SAINMATIKA UNJA

Jurnal Sains dan Matematika Universitas Jambi
Vol. 6 No.1 Juni 2025
ISSN: 1979-0910
https://online-journal.unja.ac.id/sainmatika

SIMULASI PERAMBATAN ENERGI PANAS PADA SISTEM 1D DAN 2D MENGGUNAKAN METODE *FINITE DIFFERENCE*

Tugiyo Aminoto[1]

[1] Prodi Fisika, Universitas Jambi, Kampus Mendalo Jambi, 36361, Indonesia

Corresponding email: tugiyo@unja.ac.id

Article Info:
Published: 30–06–2025

Keywords:
format, manuscript, writing guidelines

***Abstract**: This study aims to simulate the heat spread process numerically in one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) media using the Finite Difference Time Domain (FDTD) method of explicit type or Forward Time Centered Space (FTCS). This method is used to solve partial differential equations of heat conduction phenomena by discretizing the space and time domains into small grids. The simulation was carried out using the Python programming language, with parameters that were varied including thermal conductivity, grid size, and time duration. The initial condition was set as a heat source in the center of the domain, while the boundary conditions were determined to be fixed (Dirichlet) with a temperature of zero degrees across the edges. The simulation results show that this method is able to model heat spread realistically, where the temperature spreads evenly from the center to the entire area over time. Visualization is done in the form of temperature graphs and color maps (heatmaps), which strengthen the understanding of the concept of thermal diffusion physics. This simulation also shows great potential as a learning aid in basic physics, thermodynamics, and numerical methods courses.*
***Keywords:** simulation, heat distribution, finite difference method, differential equations, conceptual understanding*

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan proses penyebaran panas secara numerik pada medium satu dimensi (1D) dan dua dimensi (2D) menggunakan metode Finite Difference Time Domain (FDTD) tipe eksplisit atau Forward Time Centered Space (FTCS). Metode ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial dari fenomena konduksi panas dengan mendiskretisasi domain ruang dan waktu menjadi grid-grid kecil. Simulasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python, dengan parameter yang divariasikan meliputi konduktivitas termal, ukuran grid, dan durasi waktu. Kondisi awal ditetapkan berupa sumber panas di tengah domain, sedangkan kondisi batas ditentukan tetap (Dirichlet) dengan suhu nol derajat di seluruh tepi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini mampu memodelkan penyebaran panas secara realistis, di mana suhu menyebar secara merata dari pusat ke seluruh area seiring waktu. Visualisasi dilakukan dalam bentuk grafik suhu dan peta warna (heatmap), yang memperkuat pemahaman konsep fisika difusi termal. Simulasi ini juga menunjukkan potensi besar sebagai media bantu pembelajaran pada mata kuliah fisika dasar, termodinamika, dan metode numerik.
Kata kunci: simulasi, penyebaran panas, metode beda hingga, persamaan diferensial, pemahaman konsep

PENDAHULUAN

Pemodelan perpindahan panas merupakan aspek penting dalam berbagai bidang teknik dan fisika, seperti teknik mesin, elektronika, dan ilmu material. Salah satu bentuk dasar dari fenomena ini adalah penyebaran panas satu dimensi (1D) dalam suatu medium homogen. Studi terhadap fenomena ini memberikan pemahaman fundamental mengenai difusi panas, yang dapat dijadikan dasar dalam memodelkan sistem yang lebih kompleks, termasuk sistem multi-dimensi atau sistem dengan batas tidak homogen (Incropera et al., 2007).

Persamaan yang umum digunakan untuk mendeskripsikan penyebaran panas dalam medium adalah persamaan difusi panas (heat equation), yang merupakan persamaan diferensial parsial (PDE) parabolik. Penyelesaian analitik dari persamaan ini hanya mungkin dilakukan untuk kondisi batas dan awal yang sangat ideal, sedangkan pada kasus riil sering kali diperlukan pendekatan numerik (Patankar, 1980).

Salah satu metode numerik yang banyak digunakan dalam menyelesaikan masalah perpindahan panas adalah metode beda hingga (Finite Difference Method/FDM). Metode ini bekerja dengan mendiskretisasi domain ruang dan waktu menjadi grid-grid kecil dan menyelesaikan persamaan diferensial dalam bentuk aljabar (Chapra & Canale, 2015). Pada penelitian ini digunakan pendekatan eksplisit (Forward Time Centered Space/FTCS), yang memiliki kelebihan dari sisi kesederhanaan implementasi dan efisiensi komputasi untuk kasus 1D. Namun, pendekatan ini sangat bergantung pada kondisi stabilitas numerik, yang dikendalikan oleh bilangan Fourier (Fo), agar solusi tetap konvergen.

