangan skema eksplisit yang stabil, sedangkan Kareem Jalghaf, Omle, dan Kovács (2022a) serta Kareem Jalghaf, Kovács, dan Bolló (2022a) membandingkan pendekatan integrasi waktu untuk persoalan perpindahan panas pada dinding. Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketelitian dan karakteristik kestabilan harus diperhatikan ketika suatu metode numerik digunakan untuk memprediksi respons termal.

Kajian konduksi panas numerik juga berkembang pada persoalan dengan karakteristik fisik dan komputasi yang lebih kompleks. Kareem Jalghaf, Kovács, Barna, dan Mátyás (2023) mengkaji penyelesaian analitik dan numerik pada benda berbentuk silinder dan bola, sedangkan Omle, Askar, Kovács, dan Bolló (2023) mengevaluasi kinerja metode numerik untuk simulasi perpindahan panas jangka panjang pada dinding dengan jembatan termal. Ba dan Wang (2023) menggunakan pendekatan spektral dengan reduksi orde untuk persoalan perpindahan panas transien. Meskipun memberikan gambaran mengenai perkembangan metode komputasi, kajian tersebut memiliki geometri, pendekatan, atau kondisi fisik yang berbeda dari perbandingan pelat baja dan aluminium satu dimensi yang diteliti di sini. Karena itu, hasil penelitian terdahulu tidak dapat langsung digunakan sebagai validasi nilai temperatur kedua material dalam model penelitian ini.

Perkembangan metode numerik juga memperlihatkan perluasan model di luar persamaan Fourier klasik dengan sifat konstan. Brociek, Hetmaniok, dan Słota (2024) membahas konduksi panas dengan turunan fraksional serta parameter yang bergantung pada temperatur, sedangkan Coronel, Lozada, Berres, Huancas, dan Murúa

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

(2024) mengkaji model tiga-fase-lag. Untuk masalah konduksi multilapis nonlinear, Filipov dan Hristov (2026) menggunakan diskretisasi Euler implisit dan linearisasi Newton; Murúa, Coronel, Tello, Berres, dan Huancas (2024) menelaah percepatan komputasi pada simulasi konduksi tiga lapis. Penelitian-penelitian tersebut memperluas cakupan pemodelan, tetapi tidak secara langsung memverifikasi skema FTCS satu dimensi dengan parameter konstan yang digunakan di sini.

Dari sisi pengembangan diskretisasi, Dimitrov, Georgiev, dan Todorov (2024) membangun aproksimasi turunan dan mengkaji penerapannya pada persamaan difusi panas, sementara Liu dan Tong (2026) meneliti skema beda hingga kompak orde empat untuk persamaan konduksi dua dimensi. Li dan Jiang (2026) membahas perpindahan panas dengan sumber panas bergerak, sedangkan Tan, Shih, Shen, dan Chen (2025) menelaah masalah konduksi panas sideways yang berkaitan dengan persoalan invers. Keempat kajian tersebut menjadi pembanding ruang lingkup, bukan dasar untuk mengklaim bahwa hasilnya berlaku pada masalah awal-batas maju dan homogen dalam penelitian ini.

Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi temperatur transien pada baja AISI 1018 dan aluminium 6061-T6 menggunakan metode beda hingga FTCS pada pelat satu dimensi; membandingkan hasil numerik dengan solusi analitik deret Fourier; mengevaluasi kecenderungan galat pada beberapa resolusi grid; serta menilai sensitivitas temperatur terhadap perubahan difusivitas termal sebesar ±10%. Kontribusi penelitian terletak pada penyajian perbandingan komputasional yang terkontrol dan disertai pemeriksaan ketelitian numerik, bukan pada pengembangan skema numerik baru atau pembuktian kelayakan material pertahanan. Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar analisis termal awal dan menunjukkan batas penggunaan model konduksi ideal sebelum dilakukan kajian material serta validasi fisik yang lebih lanjut.

