

# Penerapan *Finite Element Method* (FEM) Persamaan Difusi Pada Ruangan Yang Memiliki *Air Conditioner*

*Application of the Finite Element Method (FEM) for the Diffusion Equation in an Air-Conditioned Room*

Aufa Ghifada<sup>1</sup>, Lizzilmi Syarifatuz Zaimah<sup>2</sup>, Iftar Hendry<sup>3</sup>, Farah Annisa Tri Sundari<sup>4</sup>,  
Dezvini Muthmainnati Vidia<sup>5</sup>, Naura Dalta Indriyani<sup>6</sup>, Mochamad Tito Julianto<sup>7</sup>, Sri  
Nurdiati<sup>8</sup>, Mohamad Khoirun Najib<sup>9\*</sup>, Syukri Arif Rafhida<sup>10</sup>

*Sekolah Sains Data Matematika dan Informatika, IPB University, Bogor, Indonesia*

*E-mail : aufa\_ghifada@apps.ipb.ac.id<sup>1</sup>, lizzaimah@apps.ipb.ac.id<sup>2</sup>,*

*iftarrhendry@apps.ipb.ac.id<sup>3</sup>, farahannisa@apps.ipb.ac.id<sup>4</sup>, vidia14dezvini@apps.ipb.ac.id<sup>5</sup>,*

*nauradalta@apps.ipb.ac.id<sup>6</sup>, mtjulianto@apps.ipb.ac.id<sup>7</sup>, nurdiati@apps.ipb.ac.id<sup>8</sup>,*

*mkhoirun@apps.ipb.ac.id<sup>9\*</sup>, syukri85\_arif@apps.ipb.ac.id<sup>10</sup>*

*\*Corresponding author*

Received 13 April 2026; Revised 21 April 2026; Accepted 24 April 2026

**Abstrak** - Kenyamanan termal merupakan salah satu aspek penting dalam perancangan bangunan karena kondisi suhu berpengaruh langsung terhadap produktivitas dan kenyamanan penghuni ruangan. Salah satu sistem yang umum digunakan untuk mengatur suhu ruangan adalah air conditioner (AC). Namun demikian, distribusi suhu di dalam ruangan tidak langsung menjadi seragam ketika AC dinyalakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi suhu pada ruangan ber-AC menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*). Fenomena fisik dimodelkan menggunakan persamaan panas dua dimensi yang menggambarkan proses difusi suhu terhadap ruang dan waktu. Domain simulasi merepresentasikan denah rumah sederhana yang terdiri dari beberapa ruangan dengan sumber pendingin berada di ruang tengah. Model matematis yang digunakan melibatkan kondisi awal suhu ruangan sebesar 25°C serta kondisi batas yang merepresentasikan sumber pendingin dan dinding ruangan yang terisolasi. Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak Wolfram Mathematica untuk memperoleh distribusi suhu terhadap waktu. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pendinginan awalnya terjadi di sekitar sumber AC kemudian secara bertahap menyebar ke bagian ruangan lainnya. Keberadaan dinding dan sekat ruangan mempengaruhi pola difusi suhu sehingga menghasilkan laju pendinginan yang berbeda pada setiap ruangan. Seiring berjalannya waktu, sistem mendekati kondisi tunak di mana distribusi suhu menjadi lebih seragam. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode elemen hingga efektif digunakan untuk memodelkan penyebaran suhu pada ruangan dengan geometri yang kompleks.

**Kata Kunci** - Distribusi Suhu, Metode Elemen Hingga, Pendingin Ruangan, Persamaan Panas, Simulasi Numerik

**Abstract** Indoor thermal comfort is an important aspect in building design because temperature conditions directly influence the productivity and comfort of occupants. One common solution used to regulate indoor temperature is an air conditioner (AC). However, temperature distribution inside a room does not immediately become uniform after the AC is turned on. This study investigates the temperature distribution in an air-conditioned room using the Finite Element Method (FEM). The physical phenomenon is modeled using the two-dimensional heat equation that describes temperature diffusion over space and time. The simulation domain represents a simplified house layout consisting of several rooms, with the AC located in the living room as the cooling source. The mathematical model incorporates an initial temperature condition of 25°C and boundary conditions representing the cooling source and insulated walls. Numerical simulations are performed using Wolfram Mathematica to obtain the temperature distribution

over time. The results show that cooling initially occurs around the AC location and gradually spreads to other areas. The presence of walls influences the pattern of heat diffusion and causes different cooling rates between rooms. Over time, the system approaches a steady-state condition where the temperature distribution becomes more uniform. The results indicate that the Finite Element Method is effective for modeling indoor temperature diffusion in domains with complex geometries.

**Keywords** - Air Conditioning, Finite Element Method, Heat Equation, Numerical Simulation, Temperature Distribution

## 1. PENDAHULUAN

Kenyamanan termal merupakan salah satu aspek penting dalam perancangan ruang tertutup. Kondisi suhu berperan langsung terhadap tingkat produktivitas dan konsentrasi penghuni ruangan. Sistem pendingin udara atau air conditioner (AC) menjadi solusi umum untuk menjaga suhu ruangan dalam keadaan stabil sesuai batas kenyamanan dan keinginan pengguna. Akan tetapi, distribusi suhu sering kali tidak langsung seragam sesaat setelah AC dinyalakan. Aspek yang menunjukkan kompleksitas fenomena ini adalah perbedaan set point AC akan menghasilkan laju perubahan suhu udara yang berbeda selama periode pendinginan awal, sehingga kestabilan termal ruangan tercapai dalam waktu yang bervariasi [1].

Suhu dalam ruangan berventilasi dipengaruhi oleh pola aliran udara, panas konvektif, dan sumber panas internal [2]. Mekanisme tersebut berkontribusi terhadap distribusi suhu ruangan secara keseluruhan. Posisi outlet dalam ruangan sangat berpengaruh dalam pencapaian distribusi pasokan udara yang merata. Banyaknya faktor yang memengaruhi membuktikan bahwa kondisi termal dalam ruangan bersifat dinamis sehingga sulit diprediksi hanya melalui pengamatan langsung. Gokarakonda *et al.* mengkaji hubungan antara *set point* suhu AC optimal dengan kenyamanan termal pada bangunan *mixed-mode* di India melalui survei lapangan menyimpulkan bahwa kondisi nyaman dapat dipertahankan dengan penurunan suhu sebesar 3K dari suhu ruang. Hal ini menunjukkan sensitifnya distribusi suhu terhadap pengaturan sistem pendingin [3]. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu menggambarkan variasi suhu secara menyeluruh dalam ruang dan waktu sehingga proses pencapaian kestabilan termal dapat dianalisis dengan lebih akurat [4].