Pemodelan numerik perpindahan panas telah lama menjadi perhatian dalam fisika dan teknik, terutama untuk memahami perilaku konduksi termal dalam berbagai material dan sistem. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah metode Finite Difference, khususnya dalam skema eksplisit seperti FTCS (Forward Time Centered Space), yang dikenal karena kemudahannya dalam implementasi dan efisiensinya dalam memodelkan masalah linier sederhana (Incropera & DeWitt, 2002). Metode ini bekerja dengan melakukan diskretisasi domain ruang dan waktu untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial yang menggambarkan difusi panas, seperti Persamaan Panas 1D atau 2D.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengembangkan simulasi penyebaran panas menggunakan pendekatan numerik. Misalnya, penelitian oleh Zhang et al. (2017) mengaplikasikan metode ini dalam simulasi sistem pendinginan elektronik, sedangkan studi oleh Ramadhan & Rini (2020) menggunakan metode numerik untuk memperkirakan distribusi suhu pada sistem pelat logam. Di bidang pendidikan, pendekatan ini juga digunakan untuk membantu visualisasi konsep difusi panas dan meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap dinamika termal (Yulianto et al., 2021).

Meskipun metode Finite Difference telah banyak diterapkan dalam berbagai studi, masih terdapat kekurangan dalam penyajian visual interaktif dan integrasi metode ini ke dalam proses pembelajaran berbasis komputasi yang mudah diakses. Banyak simulasi bersifat statis atau hanya digunakan dalam konteks teknik, bukan sebagai alat bantu belajar untuk memahami dasar-dasar perpindahan panas. Selain itu, sebagian besar literatur fokus pada kasus lanjutan tanpa menekankan pada dasar-dasar numerik dan visualisasi evolusi suhu dari waktu ke waktu, terutama untuk kasus sederhana 1D dan 2D.

Penelitian ini menawarkan solusi melalui pengembangan simulasi numerik berbasis Python dengan pendekatan Finite Difference eksplisit untuk kasus 1D dan 2D. Dengan menyederhanakan model dan menekankan visualisasi dinamis, pendekatan ini tidak hanya memenuhi fungsi akademik dalam validasi numerik, tetapi juga berpotensi besar sebagai media pembelajaran interaktif. Simulasi ini dapat digunakan dalam mata kuliah fisika dasar, termodinamika, atau metode numerik untuk membantu mahasiswa memahami prinsip difusi panas dan keterkaitan antara aspek fisis dan matematis dari suatu fenomena.

Penelitian ini bertujuan untuk menyimulasikan penyebaran panas satu dimensi dan dua dimensi menggunakan metode Finite Difference secara eksplisit dan mengevaluasi karakteristik hasil simulasi pada berbagai kondisi awal. Hasil dari simulasi ini juga disajikan dalam bentuk grafik untuk menunjukkan evolusi suhu sepanjang batang terhadap waktu. Studi ini diharapkan dapat menjadi bahan ajar atau referensi praktikum dalam fisika komputasi atau mata kuliah mekanika termal.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik untuk memodelkan penyebaran panas pada medium satu dimensi (1D) dan dua dimensi (2D) dengan menggunakan metode *Finite Difference Time Domain* (FDTD) tipe eksplisit (*Forward Time Centered Space*/FTCS). Tahapan dimulai dengan mendefinisikan domain fisik (panjang batang untuk 1D, serta bidang persegi untuk 2D), kondisi awal (initial condition) dan batas (*boundary condition*), serta parameter fisik seperti konduktivitas termal (α). Selanjutnya, domain diskretisasi dibagi menjadi grid-grid kecil baik secara spasial ($\Delta x, \Delta y$) maupun temporal (Δt) untuk memastikan kestabilan numerik berdasarkan kriteria bilangan Fourier (Fo).