Berdasarkan tinjauan tersebut, persoalan yang perlu dijawab dalam penelitian ini bukanlah apakah metode beda hingga merupakan metode baru, melainkan seberapa konsisten implementasi skema eksplisit forward-time central-space (FTCS) dalam membandingkan respons dua material pada model awal-batas yang identik. Untuk memperoleh hasil yang dapat ditelusuri, perbandingan temperatur perlu disertai pemeriksaan terhadap solusi analitik, penghalusan grid, dan pengujian sensitivitas parameter. Langkah-langkah tersebut membedakan kesalahan akibat diskretisasi dari perubahan prediksi yang timbul ketika nilai difusivitas termal diubah. Namun, verifikasi terhadap solusi analitik tetap berbeda dari validasi eksperimen karena keduanya menguji aspek yang berlainan.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui simulasi numerik konduksi panas transien satu dimensi untuk membandingkan baja AISI 1018 dan aluminium 6061-T6. Kedua material dimodelkan sebagai pelat homogen dengan panjang L = 0,10 m, serta diberi kondisi awal, kondisi batas, dan waktu pengamatan yang sama. Perbandingan dilakukan pada model ideal tanpa sumber panas internal, konveksi, radiasi, perubahan fase, atau perubahan sifat termofisika akibat temperatur. Oleh karena itu, hasil penelitian merepresentasikan perilaku model konduksi, bukan pengujian langsung komponen pertahanan.

Model matematis didasarkan pada hukum Fourier dan kekekalan energi, yaitu $\rho c_p(\partial T/\partial t) = k(\partial^2 T/\partial x^2)$, atau $\partial T/\partial t = \alpha(\partial^2 T/\partial x^2)$, dengan $\alpha = k/(\rho c_p)$. Besaran T menyatakan temperatur (°C), x posisi (m), t waktu (s), k konduktivitas termal [W/(m·K)], ρ massa jenis (kg/m³), c_p kalor jenis [J/(kg·K)], dan α difusivitas termal (m²/s). Temperatur awal bagian dalam pelat ditetapkan $T(x,0) = 25$ °C untuk $0 < x < L$. Setelah pemanasan dimulai, batas kiri dipertahankan pada $T(0,t) = 100$ °C dan batas kanan pada $T(L,t) = 25$ °C. Kondisi Dirichlet ini menyederhanakan proses pemanasan menjadi perubahan temperatur permukaan yang seketika.

Parameter termofisika yang digunakan sebagai masukan model adalah, untuk baja AISI 1018, k = 51,9 W/(m·K), ρ = 7.850 kg/m³, dan c_p = 486 J/(kg·K), sehingga $\alpha \approx 1{,}3604 \times 10^{-5}$ m²/s; untuk aluminium 6061-T6, k

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

= 167 W/(m·K), ρ = 2.700 kg/m³, dan c_p = 896 J/(kg·K), sehingga α ≈ 6,9031 × 10^{-5} m²/s. Nilai k dan c_p baja selaras dengan lembar data AISI 1018 MatWeb (n.d.-a), tetapi massa jenis pada lembar data tersebut adalah 7.870 kg/m³, bukan 7.850 kg/m³ yang digunakan dalam simulasi. Oleh karena itu, ρ baja sebesar 7.850 kg/m³ secara eksplisit dipertahankan sebagai asumsi model yang telah diaudit, bukan sebagai angka identik dari datasheet. Ketiga parameter aluminium sesuai dengan nilai tipikal lembar data 6061-T6/6061-T651 (MatWeb, n.d.-b). Nilai k aluminium dicantumkan pada sekitar 25 °C, sedangkan c_p baja pada lembar data dinyatakan untuk kondisi sekitar atau di atas 100 °C. Karena temperatur dalam pelat berubah dari 25 hingga 100 °C, seluruh parameter konstan diperlakukan sebagai pendekatan representatif, bukan hasil karakterisasi sifat material pada setiap temperatur.