Secara matematis, fenomena penyebaran panas dapat diselesaikan menggunakan persamaan panas dua dimensi yang merepresentasikan perubahan suhu sebagai fungsi ruang dan waktu. Persamaan ini menjelaskan hubungan antara perubahan suhu terhadap waktu dan ruang berdasarkan hukum kekekalan energi serta konduksi termal [5]. Model ini banyak dijadikan dasar dalam pemodelan perpindahan panas di udara maupun material padat. Penelitian terkait distribusi panas secara numerik menggunakan metode beda hingga dua dimensi berbasis MATLAB oleh Rahman dan Hamzah menemukan bahwa proses perpindahan panas mencapai kesetimbangan pada waktu yang relatif sama untuk berbagai nilai koefisien konduktivitas [6]. Pada kasus yang lebih kompleks, solusi alternatif menggunakan metode numerik perlu dilakukan untuk mengatasi kerumitan penerapan syarat batas maupun faktor simetri permasalahan yang tidak dapat diselesaikan oleh solusi analitik [7].

Salah satu metode numerik yang banyak digunakan dalam menyelesaikan persamaan panas adalah Finite Element Method (FEM). FEM memungkinkan pembagian domain menjadi elemen-elemen yang lebih sederhana pada objek kompleks [8]. Studi Abidin dan Misro mengenai FEM berbasis metode Galerkin terbukti efektif dalam menyelesaikan masalah konduksi panas pada geometri dua dimensi tidak beraturan menggunakan elemen segitiga dengan hasil visualisasi MATLAB yang konsisten [9]. Kajian lain oleh Simbolon secara langsung menerapkan FEM pada persamaan energi dalam ruang tiga dimensi yang mengandung AC menggunakan COMSOL Multiphysics menunjukkan adanya korelasi antara posisi AC dan suhu di dalam ruangan dengan

distribusi suhu terpusat di sekitar sumber pendingin dan menyebar secara bertahap [10]. Melalui pendekatan FEM, fenomena perubahan suhu dari kondisi awal hingga mencapai kestabilan termal dapat dimodelkan secara visual dan kuantitatif.

Beberapa penelitian terdahulu telah mempelajari distribusi suhu dalam ruangan ber-AC menggunakan berbagai pendekatan numerik. Zhu *et al.* melakukan simulasi skala penuh distribusi suhu dan aliran udara dalam ruangan ber-AC menggunakan paket *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan memperoleh hasil yang mendekati data eksperimen dengan deviasi rata-rata di bawah 10% [11]. Distribusi suhu dalam ruangan sangat bergantung pada pola aliran udara yang digunakan. Hal ini ditunjukkan dalam penelitian Zhang dan Ryu yang menemukan bahwa pilihan pola ventilasi berdampak langsung pada kondensasi dinding pada simulasi tiga pola ventilasi menggunakan persamaan Navier-Stokes rata-rata Reynolds dan model k-epsilon RNG [12]. Lebih lanjut, Ifa dan Driss melakukan distribusi suhu pada ruangan berventilasi yang dipanaskan menggunakan CFD berbentuk ANSYS dan membuktikan bahwa simulasi numerik mampu merepresentasikan kondisi termal ruangan secara akurat [13]. Kumpulan penelitian tersebut umumnya menggunakan metode berbasis persamaan Navier-Stokes yang membutuhkan sumber daya komputasi yang lebih besar dan parameter masukan yang lebih kompleks.

Selain simulasi berbasis CFD, penelitian tentang kenyamanan termal ruangan ber-AC juga telah dilakukan dari berbagai sudut pandang. Analisis penelitian Sekartaji *et al.* dalam pengaruh ventilasi alami terhadap beban pendinginan dan pemanasan AC di ruang kelas menemukan bahwa ventilasi alami dapat meningkatkan beban pendinginan hingga 1,75 kali lipat di musim panas [14]. Salah satu tantangan dalam simulasi ruangan ber-AC adalah memilih metode yang cukup akurat tanpa terlalu membebani komputasi. Dalam hal ini, Zhou *et al.* mencoba pendekatan FEM eksplisit satu dimensi untuk menganalisis perpindahan panas pada komponen dinding yang mengandung *Phase Change Materials* (PCM). Hasilnya FEM diketahui mampu menangkap dinamika perubahan termal pada komponen bangunan dengan baik [15]. Selain itu, hasil kajian Schoplocher *et al.* menunjukkan bahwa metode *lumped parameter* untuk bangunan generik mampu menghitung konduksi termal internal dan *thermal bridge* secara lebih akurat dengan improvisasi metode FEM [16]. Hasil studi di atas mempertegas FEM sebagai alat yang dapat diandalkan untuk memodelkan berbagai permasalahan perpindahan panas, baik pada domain sederhana maupun kompleks.

Berdasarkan tinjauan sejumlah literatur terdahulu terdapat beberapa aspek yang belum banyak dikaji secara bersamaan dalam satu kerangka penelitian. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan CFD berbasis Navier-Stokes, simulasi 1D, atau domain sederhana, penelitian ini akan berfokus pada penerapan FEM untuk memodelkan persamaan distribusi suhu pada ruangan dengan pendingin udara (AC). Melalui pendekatan ini, fenomena perubahan suhu dari kondisi awal hingga mencapai kestabilan termal dapat dimodelkan secara visual dan kuantitatif. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak Wolfram Mathematica yang akan melibatkan kondisi batas bervariasi.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur dan simulasi komputasi untuk memodelkan distribusi suhu pada ruangan yang menggunakan *air conditioner* (AC). Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep matematis yang mendasari fenomena perpindahan panas, sedangkan simulasi komputasi digunakan untuk menganalisis penyebaran suhu secara numerik menggunakan Finite Element Method (FEM). Fenomena distribusi suhu dalam ruangan dimodelkan menggunakan persamaan panas dua dimensi, yang merupakan salah satu bentuk persamaan diferensial parsial (PDP). PDP banyak digunakan untuk memodelkan berbagai fenomena fisik seperti perpindahan panas, aliran fluida, dan elastisitas material [17]. Dalam

banyak kasus, penyelesaian analitik PDP sulit dilakukan, terutama pada domain dengan geometri kompleks atau kondisi batas yang tidak sederhana, sehingga metode numerik seperti FEM digunakan untuk memperoleh solusi hampiran [18].