Simulasi dilakukan dengan mengimplementasikan algoritma Finite Difference dalam bahasa pemrograman Python menggunakan pustaka numpy dan matplotlib untuk visualisasi hasil. Model 1D digunakan untuk menyederhanakan kasus konduksi panas linear, sedangkan model 2D digunakan untuk menggambarkan penyebaran panas dari sumber titik pada bidang. Hasil suhu dari setiap langkah waktu direkam dan divisualisasikan untuk menganalisis dinamika perpindahan panas serta verifikasi kestabilan dan akurasi metode. Simulasi ini juga dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan seperti difusi zat atau pemodelan fenomena termal dalam bidang teknik dan geofisika.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil simulasi penyebaran panas satu dimensi (1D) dan dua dimensi (2D) yang diperoleh melalui pemrograman Python menggunakan metode Finite Difference eksplisit (FTCS). Simulasi dilakukan dengan memvariasikan beberapa parameter seperti jumlah grid, durasi waktu simulasi (jumlah langkah waktu), serta nilai konduktivitas termal (α).

Koding Python untuk simulasi penyebaran panas 1D adalah sebagai berikut:

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# === Parameter domain ===
L = 1.0        # Panjang batang (meter)
T = 0.5        # Total waktu simulasi (detik)
nx = 50        # Jumlah grid ruang
nt = 1000      # Jumlah langkah waktu
alpha = 0.01   # Konduktivitas termal

# === Diskretisasi ===
dx = L / (nx - 1)
dt = T / nt
x = np.linspace(0, L, nx)

# === Angka Fourier untuk stabilitas ===
Fo = alpha * dt / dx**2
if Fo > 0.5:
  print("Peringatan: Kondisi stabilitas tidak terpenuhi!")

# === Inisialisasi suhu ===
u = np.zeros(nx)
u[int(nx/4):int(nx/2)] = 100  # Suhu awal tinggi di tengah batang

# === Simulasi Finite Difference (FTCS)
u_record = [u.copy()]
for n in range(nt):
   un = u.copy()
   for i in range(1, nx - 1):
      u[i] = un[i] + Fo * (un[i+1] - 2*un[i] + un[i-1])
   u_record.append(u.copy())

# === Visualisasi ===
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(x, u_record[0], label="t = 0")
plt.plot(x, u_record[int(nt/2)], label=f"t = {T/2:.2f}")
plt.plot(x, u_record[-1], label=f"t = {T:.2f}")
plt.title("Simulasi Panas 1D dengan Metode Finite Difference (FTCS)")
plt.xlabel("Posisi (m)")
plt.ylabel("Suhu (°C)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()
```

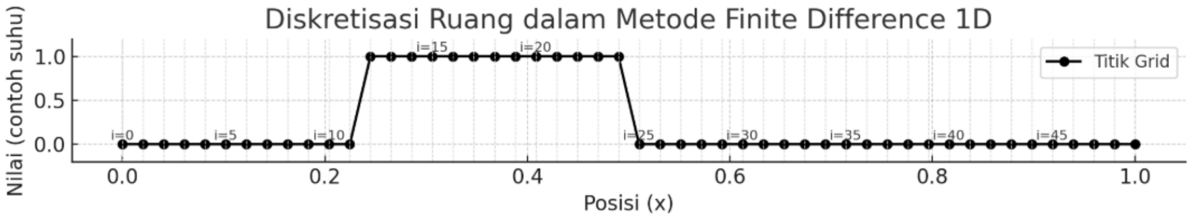
Penjelasan beberapa hal penting dari koding tersebut adalah sebagai berikut:

a. Grid ruang: 50 titik dari 0 hingga 1 meter.
b. Grid waktu: 1000 langkah untuk simulasi 0.5 detik.
c. Kondisi awal: suhu tinggi di tengah batang.
d. Kondisi batas: suhu di ujung tetap (Dirichlet boundary, 0°C).
e. Grafik menunjukkan bagaimana panas menyebar dari tengah ke seluruh batang.

Koding untuk menggambar skema diskretisasi grid sistem 1D adalah sebagai berikut:

```
import matplotlib.pyplot as plt
# Buat skema diskretisasi grid 1D
x = np.linspace(0, L, nx)
u_example = np.zeros(nx)
u_example[int(nx/4):int(nx/2)] = 1  # suhu 1 di tengah

# Plot grid dan nilai
plt.figure(figsize=(10, 2))
plt.plot(x, u_example, 'ko-', label='Titik Grid')
```

```
for i in range(0, nx, 5):  # beri label tiap 5 grid
    plt.text(x[i], u_example[i]+0.05, f'i={i}', ha='center', fontsize=8)

# Tandai sel grid
for i in range(nx - 1):
    plt.axvline(x[i], color='lightgray', linestyle='--', linewidth=0.5)

plt.title("Diskretisasi Ruang dalam Metode Finite Difference 1D")
plt.xlabel("Posisi (x)")
plt.ylabel("Nilai (contoh suhu)")
plt.ylim(-0.2, 1.2)
plt.grid(True, axis='y')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```