Persamaan diferensial didiskretisasi dengan metode forward-time central-space (FTCS). Domain dibagi menjadi N titik dengan $x_i = i\Delta x$ dan $\Delta x = L/(N-1)$. Untuk setiap titik interior, temperatur diperbarui menurut $T_i^{n+1} = T_i^n + Fo(T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n)$, dengan $Fo = \alpha\Delta t/(\Delta x)^2$. Superskrip n menyatakan tingkat waktu, sedangkan subskrip i menyatakan posisi grid. Temperatur pada kedua ujung pelat ditetapkan kembali pada setiap langkah sesuai kondisi batas. Untuk menjaga kestabilan skema eksplisit satu dimensi, langkah waktu dipilih sehingga $Fo \leq 0{,}4$, lebih kecil daripada batas teoretis $Fo \leq 0{,}5$ (Özışık, 1994; Kovács, 2020).

Simulasi dilakukan sampai t = 30 s menggunakan N = 51, 101, 201, dan 401 titik; masing-masing menghasilkan Δx = 0,002; 0,001; 0,0005; dan 0,00025 m. Nilai Δt dihitung secara terpisah untuk setiap material dan resolusi berdasarkan difusivitas serta batas Fo yang ditetapkan. Jika langkah terakhir melewati waktu pengamatan, langkah tersebut disesuaikan agar solusi dievaluasi tepat pada t = 30 s. Keluaran utama berupa profil temperatur sepanjang pelat dan temperatur pada titik tengah x = L/2. Penggunaan beberapa resolusi bertujuan menguji perubahan galat akibat penghalusan grid, bukan mengestimasi orde akurasi ruang secara terpisah dari waktu.

Verifikasi numerik menggunakan solusi analitik deret Fourier untuk persoalan awal-batas yang sama (Carslaw & Jaeger, 1959). Solusi dituliskan $T(x,t) = T_s(x) + \Sigma_{m=1}^{M} b_m \sin(m\pi x/L) \exp[-\alpha(m\pi/L)^2 t]$, dengan $T_s(x) = 100 - 75x/L$ dan $b_m = -150/(m\pi)$. Deret dipotong pada M = 400 suku. Perbedaan solusi numerik dan analitik dihitung pada titik grid dan waktu yang sama menggunakan galat maksimum $E_{max} = \max_i|T_{i,num} - T_{i,analitik}|$ dan akar rerata kuadrat galat $RMSE = \sqrt{[(1/N)\Sigma_i(T_{i,num} - T_{i,analitik})^2]}$. Penurunan galat pada grid yang lebih rapat digunakan sebagai indikator konsistensi implementasi numerik.

Analisis sensitivitas dilakukan dengan mengubah α sebesar −10% dan +10% dari nilai dasar untuk masing-masing material, sementara geometri, temperatur awal, kondisi batas, dan waktu pengamatan dijaga tetap. Temperatur titik tengah pada t = 30 s dihitung menggunakan solusi analitik deret Fourier untuk setiap nilai α. Karena itu, hasil sensitivitas bukan keluaran dari simulasi FTCS tambahan; analisis ini mengukur kepekaan prediksi model terhadap difusivitas termal, bukan ketidakpastian eksperimen.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Hasil penelitian disajikan untuk waktu pengamatan t = 30 s pada pelat sepanjang 0,10 m, dengan temperatur awal interior 25 °C, batas kiri 100 °C, dan batas kanan 25 °C. Evaluasi mencakup respons temperatur di titik tengah, kesesuaian FTCS terhadap solusi analitik deret Fourier, pengaruh penghalusan grid, serta sensitivitas terhadap perubahan difusivitas termal. Semua hasil merupakan keluaran model konduksi satu dimensi dengan sifat material konstan.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

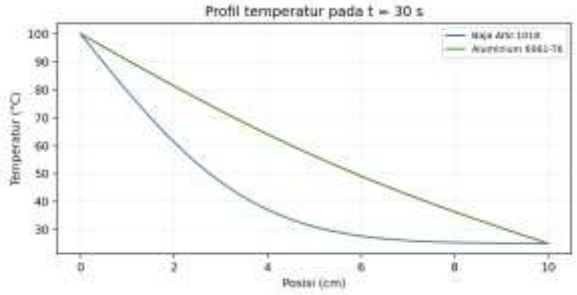
Tabel 1. Temperatur titik tengah dan galat maksimum FTCS terhadap solusi analitik pada t = 30 s.