### 2.1. Model Matematis Persamaan Panas

Distribusi suhu dalam ruangan dimodelkan menggunakan persamaan panas dua dimensi yang menggambarkan perubahan temperatur sebagai fungsi ruang dan waktu. Dimensi ruang pada penelitian kali ini adalah dimensi dua yang berada pada koordinat Kartesius sehingga disebut sebagai persamaan panas orde dua. Persamaan ini dituliskan sebagai

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

dengan  $T(x, y, t)$  menyatakan suhu pada posisi  $(x, y)$  dan waktu  $t$ , sedangkan  $\alpha$  merupakan difusivitas termal dari medium [19]. Difusivitas termal menunjukkan kemampuan suatu material dalam menyebarkan panas dan ditentukan oleh konduktivitas termal, massa jenis, serta kapasitas panas jenis material [20]. Persamaan panas ini digunakan untuk memodelkan proses perubahan suhu dari kondisi awal hingga mencapai keadaan mendekati seragam di dalam ruangan.

Secara singkat, model fenomena perpindahan panas secara matematis dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \Delta^2 T, (x, y, t) \in [0,100], \quad (2)$$

dengan  $T(x, y, t)$  menyatakan temperatur pada posisi  $(x, y)$  pada waktu  $t$  dan  $k$  merupakan koefisien difusi panas, Operator  $\Delta T$  merupakan operator *Laplacian* dari fungsi temperatur yang didefinisikan sebagai berikut

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}.$$

Secara fisik, persamaan tersebut menyatakan bahwa pada setiap titik di dalam medium, laju bersih perpindahan energi panas melalui proses konduksi yang masuk ke dalam suatu elemen area harus sama dengan laju perubahan energi panas yang tersimpan di dalam elemen tersebut terhadap waktu.

Penyelesaian persamaan panas diperlukan kondisi batas yang menggambarkan perilaku sistem pada tepi domain. Masalah ini dikenal sebagai *Boundary Value Problem* (BVP) [21]. Pemilihan kondisi batas yang tepat sangat penting karena akan menentukan solusi numerik yang diperoleh dan kesesuaiannya dengan fenomena fisik sebenarnya [22]. Dalam menentukan kondisi batas awal, digunakan suhu  $25^\circ$  sebagai suhu awal ruangan pada waktu  $t = 0$  [23]. Secara matematis, kondisi awal pada model dinyatakan sebagai berikut

$$T(x, y, 0) = 25. \quad (3)$$

Selanjutnya, kondisi batas pada daerah sumber pendinginan diberikan oleh

$$T(x, y, t) = 16. \quad (4)$$

Kondisi batas tersebut menyatakan bahwa suhu pada daerah sumber pendingin dijaga konstan sebesar  $16^\circ\text{C}$ , yaitu merupakan suhu minimum yang dapat dicapai oleh pendingin ruangan. Kondisi ini juga menggambarkan bahwa udara di sekitar sumber pendingin akan mengalami proses pendinginan sehingga suhu di sekitarnya cenderung mendekati nilai tersebut. Selain kondisi batas pada sumber pendinginan, pada model ini juga ditambahkan kondisi batas pada seluruh dinding ruangan yang merepresentasikan tembok bangunan. Pada bagian ini digunakan kondisi batas Neumann, yaitu

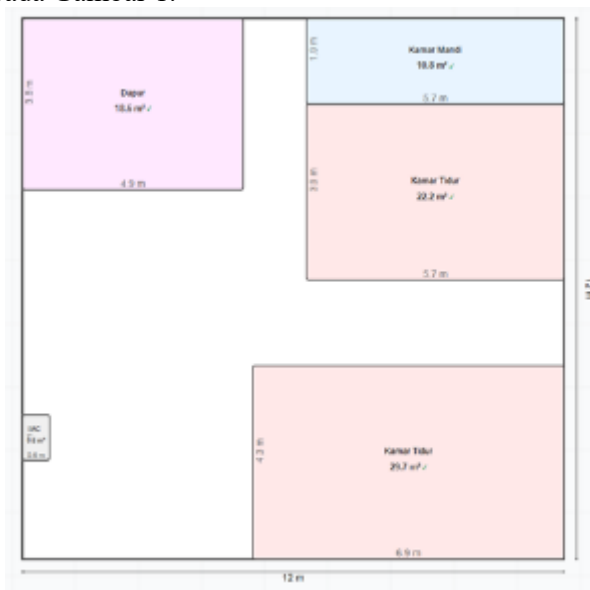
$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \forall (x, y) \in \Omega. \quad (5)$$

Kondisi batas tersebut menyatakan bahwa tidak terjadi aliran panas yang menembus dinding ruangan. Secara fisik, asumsi ini menggambarkan bahwa dinding ruangan berfungsi sebagai isolator termal yang menahan perpindahan panas keluar dari domain simulasi. Dengan demikian,

panas yang berada di dalam ruangan tetap berada di dalam sistem sehingga distribusi suhu yang terbentuk hanya dipengaruhi oleh proses difusi dari sumber pendingin.

## 2.2. Domain dan Diskretisasi Mesh

Dalam penelitian ini, domain yang digunakan berupa denah rumah sederhana yang berbentuk persegi. Didefinisikan domain simulasi merupakan domain dua dimensi  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  dengan ukuran  $12 \times 12$  meter. Denah tersebut terdiri atas beberapa bagian ruangan seperti dua kamar tidur, satu dapur, satu kamar mandi, dan satu ruang tengah yang menjadi area utama penyebaran udara dingin dari pendingin ruangan (*air conditioner*) dengan antar ruangan terpisah oleh sekaran tembok yang cukup tebal. Representasi denah ruangan yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Denah Rumah

Selanjutnya analisis dilakukan dengan melihat persebaran suhu dalam domain tersebut. Hal ini bertujuan untuk melihat simulasi seberapa besar dari pengaruh pendingin ruangan terhadap proses difusi dari suhu ruangan yang berada di area terbuka dengan area yang tertutupi oleh sekatan antar ruangan. Setelah domain didefinisikan, dilakukan diskritisasi dengan menggunakan elemen segitiga sebagai tahapan awal dalam melakukan metode elemen hingga. Selain itu, ukuran luas dari setiap elemen dipilih supaya mendapatkan hasil representasi numerik yang stabil serta akurat dalam memodelka persamaan panas.