Gambar 1. Diskretisasi ruang sistem 1D

Gambar di atas menunjukkan diskretisasi ruang 1D pada metode Finite Difference dengan beberapa penjelasan sebagai berikut:

a. Titik-titik hitam (•) mewakili titik grid tempat nilai suhu dihitung.
b. Label i=... menunjukkan indeks grid (misalnya i=0, i=5, dst.).
c. Garis vertikal putus-putus menunjukkan batas antar sel grid.
d. Nilai 1 di tengah adalah kondisi awal suhu tinggi, sedangkan sisanya 0.

Diskretisasi ini penting karena setiap titik grid akan mengikuti persamaan:

$$u_i^{n+1} = u_i^n + \mathrm{Fo} \cdot (u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n)$$

yang dihitung untuk setiap waktu n. Fo adalah singkatan dari Fourier Number dalam konteks perpindahan panas, khususnya pada metode numerik seperti Finite Difference. Fourier Number (Fo) adalah bilangan tak berdimensi yang menunjukkan perbandingan antara laju difusi panas dengan perubahan suhu terhadap waktu.

Dalam konteks 1D, didefinisikan sebagai:

$$\mathrm{Fo} = \frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta x^2}$$

di mana:

α = konduktivitas termal (thermal diffusivity) [m²/s],

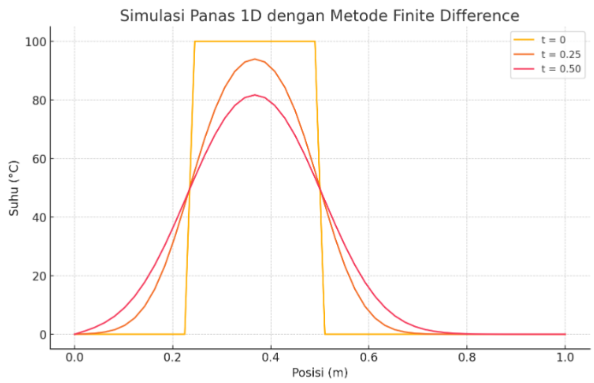
Δt = langkah waktu (time step) [s],

Δx = jarak antar grid ruang (spatial step) [m].

Dalam metode eksplisit (Forward Time Centered Space / FTCS), kondisi stabilitas numerik sangat bergantung pada nilai Fo. Untuk stabil maka

$$\mathrm{Fo} \leq \frac{1}{2}$$

Jika Fo terlalu besar simulasi menjadi tidak stabil, hasilnya akan divergen, biasanya terjadi osilasi aneh atau suhu menjadi bernilai tak berhingga. Adapun makna fisiknya yaitu Fourier Number mengukur seberapa jauh panas merambat dalam suatu medium dibandingkan dengan panjang grid selama satu langkah waktu. Jika Fo kecil maka panas merambat perlahan (numerik stabil tapi lambat konvergen). Jika Fo besar (melebihi 0.5) maka panas merambat terlalu cepat secara numerik, bisa menyebabkan instabilitas.



Gambar 2. Hasil simulasi penyebaran panas sistem 1D

Gambar di atas menunjukkan hasil simulasi penyebaran panas 1D menggunakan metode Finite Difference eksplisit (Forward Time Centered Space - FTCS).

Simulasi ini menggambarkan penyebaran panas sepanjang batang 1 meter menggunakan metode numerik. Awalnya, suhu 100°C hanya terdapat di bagian tengah batang, sementara bagian lainnya berada pada suhu lebih rendah. Seiring waktu, panas menyebar ke seluruh batang hingga mencapai kesetimbangan. Warna garis pada grafik menunjukkan perubahan suhu: biru mewakili suhu awal, oranye menunjukkan suhu pada pertengahan waktu simulasi, dan hijau menggambarkan suhu mendekati keadaan kesetimbangan. Metode ini sangat cocok digunakan untuk berbagai aplikasi fisika seperti simulasi konduksi panas, difusi zat dalam cairan, serta penyebaran gelombang dan medan.