Material	N	T tengah (°C)	Galat maks (°C)
Baja	51	31.0164	0.037440
Baja	101	31.0097	0.009405
Baja	201	31.0081	0.002353
Baja	401	31.0077	0.000588
Al	51	56.3238	0.007851
Al	101	56.3179	0.001964
Al	201	56.3164	0.000491
Al	401	56.3161	0.000123

Galat maksimum baja berkurang dari 0,037440 °C pada N = 51 menjadi 0,000588 °C pada N = 401; untuk aluminium berkurang dari 0,007851 °C menjadi 0,000123 °C. Ketika jumlah interval digandakan (51→101→201→401 titik), galat maksimum turun mendekati seperempat nilai sebelumnya pada kedua material. Pola tersebut menunjukkan kecenderungan konvergensi sekitar orde dua terhadap ukuran grid pada rangkaian simulasi ini, dengan langkah waktu yang juga diperkecil agar bilangan Fourier tetap sekitar 0,4. Karena perubahan Δx dan Δt berlangsung bersamaan, hasil ini tidak mengisolasi orde kesalahan ruang dan waktu secara terpisah. Kecenderungan tersebut diperlihatkan pada Gambar 2; sumbu vertikal menggunakan skala logaritmik agar penurunan galat pada kedua material dapat dibandingkan.

Berdasarkan Tabel 1, temperatur titik tengah baja turun dari 31,0164 °C (N = 51) menjadi 31,0077 °C (N = 401), sedangkan aluminium turun dari 56,3238 °C menjadi 56,3161 °C. Nilai pembanding analitik pada titik tengah adalah 31,0075 °C untuk baja dan 56,3159 °C untuk aluminium. Dengan demikian, pada resolusi terhalus temperatur tengah aluminium sekitar 25,31 °C lebih tinggi daripada baja, meskipun kondisi awal dan batas kedua material sama. Perbedaan ini merupakan hasil perhitungan model dengan parameter yang ditetapkan, bukan hasil pengukuran laboratorium.

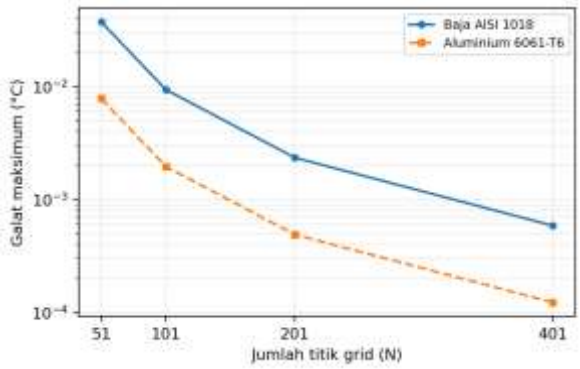
Profil temperatur sepanjang pelat untuk kedua material pada t = 30 s ditampilkan pada Gambar 1. Garis numerik dan analitik berdekatan pada resolusi yang digunakan untuk visualisasi; hal ini konsisten dengan besarnya galat yang dilaporkan dalam Tabel 1. Temperatur menurun dari sisi panas menuju sisi dingin, tetapi distribusinya berbeda karena difusivitas termal masing-masing material tidak sama.