## 2.2. Pemodelan Sumber Pendingin Ruangan

Posisi pendingin ruangan dimodelkan sebagai suatu daerah berbentuk lingkaran kecil yang dinyatakan dengan persamaan berikut

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \leq r^2, \quad (3)$$

dengan  $r$  menyatakan jari-jari dari difusi suhu sumber pendingin dan koordinat pusat sumber pendingin berada pada titik  $(x_0, y_0)$ . Dalam penelitian ini, posisi pendingin ruangan ditetapkan berada pada titik  $(0,1)$  dengan jari-jari maksimum sebesar 0.15. Representasi ini menggambarkan daerah sumber pendinginan yang menghasilkan udara dingin di dalam ruangan.

Selanjutnya, penelitian ini akan melihat dari sebaran suhu suatu ruangan dengan suhu pendingin ruangan dibuat konstan pada beberapa waktu tertentu. Hal ini bertujuan untuk menganalisis sebaran dingin yang berlangsung pada ruangan dari waktu ke waktu. Variasi waktu antara lain sebagai berikut.

Tabel 1. Variasi waktu

No	Waktu	Keterangan
1	Ketika $t = 1$	Waktu saat pendingin ruangan dinyalakan selama 1 menit
2	Ketika $t = 5$	Waktu saat pendingin ruangan dinyalakan selama 5 menit
3	Ketika $t = 20$	Waktu saat pendingin ruangan dinyalakan selama 20 menit
4	Ketika $t = 100$	Waktu saat pendingin ruangan dinyalakan selama 100 menit

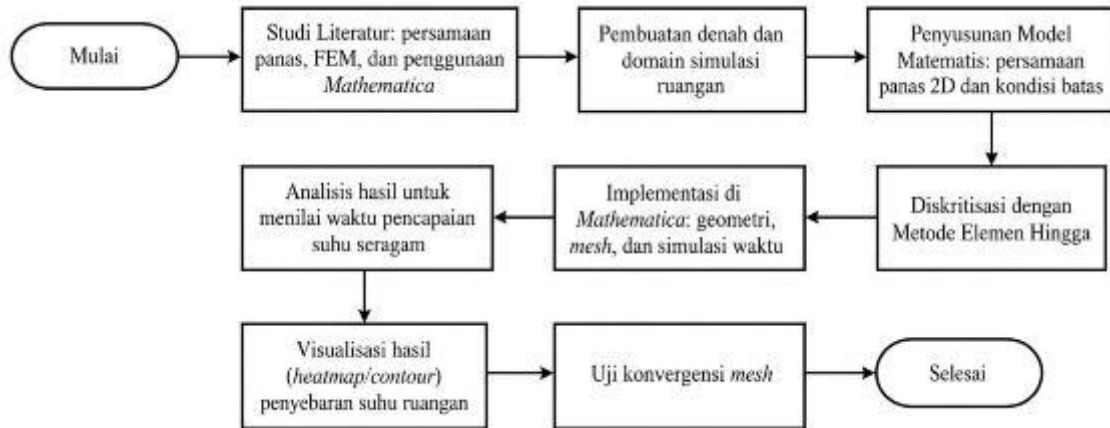
### 2.3. Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi secara numerik dengan menggunakan metode *finite element method* (FEM). *Finite Element Method* (FEM) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial pada domain dengan geometri kompleks. Metode ini bekerja dengan cara membagi domain menjadi elemen-elemen kecil yang lebih sederhana yang disebut sebagai *mesh* sehingga solusi dapat dihipotesiskan menggunakan fungsi pendekatan pada setiap elemen [24]. Pembagian domain tersebut dinamakan sebagai proses diskretisasi domain. Proses diskretisasi ini memungkinkan geometri yang kompleks untuk direpresentasikan sebagai kumpulan elemen sederhana sehingga memudahkan proses komputasi. Semakin halus *mesh* yang digunakan, semakin tinggi pula tingkat ketelitian hasil simulasi.

Selanjutnya, penelitian ini menggunakan pendekatan *mesh* segitiga linear pada domain dua dimensi dan digunakan perangkat lunak *Mathematica* dalam melihat sebaran suhu pada domain yang sudah didefinisikan. Secara sistematis, tahapan penelitian dilakukan sebagai berikut.

1. Melakukan studi literatur mengenai persamaan panas dua dimensi, perpindahan panas dalam ruangan, serta metode elemen hingga.
2. Menentukan geometri ruangan yang akan digunakan sebagai domain simulasi. Menyusun model matematis berupa persamaan panas dua dimensi beserta kondisi awal dan kondisi batas yang sesuai dengan sistem ruangan yang diteliti.
3. Melakukan diskretisasi domain menggunakan *mesh* untuk keperluan penerapan metode elemen hingga.
4. Mengimplementasikan model matematis ke dalam perangkat lunak Wolfram *Mathematica* untuk menyelesaikan persamaan secara numerik.
5. Menjalankan simulasi evolusi suhu terhadap waktu untuk memperoleh pola penyebaran udara dingin dari AC di dalam ruangan.
6. Melakukan analisis hasil simulasi, termasuk waktu yang dibutuhkan hingga suhu ruangan mencapai kondisi mendekati seragam.
7. Menyajikan hasil dalam bentuk visualisasi distribusi suhu seperti heatmap atau kontur temperatur untuk memudahkan interpretasi hasil penelitian.
8. Melakukan uji hasil konvergensi *mesh* untuk melihat kestabilan model yang telah digunakan.

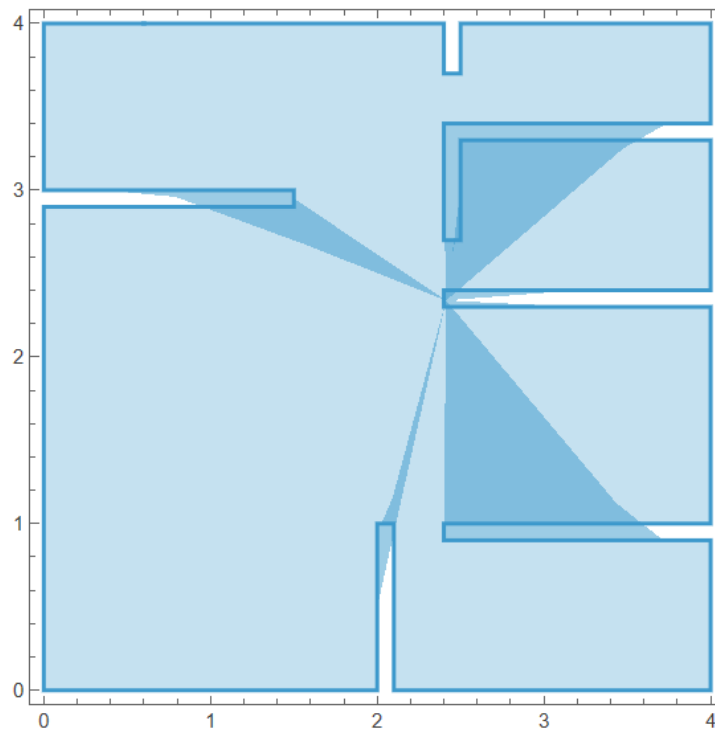
Diagram alir yang menggabungkan seluruh tahapan metode penelitian disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