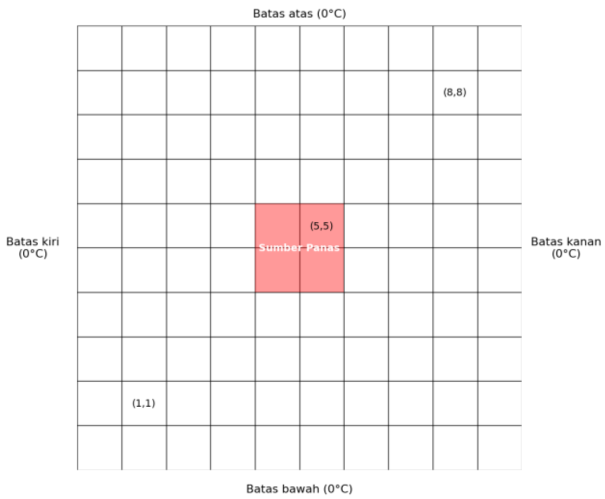
Koding Python untuk simulasi penyebaran panas pada sistem 2D adalah sebagai berikut:

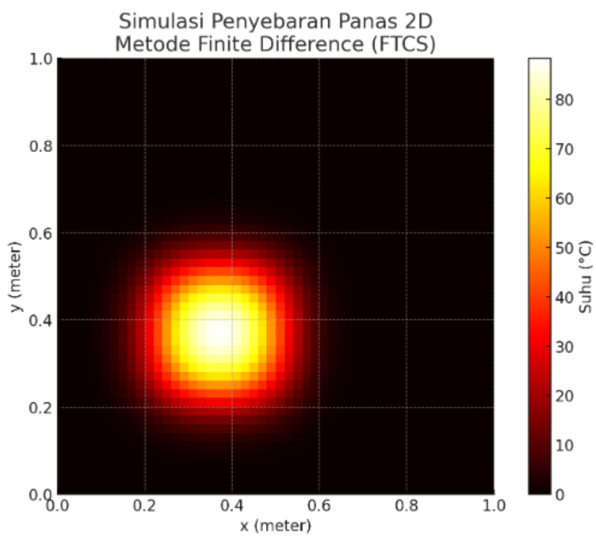
```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# Parameter domain
Lx, Ly = 1.0, 1.0      # ukuran bidang 2D (meter)
nx, ny = 50, 50     # jumlah grid ruang x dan y
nt = 500            # jumlah langkah waktu
alpha = 0.01        # konduktivitas termal
dx = Lx / (nx - 1)
dy = Ly / (ny - 1)
dt = 0.0005         # langkah waktu (detik)

# Bilangan Fourier untuk stabilitas
Fox = alpha * dt / dx**2
Foy = alpha * dt / dy**2
assert Fox + Foy <= 0.5, "Stabilitas tidak terpenuhi. Kurangi dt atau naikkan dx/dy."

# Inisialisasi suhu
u = np.zeros((ny, nx))
u[int(ny/4):int(ny/2), int(nx/4):int(nx/2)] = 100  # sumber panas di tengah

# Simulasi Finite Difference 2D eksplisit
for n in range(nt):
    un = u.copy()
    u[1:-1, 1:-1] = (
        un[1:-1, 1:-1] +
        Fox * (un[1:-1, 2:] - 2*un[1:-1, 1:-1] + un[1:-1, 0:-2]) +
        Foy * (un[2:, 1:-1] - 2*un[1:-1, 1:-1] + un[0:-2, 1:-1]) )
# Plot hasil akhir suhu
plt.figure(figsize=(8, 6))
```

```
plt.imshow(u, extent=[0, Lx, 0, Ly], origin='lower', cmap='hot')
plt.colorbar(label='Suhu (°C)')
plt.title("Simulasi Penyebaran Panas 2D\nMetode Finite Difference (FTCS)")
plt.xlabel("x (meter)")
plt.ylabel("y (meter)")
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Koding menggambar sistem dan diskritisasinya

```
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.patches as patches

# Ukuran grid
nx, ny = 10, 10
fig, ax = plt.subplots(figsize=(6, 6))
ax.set_xlim(0, nx)
ax.set_ylim(0, ny)
ax.set_aspect('equal')
ax.set_title("Skema Diskretisasi Grid 2D untuk Simulasi Panas", fontsize=12)

# Gambar grid
for i in range(nx):
    for j in range(ny):
        rect = patches.Rectangle((i, j), 1, 1, edgecolor='black', facecolor='none', linewidth=0.5)
        ax.add_patch(rect)
# Tandai pusat (sumber panas)
mid_x, mid_y = nx // 2, ny // 2
ax.add_patch(patches.Rectangle((mid_x-1, mid_y-1), 2, 2, facecolor='red', alpha=0.4))
ax.text(mid_x, mid_y, 'Sumber Panas', color='white', ha='center', va='center', fontsize=8, weight='bold')