Gambar 1. Profil temperatur numerik FTCS dan solusi analitik pada t = 30 s.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



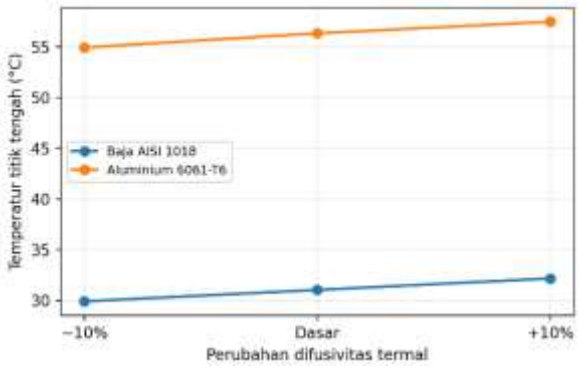
Gambar 2. Penurunan galat maksimum FTCS terhadap solusi analitik pada t = 30 s untuk empat resolusi grid (skala logaritmik).

Tabel 2. Sensitivitas temperatur titik tengah terhadap perubahan difusivitas termal (solusi analitik, t = 30 s).

Material	−10% α	Dasar	+10% α
Baja	29.880	31.008	32.139
Al	54.914	56.316	57.459

Tabel 2 menggunakan solusi analitik untuk menilai pengaruh perubahan α sebesar −10% dan +10% dari kondisi dasar, bukan hasil perhitungan ulang FTCS. Pada baja, temperatur tengah berubah dari 29,880 °C menjadi 32,139 °C, dibandingkan nilai dasar 31,008 °C. Pada aluminium, rentangnya 54,914–57,459 °C, dibandingkan nilai dasar 56,316 °C. Secara relatif terhadap nilai dasar, penurunan α sebesar 10% menurunkan temperatur tengah sekitar 1,127 °C (baja) dan 1,402 °C (aluminium), sedangkan kenaikan α sebesar 10% menaikkan temperatur masing-masing sekitar 1,131 °C dan 1,143 °C. Respons tidak harus simetris karena hubungan temperatur transien dengan α bersifat nonlinear.

Perbandingan sensitivitas temperatur titik tengah pada kedua material divisualisasikan dalam Gambar 3. Grafik ini dibangun dari hasil solusi analitik yang sama dengan Tabel 2, sehingga tidak menunjukkan keluaran FTCS tambahan. Pada rentang variasi yang diuji, temperatur titik tengah meningkat ketika difusivitas termal dinaikkan.



Gambar 3. Sensitivitas temperatur titik tengah baja AISI 1018 dan aluminium 6061-T6 terhadap variasi difusivitas termal ±10% pada t = 30 s (solusi analitik).

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

2. Pembahasan

Perbedaan respons termal kedua material pada Tabel 1 dan Gambar 1 terutama dijelaskan oleh difusivitas termal, $\alpha = k/(\rho c_p)$, yang menyatakan perbandingan kemampuan menghantarkan panas terhadap kapasitas menyimpan energi panas per satuan volume. Dengan parameter yang digunakan, α aluminium 6061-T6 ($6{,}9031 \times 10^{-5}$ m²/s) sekitar 5,07 kali α baja AISI 1018 ($1{,}3604 \times 10^{-5}$ m²/s). Pada waktu pengamatan 30 s dan kondisi awal-batas identik, pengaruh batas panas karena itu telah menjalar lebih jauh ke bagian dalam pelat aluminium. Temperatur titik tengah pada grid terhalus mencapai 56,3161 °C untuk aluminium dan 31,0077 °C untuk baja, dengan selisih sekitar 25,31 °C. Temuan ini tidak berarti bahwa aluminium selalu lebih baik dalam semua aplikasi termal: arah perpindahan panas, kebutuhan isolasi, kekuatan mekanik, dan kondisi lingkungan turut menentukan kesesuaian material dalam rancangan nyata.