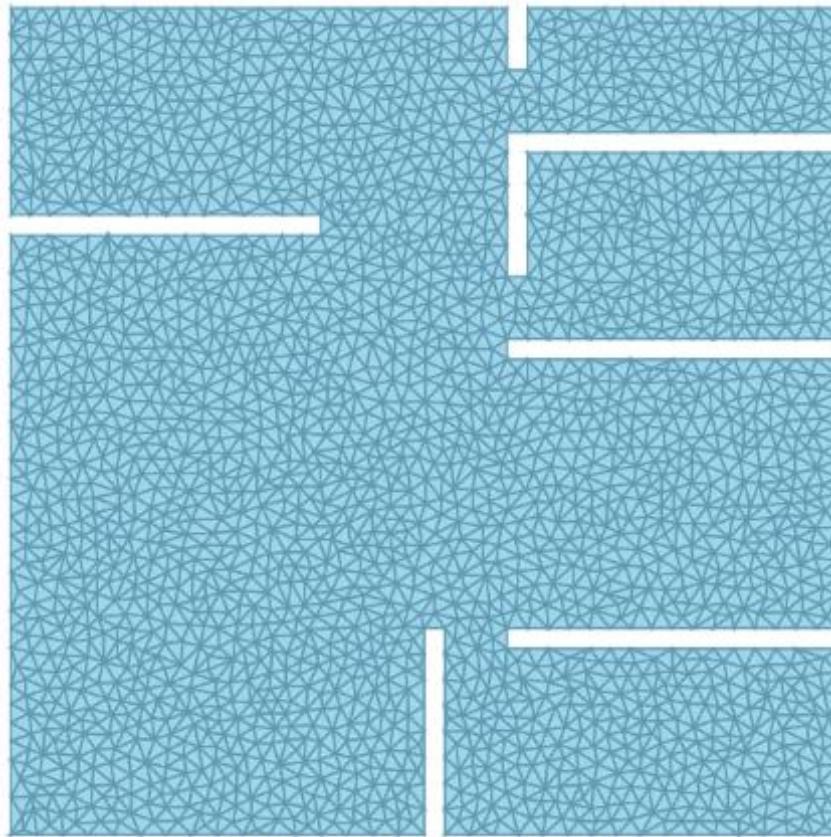
Untuk menyelesaikan persamaan panas secara numerik, penelitian ini menggunakan perangkat lunak Wolfram Mathematica yang memiliki kemampuan komputasi simbolik dan numerik yang kuat dalam penyelesaian persamaan diferensial parsial. Pada tahap awal, geometri ruangan didefinisikan dalam bentuk domain dua dimensi. Selanjutnya, diperoleh Gambar 1 terkait domain yang direkonstruksi dengan menggunakan *Mathematica* sebagai berikut.



Gambar 3. Denah Hasil Komputasi

Selanjutnya, parameter-parameter yang digunakan yaitu jari-jari sebaran suhu pendingin  $r = 0.15 \text{ m}$  dan nilai konstanta  $k = \frac{5}{12}$  yang menggambarkan karakteristik dari sebaran suhu

dingin terpusat pada posisi *air conditioner* berada. Selanjutnya, domain tersebut didiskretisasi dengan menggunakan elemen segitiga dan parameter segitiga yang dibuat oleh algoritma *mesh* memiliki luas maksimum sekitar 0.005 satuan<sup>2</sup>, seperti Gambar 4 berikut.

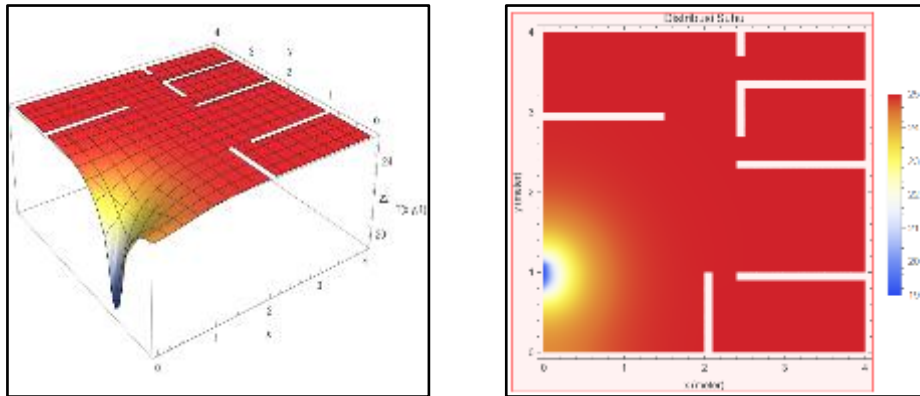


Gambar 4. Hasil diskretisasi dengan luas segitiga sekitar 0.005 satuan<sup>2</sup>

Setelah model matematis didefinisikan, langkah selanjutnya adalah menyelesaikan persamaan panas menggunakan metode numerik. Pada penelitian ini digunakan fungsi `NDSolveValue` yang tersedia pada *Wolfram Mathematica* dan menandakan bahwa solusi yang diselesaikan menggunakan metode elemen hingga untuk memperoleh solusi numerik dari persamaan diferensial parsial. Metode ini memungkinkan diperolehnya solusi dalam bentuk fungsi temperatur  $T(x, y, t)$  yang dapat dievaluasi pada berbagai nilai waktu. Dengan demikian, evolusi distribusi suhu di dalam ruangan dapat diamati secara bertahap. Solusi numerik yang diperoleh kemudian divisualisasikan menggunakan grafik tiga dimensi (*3D surface plot*) serta peta kontur (*contour plot*) untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai pola penyebaran suhu di dalam ruangan.