# Label beberapa titik grid
for i, j in [(1,1), (mid_x, mid_y), (8,8)]:
    ax.text(i+0.5, j+0.5, f'({i},{j})', ha='center', va='center', fontsize=8)

# Keterangan batas
ax.text(nx/2, -0.5, "Batas bawah (0°C)", ha='center', fontsize=9)
ax.text(nx/2, ny+0.2, "Batas atas (0°C)", ha='center', fontsize=9)
ax.text(-1, ny/2, "Batas kiri\n(0°C)", va='center', ha='center', fontsize=9)
ax.text(nx+1, ny/2, "Batas kanan\n(0°C)", va='center', ha='center', fontsize=9)

plt.axis('off')
plt.tight_layout()
plt.show()
```





Gambar 3. Skema diskritisasi dan hasil simulasi penyebaran panas pada sistem 2D

Gambar di atas menunjukkan hasil simulasi penyebaran panas 2D menggunakan metode Finite Difference tipe eksplisit (Forward Time Centered Space/FTCS). Pada simulasi ini, bidang berukuran 1m × 1m dibagi menjadi grid diskrit berukuran 50×50 titik. Kondisi awal ditetapkan dengan adanya sumber panas sebesar 100°C di area tengah bidang, sementara suhu di seluruh tepi domain dijaga tetap 0°C sebagai kondisi batas (Dirichlet boundary). Proses penyebaran panas terjadi secara konduktif, di mana panas menyebar dari pusat ke seluruh area seiring waktu. Secara komputasi, simulasi ini mengikuti formulasi eksplisit dua dimensi dari metode Finite Difference, yaitu dengan menghitung nilai suhu baru di setiap titik berdasarkan rata-rata perubahan suhu dari titik-titik tetangganya menggunakan bilangan Fourier sebagai acuan kestabilan numerik dengan rumus komputasi sebagai berikut:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^{n} + Fo_x \cdot (u_{i+1,j}^{n} - 2u_{i,j}^{n} + u_{i-1,j}^{n}) + Fo_y \cdot (u_{i,j+1}^{n} - 2u_{i,j}^{n} + u_{i}^{n}$$

Hasil koding menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai α atau semakin halus grid yang digunakan, maka penyebaran panas berlangsung lebih cepat dan merata. Visualisasi suhu ditampilkan dalam bentuk grafik dan peta warna (heatmap) yang merepresentasikan distribusi suhu pada berbagai waktu simulasi. Perbandingan antar skenario digunakan untuk menunjukkan pengaruh masing-masing parameter terhadap dinamika difusi panas dan kestabilan numerik sistem, sekaligus memberikan pemahaman visual terhadap konsep termodinamika konduktif.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil memodelkan proses penyebaran panas secara numerik menggunakan metode Finite Difference (FTCS) baik dalam satu dimensi (1D) maupun dua dimensi (2D). Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini mampu merepresentasikan difusi panas secara konduktif dari sumber panas menuju seluruh domain dengan pola sebaran yang sesuai ekspektasi fisika. Dalam implementasinya, kestabilan numerik sangat bergantung pada pemilihan parameter seperti langkah waktu dan ukuran grid, sebagaimana ditunjukkan oleh peran bilangan Fourier dalam menjaga keakuratan dan konvergensi hasil. Simulasi ini tidak hanya memperkuat pemahaman terhadap konsep konduksi panas, tetapi juga membuka peluang penerapan lebih lanjut pada berbagai bidang seperti teknik termal, geofisika, dan pemodelan iklim.

Referensi

Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). *Numerical Methods for Engineers* (7th ed.). McGraw-Hill Education.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.

Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing.

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (5th ed.). John Wiley & Sons.

Zhang, X., Liu, Y., & Wang, H. (2017). Numerical simulation of heat transfer in electronic cooling using finite difference method. Thermal Science and Engineering Progress, 4, 75–83.

Ramadhan, A., & Rini, A. (2020). Simulasi penyebaran panas pada pelat logam menggunakan metode beda hingga. Jurnal Fisika dan Aplikasinya, 16(1), 23–30.

Yulianto, R., Suryadi, D., & Handayani, N. (2021). Penggunaan simulasi numerik dalam pembelajaran fisika untuk meningkatkan pemahaman difusi panas. Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia, 17(2), 134–141.