Bentuk profil pada Gambar 1 menunjukkan keadaan transien, bukan distribusi tunak. Walaupun temperatur kedua ujung ditetapkan konstan, interior pelat masih menyesuaikan diri terhadap perubahan temperatur batas kiri yang diberlakukan secara mendadak. Solusi analitik dan FTCS memperlihatkan profil yang saling berdekatan pada waktu yang sama. Kesesuaian visual tersebut perlu dibaca bersama galat kuantitatif pada Tabel 1; garis yang tampak berhimpit pada skala gambar saja tidak cukup untuk membuktikan akurasi numerik. Karena nilai parameter dianggap konstan, interpretasi ini hanya berlaku dalam kerangka persamaan difusi panas linear satu dimensi yang dipakai dalam penelitian.

Tabel 1 dan Gambar 2 memberikan bukti verifikasi numerik yang lebih kuat. Pada baja, galat maksimum berkurang dari 0,037440 °C (N = 51) menjadi 0,000588 °C (N = 401), atau sekitar 63,7 kali lebih kecil. Pada aluminium, galat menurun dari 0,007851 °C menjadi 0,000123 °C, atau sekitar 63,8 kali lebih kecil. Ketika Δx dibagi dua, galat maksimum pada kedua material mendekati seperempat nilai sebelumnya. Perilaku ini konsisten dengan galat global berorde sekitar $O(\Delta x^2)$ untuk rangkaian penghalusan yang menggunakan Fo mendekati konstan: pada skema FTCS, galat diskretisasi ruang $O(\Delta x^2)$ dan waktu $O(\Delta t)$, sementara Δt berbanding dengan Δx^2 apabila Fo dipertahankan. Oleh sebab itu, pengamatan tersebut tidak membuktikan orde waktu dan orde ruang secara terpisah, melainkan kecenderungan konvergensi gabungan. Hal ini sejalan dengan pentingnya pengendalian kestabilan pada skema eksplisit yang dibahas oleh Kovács (2020) dan Kovács, Nagy, dan Saleh (2021).

Perlu dibedakan antara besar galat numerik dan kecepatan respons termal. Galat maksimum aluminium pada setiap resolusi lebih kecil daripada baja, tetapi hal ini tidak dapat ditafsirkan bahwa metode FTCS secara umum lebih akurat untuk semua jenis aluminium. Besarnya galat juga bergantung pada bentuk solusi, difusivitas, waktu pengamatan, kondisi batas, serta hubungan Δt terhadap Δx. Kedua material dihitung dengan syarat kestabilan yang sama, tetapi nilai Δt aktual berbeda karena α berbeda. Dengan demikian, perbandingan galat pada penelitian ini berlaku untuk konfigurasi pengujian yang dilaporkan dan tidak merupakan peringkat universal ketelitian metode berdasarkan jenis material.

Analisis sensitivitas pada Tabel 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan difusivitas termal menaikkan temperatur titik tengah pada t = 30 s, ketika sisi kiri lebih panas daripada kondisi awal interior. Untuk baja, perubahan α sebesar −10% dan +10% menghasilkan temperatur 29,880 °C dan 32,139 °C, dibandingkan 31,008 °C pada kondisi dasar. Pada aluminium, temperatur yang bersesuaian adalah 54,914 °C dan 57,459 °C, dibandingkan 56,316 °C. Besar respons tidak persis simetris terhadap kondisi dasar, karena hubungan temperatur transien dengan α bersifat nonlinear melalui faktor eksponensial pada solusi deret Fourier. Selain itu, hasil sensitivitas ini dihitung dari solusi analitik, bukan dari tiga simulasi FTCS tambahan; fungsinya adalah menguji kepekaan prediksi model terhadap masukan α tanpa mencampurkannya dengan galat diskretisasi.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Implikasi praktis penelitian terbatas pada tahap penapisan awal karakteristik termal material. Untuk komponen rekayasa pertahanan yang membutuhkan penyebaran temperatur lebih cepat pada geometri dan kondisi pemanasan sejenis, difusivitas yang lebih besar dapat menjadi pertimbangan; sebaliknya, tujuan menahan rambatan panas dapat mengarah pada pertimbangan berbeda. Akan tetapi, model pelat homogen satu dimensi ini tidak memperhitungkan konveksi dan radiasi pada permukaan, kontak antarmaterial, variasi sifat termofisika terhadap temperatur, dimensi komponen nyata, maupun beban mekanik. Penelitian numerik pada dinding dengan jembatan termal oleh Kareem Jalghaf, Kovács, dan Bolló (2022a) serta Omle et al. (2023) memperlihatkan bahwa kompleksitas geometri dan kondisi perpindahan panas dapat memerlukan pendekatan pemodelan yang berbeda. Rujukan tersebut digunakan sebagai konteks metodologis, bukan sebagai validasi langsung terhadap prediksi baja dan aluminium dalam penelitian ini.