Untuk memahami proses penyebaran suhu di dalam ruangan, simulasi dilakukan pada beberapa waktu pengamatan, yaitu  $t = 1$ ,  $t = 5$ ,  $t = 10$ ,  $t = 20$ ,  $t = 100$ . Pemilihan beberapa nilai waktu ini bertujuan untuk mengamati perubahan distribusi suhu sejak awal pendinginan hingga mendekati kondisi kesetimbangan termal.

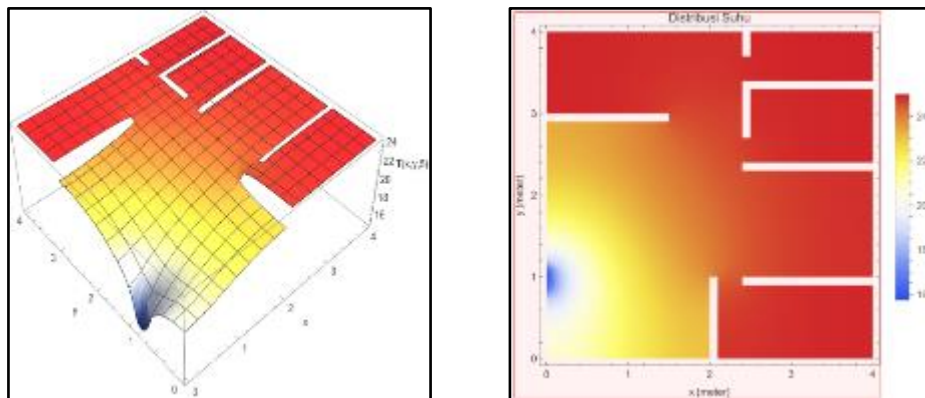
### 3.4. Distribusi Suhu pada $t = 1$



(a) Plot 3D (b) Peta kontur  
 Gambar 4. Grafik solusi perpindahan suhu pada  $t = 1$

Pada tahap awal ini, pendinginan masih terpusat di sekitar lokasi AC. Hal ini terlihat pada grafik tiga dimensi yang menunjukkan adanya penurunan suhu yang signifikan di sekitar titik sumber pendingin sementara di ruangan lainnya masih mengikuti suhu ruang sekitar  $25^\circ$ . Dari grafik plot 3D terlihat adanya perubahan gradien suhu yang sangat tajam di sekitar titik  $(0,1)$ . Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan temperatur yang cukup besar antara daerah di sekitar AC dan daerah yang berada lebih jauh dari sumber pendinginan. Peta kontur juga memperlihatkan garis kontur yang sangat rapat di sekitar titik  $(0,1)$  yang menunjukkan bahwa perubahan suhu terjadi dengan cepat pada daerah tersebut. Sementara itu, area yang jauh dari sumber pendingin masih memiliki temperatur yang mendekati suhu awal ruangan.

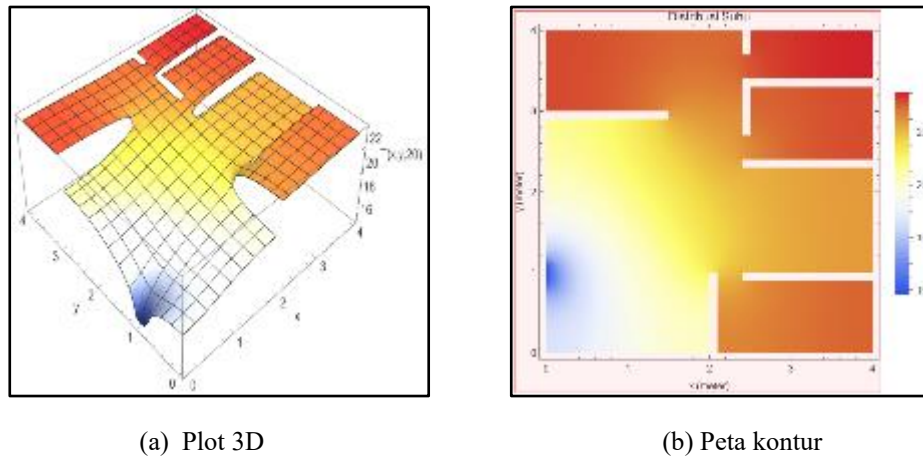
### 3.5. Distribusi Suhu pada $t = 5$



(a) Plot 3D (b) Peta kontur  
 Gambar 5. Grafik solusi perpindahan suhu pada  $t = 5$

Pada waktu ini proses difusi panas mulai menunjukkan penyebaran yang lebih luas. Udara dingin yang dihasilkan oleh AC mulai menyebar ke area sekitarnya yaitu di sekitar ruang tengah melalui mekanisme difusi. Zona dengan suhu rendah di sekitar AC mulai meluas yang kemudian terlihat adanya penurunan suhu ditandai dengan perubahan warna merah ke kuning pada ruang tengah. Selain itu, jarak antar garis kontur menjadi lebih renggang dibandingkan kondisi pada  $t = 1$ , yang menunjukkan bahwa gradien suhu mulai berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa proses penyebaran suhu mulai bergerak menuju kondisi distribusi yang lebih merata.

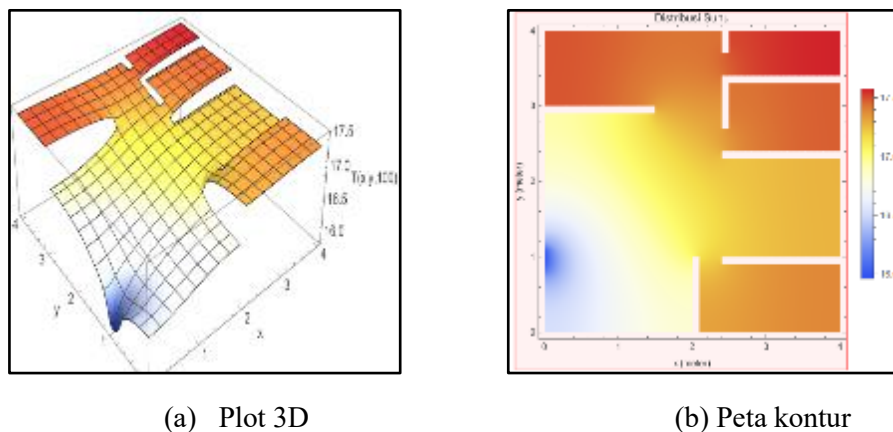
### 3.6. Distribusi Suhu pada $t = 20$



Gambar 6. Grafik solusi perpindahan suhu pada  $t = 20$

Pada waktu  $t = 20$ , proses penyebaran suhu dingin telah menjangkau sebagian besar area dalam domain simulasi. Gradien suhu yang terbentuk semakin kecil sehingga perbedaan temperatur antar titik menjadi semakin tidak signifikan seperti pada kasus  $t = 1$ . Pola kontur yang terlihat menunjukkan distribusi suhu yang lebih halus dibandingkan waktu-waktu sebelumnya. Selain itu, terlihat juga bahwa dinding pembatas antara ruang tamu dengan dapur serta ruang tamu dengan kamar membuat suhu dari pendingin ruangan sulit menjangkau daerah yang dibatasi oleh sekatkan sehingga ruangan yang dibatasi oleh sekatkan cenderung memiliki suhu yang lebih besar dibandingkan yang lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mulai bergerak menuju kondisi kesetimbangan termal.