Akhirnya, kesesuaian FTCS dengan solusi analitik merupakan verifikasi perhitungan untuk masalah matematis yang sama, bukan validasi eksperimen. Audit lembar data menunjukkan bahwa parameter aluminium 6061-T6 merupakan nilai tipikal yang dapat ditelusuri, sedangkan untuk baja AISI 1018 nilai massa jenis model 7.850 kg/m³ berbeda sedikit dari 7.870 kg/m³ pada lembar data MatWeb. Nilai kalor jenis baja juga dilaporkan pada kondisi temperatur yang tidak mencakup seluruh rentang model. Oleh sebab itu, hasil numerik yang disajikan tetap sah untuk parameter input yang ditetapkan, tetapi belum membuktikan prediksi eksperimental pada spesimen baja atau aluminium nyata. Penelitian lanjutan perlu menguji ketergantungan k, ρ, dan c_p terhadap temperatur, menggunakan kondisi batas lebih realistis, dan membandingkan hasil dengan pengukuran.

IV. KESIMPULAN

Simulasi konduksi panas transien satu dimensi menggunakan skema beda hingga eksplisit forward-time central-space (FTCS) berhasil direproduksi dan diverifikasi terhadap solusi analitik deret Fourier pada kondisi awal dan batas yang ditetapkan. Pada t = 30 s dengan N = 401 titik grid, temperatur titik tengah baja AISI 1018 mencapai 31,0077 °C, sedangkan aluminium 6061-T6 mencapai 56,3161 °C. Perbedaan ini konsisten dengan difusivitas termal aluminium yang sekitar 5,07 kali difusivitas baja berdasarkan parameter masukan model. Ketika jumlah titik grid ditingkatkan dari 51 menjadi 401, galat maksimum terhadap solusi analitik turun dari 0,037440 menjadi 0,000588 °C untuk baja dan dari 0,007851 menjadi 0,000123 °C untuk aluminium. Penurunan tersebut menunjukkan konvergensi pada penghalusan gabungan ruang dan waktu dengan bilangan Fourier yang dipertahankan mendekati 0,4, bukan pengukuran orde akurasi ruang atau waktu secara terpisah. Analisis sensitivitas berbasis solusi analitik memperlihatkan bahwa perubahan difusivitas termal sebesar ±10% mengubah prediksi temperatur titik tengah kedua material secara tidak sepenuhnya simetris. Temuan ini mendukung penggunaan FTCS untuk kajian awal perbandingan respons termal pada model ideal, tetapi tidak menetapkan keunggulan material secara umum ataupun kelayakan komponen pertahanan. Sifat termofisika diperlakukan konstan dan representatif; khususnya massa jenis baja yang digunakan dalam simulasi berbeda sedikit dari nilai datasheet yang diperiksa. Oleh karena itu, verifikasi numerik ini belum merupakan validasi eksperimen. Penelitian berikutnya perlu menggunakan data sifat material yang sesuai rentang temperatur, kondisi batas dan geometri yang lebih realistis, serta pembandingan dengan hasil pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

Ba, Z. and Wang, Y. (2023) Numerical analysis of transient state heat transfer by spectral method based on POD reduced-order extrapolation algorithm. Applied Sciences, 13(11), 6665. https://doi.org/10.3390/app13116665