### 3.7. Distribusi Suhu pada $t = 100$



Gambar 12 Grafik solusi perpindahan suhu pada  $t = 100$

Pada waktu ini sistem telah mendekati kondisi kesetimbangan termal. Grafik tiga dimensi menunjukkan bahwa permukaan temperatur menjadi relatif lebih datar dibandingkan kondisi pada waktu sebelumnya yaitu terlihat suhu sudah berada di antara  $16 - 17,5^{\circ}\text{C}$ . Hal ini menunjukkan bahwa distribusi suhu di dalam ruangan telah menjadi lebih homogen. Perbedaan temperatur antar

titik dalam domain menjadi sangat kecil sehingga sistem dapat dianggap telah mencapai kondisi stabil dan semua ruangan sudah memiliki suhu yang hampir seragam.

### 3.8 Uji Konvergensi Mesh

Uji konvergensi *mesh* merupakan salah satu hal penting dalam menentukan bahwa hasil numerik yang diperoleh sudah sesuai dan stabil tanpa bergantung pada banyaknya elemen *mesh* yang dibentuk. Pengujian kali ini menggunakan tiga jenis *mesh* dengan kategori *mesh* besar, sedang, dan kecil mulai dari suhu awal ruangan (25°C) hingga suhu batas dari pendingin ruangan (16°C) dengan menggunakan waktu yang relatif singkat, yaitu dievaluasi ketika  $t = 0$  sampai  $t = 0.5$ . Hasil dari uji konvergensi *mesh* dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2. Konvergensi *mesh*

Ukuran Mesh	Elemen	Node	Keterangan
0.01	2375	5012	24.95
0.025	1063	2324	24.94
0.03	905	1996	24.94

Terlihat pada waktu  $t = 0$  sampai  $t = 0.5$  serta untuk ukuran *mesh* yang berbeda diperoleh rata-rata suhu tidak ada perbedaan signifikan antara satu sama lain. Selanjutnya, pada tabel terlihat dari 905 elemen ke 2375 elemen hanya terjadi kenaikan suhu di antara 24.94° – 24.95°C sehingga simulasi dikatakan telah mencapai suatu konvergensi. Hal ini menunjukkan bahwa, solusi numerik yang diperoleh telah stabil secara bebas dan tidak bergantung terhadap kerapatan *mesh*, sehingga hasil simulasi dapat dinyatakan valid dan akurat.

### 3.8 Keterbatasan Model

Model yang digunakan dalam penelitian ini masih merupakan pendekatan matematis berbasis difusi panas pada denah dua dimensi. Simulasi pada penelitian kali ini hanya melihat dari pendekatan aspek dalam dua dimensi dan kondisi dinding menggunakan batas Neumann yang merepresentasikan dinding tersebut tidak menyerap panas sehingga berperan dalam isolator yang menahan perpindahan panas ke luar ruangan. Hal ini mengakibatkan model yang dilakukan belum representatif dalam memodelkan ruangan di kehidupan nyata yang berbentuk tiga dimensi serta adanya perubahan suhu akibat pengaruh dari luar ruangan. Dalam kondisi nyata, distribusi suhu dalam ruangan juga dipengaruhi oleh berbagai faktor lain seperti aliran udara konvektif, ventilasi ruangan, serta pergerakan udara yang dihasilkan oleh kipas pada unit pendingin ruangan. Oleh karena itu, model ini dapat dianggap sebagai pendekatan awal secara matematis dengan pendekatan metode elemen hingga untuk memahami proses penyebaran suhu dalam ruangan yang memiliki pendingin udara. Dalam meningkatkan representativitas model, diperlukan beberapa tambahan parameter pada persamaan panas model. Hal ini meliputi suku sumber panas internal  $Q$  yang mewakili beban kalor dari penghuni, lampu, dan peralatan elektronik [25].

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan dan simulasi menggunakan Persamaan Panas serta penyelesaiannya dengan Metode Elemen Hingga (FEM), diperoleh bahwa model yang digunakan sudah mampu menunjukkan proses penyebaran suhu dari AC di dalam denah rumah. Visualisasi pada berbagai nilai waktu menunjukkan pola difusi yang konsisten: daerah sekitar AC mengalami pendinginan paling cepat, sementara ruangan lain yang terpisah oleh dinding mengalami penurunan suhu lebih lambat. Struktur denah ruangan terbukti sangat mempengaruhi laju sebaran suhu, di mana dinding berfungsi sebagai hambatan difusi sehingga menghasilkan perbedaan suhu yang cukup signifikan antar ruang. Pada waktu yang lebih panjang ( $t$  mendekati 100), sistem cenderung mencapai keadaan mendekati tunak, dengan ruangan AC menuju suhu 16°C dan

ruangan lain mempertahankan suhu yang lebih tinggi, sehingga hasil ini tetap logis secara fisis. Selanjutnya, dari hasil uji konvergensi *mesh* untuk  $t = 0$  sampai  $t = 0.5$  diperoleh suhu dalam rentang  $24.94^{\circ} - 24.95^{\circ}\text{C}$  sehingga simulasi dapat dikatakan stabil.