Brociek, R., Hetmaniok, E. and Słota, D. (2024) Numerical solution for the heat conduction model with a fractional derivative and temperature-dependent parameters. Symmetry, 16(6), 667. https://doi.org/10.3390/sym16060667

Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1959) Conduction of heat in solids (2nd ed.). Oxford University Press.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Coronel, A., Lozada, E., Berres, S., Huancas, F. and Murúa, N. (2024) Mathematical modeling and numerical approximation of heat conduction in three-phase-lag solid. Energies, 17(11), 2497. https://doi.org/10.3390/en17112497

Dimitrov, Y., Georgiev, S. and Todorov, V. (2024) First derivative approximations and applications. Fractal and Fractional, 8(10), 608. https://doi.org/10.3390/fractalfract8100608

Filipov, S. M. and Hristov, J. (2026) Nonlinear transient heat conduction in multilayer slabs: Implicit Euler time discretization and finite difference method with Newton linearization. Mathematics, 14(16), 2996. https://doi.org/10.3390/math14162996

Kareem Jalghaf, H., Kovács, E. and Bolló, B. (2022a) Comparison of old and new stable explicit methods for heat conduction, convection, and radiation in an insulated wall with thermal bridging. Buildings, 12(9), 1365. https://doi.org/10.3390/buildings12091365

Kareem Jalghaf, H., Kovács, E., Barna, I. F. and Mátyás, L. (2023) Analytical solution and numerical simulation of heat transfer in cylindrical- and spherical-shaped bodies. Computation, 11(7), 131. https://doi.org/10.3390/computation11070131

Kareem Jalghaf, H., Omle, I. and Kovács, E. (2022b) A comparative study of explicit and stable time integration schemes for heat conduction in an insulated wall. Buildings, 12(6), 824. https://doi.org/10.3390/buildings12060824

Kovács, E. (2020) New stable, explicit, first order method to solve the heat conduction equation. Journal of Computational and Applied Mechanics, 15(1), 3–13. https://doi.org/10.32973/jcam.2020.001

Kovács, E., Nagy, Á. and Saleh, M. (2021) A set of new stable, explicit, second order schemes for the non-stationary heat conduction equation. Mathematics, 9(18), 2284. https://doi.org/10.3390/math9182284

Li, J. and Jiang, Y. (2026) A partitioned finite difference method for heat transfer with moving line and plane heat sources. Entropy, 28(2), 179. https://doi.org/10.3390/e28020179

Liu, C. and Tong, X. (2026) Fourth-order compact finite-difference scheme with discrete sine transform for solving 2D heat conduction equation with DBCs. Mathematics, 14(6), 949. https://doi.org/10.3390/math14060949

MatWeb. (n.d.-a) AISI 1018 steel, hot rolled, 19–32 mm round [Material datasheet]. https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e589db903f884e619e18888723fa0ebd

MatWeb. (n.d.-b) Aluminum 6061-T6; 6061-T651 [Material datasheet]. https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6

Murúa, N., Coronel, A., Tello, A., Berres, S. and Huancas, F. (2024) GPU accelerating algorithms for three-layered heat conduction simulations. Mathematics, 12(22), 3503. https://doi.org/10.3390/math12223503

Omle, I., Askar, A. H., Kovács, E. and Bolló, B. (2023) Comparison of the performance of new and traditional numerical methods for long-term simulations of heat transfer in walls with thermal bridges. Energies, 16(12), 4604. https://doi.org/10.3390/en16124604

Özışık, M. N. (1994) Finite difference methods in heat transfer. CRC Press.

Tan, C.-C., Shih, C.-F., Shen, J.-H. and Chen, Y.-W. (2025) A time–space numerical procedure for solving the sideways heat conduction problem. Mathematics, 13(5), 751. https://doi.org/10.3390/math13050751

Wang, F., Liu, Y.-C. and Zheng, H. (2022) A localized method of fundamental solution for numerical simulation of nonlinear heat conduction. Mathematics, 10(5), 773. https://doi.org/10.3390/math10050773