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode FEM efektif digunakan untuk domain berbentuk kompleks seperti denah rumah dan dapat menghasilkan visualisasi distribusi suhu yang realistis dan seragam. Meski demikian, penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan menambahkan faktor lain seperti aliran udara (konveksi), variasi material dinding, sumber panas tambahan, atau validasi dengan pengukuran lapangan agar model semakin mendekati kondisi nyata. Secara keseluruhan, simulasi ini memberikan gambaran awal yang cukup baik mengenai perilaku penyebaran suhu AC dalam ruangan

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Jian, Y. Hou, W. Liu, and X. Chang, "How the coldest local thermal sensation affects overall thermal sensation after turning on the air conditioning—Evidence from chamber experiments," *Build. Environ.*, vol. 191, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.107589.
- [2] S. Yan and X. Li, "Analytical expression of indoor temperature distribution in generally ventilated room with arbitrary boundary conditions," *Energy Build.*, vol. 208, p. 109640, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2019.109640.
- [3] S. Gokarakonda, C. van Treeck, and R. Rawal, "Investigating Optimum Cooling Set Point Temperature and Air Velocity for Thermal Comfort and Energy Conservation in Mixed-Mode Buildings in India," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15062259.
- [4] J. C. P. Putra, A. Firdianto, and N. Ruhyat, "Pola aliran udara dan distribusi temperature diinduksi oleh system air conditioning," *Jurnal Teknik Mesin (Journal Of Mechanical Engineering)*, vol. 9, no. 2, pp. 137–143, Oct. 2020, doi: 10.22441/JTM.V9I2.8204.
- [5] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, "Heat and mass transfer : fundamentals & applications," 2025.
- [6] "Rahman".
- [7] B. Yosep Godja, A. Ihwan, A. Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam, and J. Ilmu Kelautan Fakultas Matematika dan Ilmu pengetahuan Alam Universitas Tanjungpura Jalan Hadari Nawawi, "Penentuan Distribusi Suhu pada Permukaan Geometri Tak Tentu Menggunakan Metode Random Walk," *POSITRON*, vol. 6, no. 1, pp. 17–22, May 2016, doi: 10.26418/POSITRON.V6I1.15922.
- [8] W. F. Tjong, "Pengantar Metode Elemen Hingga untuk Analisis Struktur-Teori, Perumusan, Implementasi Komputer, dan Aplikasi," *Pengantar Metode Elemen Hingga untuk Analisis ...*, vol. 1, pp. 1–523, 2021, Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: [https://books.google.com/books/about/Pengantar\\_Metode\\_Elemen\\_Hingga\\_untuk\\_Ana.html?hl=id&id=FPp1EQAAQBAJ](https://books.google.com/books/about/Pengantar_Metode_Elemen_Hingga_untuk_Ana.html?hl=id&id=FPp1EQAAQBAJ)
- [9] M. N. Z. Abidin and M. Y. Misro, "Numerical Simulation of Heat Transfer using Finite Element Method," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 92, no. 2, pp. 104–115, Apr. 2022, doi: 10.37934/arfmts.92.2.104115.
- [10] L. Simbolon, "Optimization of Air Conditioner (AC) Use on a Room with Finite Element Method Corresponding Author," 2021. [Online]. Available: [www.ijobas.pelnus.ac.id](http://www.ijobas.pelnus.ac.id)
- [11] H. Zhu, S. Hu, G. Wang, L. Han, M. Jing, and X. Zhao, "Full-scale numerical simulation and experimental validation of the thermal environment under the heating mode in an air-conditioned room," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 51, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103548.

- [12] F. Zhang and Y. Ryu, “Simulation study on indoor air distribution and indoor humidity distribution of three ventilation patterns using computational fluid dynamics,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 7, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13073630.
- [13] S. Ifa and Z. Driss, “Numerical simulation and experimental validation of the ventilation system performance in a heated room,” *Air Qual. Atmos. Health*, vol. 14, no. 2, pp. 171–179, Feb. 2021, doi: 10.1007/s11869-020-00923-6.
- [14] D. Sekartaji, Y. Ryu, and D. Novianto, “Effect of ventilation patterns on indoor thermal comfort and air-conditioning cooling and heating load using simulation,” *City and Built Environment*, vol. 1, no. 1, Sep. 2023, doi: 10.1007/s44213-023-00015-y.
- [15] H. Zhou, Å. Fransson, and T. Olofsson, “An explicit finite element method for thermal simulations of buildings with phase change materials†,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/en14196194.
- [16] D. P. Schoplocher, S. Ettengruber, O. Steffens, and E. P. Schoplocher, “Graphical Abstract Improvements for building-performance simulations by a comparative finite-element method analysis Improvements for building-performance simulations by a comparative finite-element method analysis Improvements for building-performance simulations by a comparative finite-element method analysis Lumped-parameter simulation.” [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=4178488>
- [17] S. C. Chapra, “Numerical metho Sollero, P. (1992). Numerical methods for engineers, 2nd edition. In Engineering Analysis with Boundary Elements (Vol. 9, Issue 4). McGraw-Hill Science/Engineering/Math. [https://doi.org/10.1016/0955-7997\(92\)90032-3](https://doi.org/10.1016/0955-7997(92)90032-3) for engineers, 2nd edit,” *Eng. Anal. Bound. Elem.*, vol. 9, no. 4, pp. 367–368, 1992.
- [18] J. N. Reddy and D. K. Gartling, “The Finite Element Method in Heat Transfer and Fluid Dynamics,” Apr. 2010, doi: 10.1201/9781439882573.
- [19] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, “Conduction of Heat in Solids (paperback, ),” pp. 353–387, 1959, Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://global.oup.com/academic/product/conduction-of-heat-in-solids-9780198533689>
- [20] T. L. . Bergman, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Enhanced eText,” 2018, Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Fundamentals+of+Heat+and+Mass+Transfer%2C+8th+Edition-p-9781119353881>
- [21] K. A. . Stroud and D. J. . Booth, “Advanced engineering mathematics,” p. 1111, 2011.
- [22] J. David. Logan, “Applied mathematics,” 2013, Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Applied+Mathematics%2C+4th+Edition-p-9781118475805>
- [23] T. E. . Brown, T. E. /LeMay, H. Eugen. Brown, and B. E. . Bursten, “Chemistry,” 2017, Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://books.google.com/books/about/Chemistry.html?hl=id&id=BPb0DQAAQBAJ>
- [24] W. A. . Strauss, “Partial differential equations : an introduction,” 2018, Accessed: Apr. 21, 2026. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Partial+Differential+Equations%3A+An+Introduction%2C+2nd+Edition-p-9781119496694>
- [25] F. Capelli, J. R. Riba, and J. Sanllehí, “Finite element analysis to predict temperature rise tests in high-capacity substation connectors,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 9, pp. 2283–2291, Jun. 2017, doi: 10.1049/IET-GTD.2016.1717;ISSUE:ISSUE:DOI.