

RESPON PERAMBATAN TERMAL TRANSIEN PADA MATERIAL DINDING BANGUNAN DENGAN VARIASI KETEBALAN MENGGUNAKAN METODE BEDA HINGGA IMPLISIT

Ananta Kusuma Yoga Pratama dan Hari Pranoto

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945, Banyuwangi, 68417, Indonesia

E-mail: ananta@untag-banyuwangi.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menganalisis perpindahan panas konduksi satu dimensi secara transien pada dinding bangunan yang dikenai pembebanan suhu permukaan luar akibat radiasi matahari menggunakan pendekatan numerik berbasis persamaan panas. Persamaan panas satu dimensi diselesaikan dengan metode beda hingga menggunakan metode beda hingga implisit Backward Time–Central Space (BTCS) untuk menjamin stabilitas numerik pada simulasi waktu yang relatif panjang. Tiga jenis material dinding, yaitu bata ringan, bata merah, dan batako, dianalisis dengan variasi ketebalan 0,15 m, 0,20 m, dan 0,25 m. Suhu awal dinding diasumsikan seragam sebesar 25 °C, sementara permukaan luar ditetapkan pada suhu konstan sebesar 34 °C. Hasil simulasi menunjukkan bahwa panas merambat secara bertahap dari permukaan luar menuju bagian dalam dinding, dengan laju penetrasi yang dipengaruhi oleh sifat termofisika material dan ketebalan dinding. Batako menunjukkan respons termal yang lebih cepat dibandingkan bata merah dan bata ringan, sedangkan peningkatan ketebalan dinding secara konsisten memperlambat kenaikan suhu pada sisi dalam. Analisis nondimensi menggunakan Fourier number menegaskan bahwa seluruh sistem berada dalam rezim transien selama waktu simulasi, sehingga perbedaan respons termal yang diamati dapat dijelaskan sebagai konsekuensi langsung dari mekanisme difusi panas dan skala panjang karakteristik dinding.

Kata kunci: *konduksi; termal; radiasi; dinding; BTCS*

Abstract

[Analysis of Transient Thermal Propagation Response of Building Wall Materials under Variations in Radiative Flux] This study investigates one-dimensional transient heat conduction in building walls subjected to external surface temperature loading due to solar radiation using a numerical approach based on the heat equation. The one-dimensional heat equation is solved using the finite difference method with an implicit Backward Time–Central Space (BTCS) scheme to ensure numerical stability for relatively long simulation times. Three types of wall materials—lightweight concrete, clay brick, and concrete block—are analyzed with wall thickness variations of 0.15 m, 0.20 m, and 0.25 m. The initial wall temperature is assumed to be uniformly 25 °C, while the external wall surface is maintained at a constant temperature of 34 °C. The simulation results indicate that heat propagates gradually from the outer surface toward the inner region of the wall, with the penetration rate governed by the thermophysical properties of the materials and wall thickness. Concrete block exhibits a faster thermal response compared to clay brick and lightweight concrete, whereas increasing wall thickness consistently delays the temperature rise at the inner side. Dimensionless analysis using the Fourier number confirms that the system remains in the transient regime throughout the simulation period, and the observed differences in thermal response can be attributed directly to heat diffusion mechanisms and characteristic length scaling of the wall.

Keywords: *conduction; thermal; radiation; wall; BTCS*

PENDAHULUAN

Kenaikan suhu lingkungan yang terjadi secara global berimplikasi langsung pada meningkatnya kebutuhan energi untuk sistem pendingin ruangan, terutama pada bangunan

dengan skala besar [1–4]. Salah satu penyebab utama peningkatan beban pendinginan adalah masuknya panas dari lingkungan luar melalui elemen selubung bangunan, khususnya dinding, yang berfungsi sebagai jalur utama perambatan panas dari permukaan luar menuju ruang dalam

[5–7]. Oleh karena itu, upaya peningkatan kinerja termal dinding banyak difokuskan pada modifikasi material dan sistem dinding untuk mengurangi laju perpindahan panas dan beban pendinginan bangunan. Sebagian besar bangunan di Kawasan beriklim tropis, termasuk Indonesia, masih didominasi oleh material berbasis semen dan beton untuk elemen struktur maupun selubung bangunan, terutama pada bangunan hunian. Elemen struktur dapat dibuat menggunakan beton konvensional seperti beton bertulang, maupun beton komposit modern seperti beton bertulang serat, yang terutama dikembangkan untuk meningkatkan performa mekanik dan daktilitas struktur [8,9]. Sedangkan untuk dinding luar bangunan kerap dibangun dengan unit pasangan seperti bata ringan, batako, atau blok beton ringan, yang sifat termalnya sangat menentukan besarnya aliran panas yang menembus dinding [10–12].

Upaya peningkatan kinerja termal dinding banyak dilakukan melalui pengembangan beton ringan dan komposit berongga/ berpori untuk menurunkan densitas dan konduktivitas panas, sekaligus meningkatkan keterlambatan waktu (*time lag*) dan menurunkan fluktuasi heat flux dibanding beton konvensional pada kondisi iklim yang sama [6,7,13]. Penggunaan agregat ringan seperti vermikulit, perlit, LECA, maupun penambahan rongga udara dalam unit pasangan dinding (misalnya batako/ blok beton berongga dan bata ringan) terbukti meningkatkan resistansi termal dan dapat mengurangi beban panas ke dalam ruang [14,15]. Selain itu, berbagai material *bio-based* dan limbah pertanian dikaji sebagai campuran atau insulasi untuk mengurangi konduktivitas termal dinding, seperti serat kayu, sekam padi, serat tanaman rawa, dan serat/ agregat lainnya [16–21]. Pendekatan serupa juga diterapkan pada material komposit kayu–plastik untuk meningkatkan performa termal dinding kayu [22,23]. Di samping itu, terdapat penelitian mengenai penggunaan dinding kaca tipe cerobong surya (*solar chimney*) sebagai pengganti dinding kaca tunggal untuk menurunkan suhu di dalam rumah [24].

Tantangan terbesar dalam riset termal bangunan adalah biaya tinggi untuk instrumen dan tenaga ahli jika menggunakan pengukuran langsung di lapangan. Meski demikian sebagian besar pengukuran suhu di dalam

dinding dilakukan melalui pengukuran langsung menggunakan instrumen karena akan diperoleh nilai suhu yang akurat. Komponen yang harus disiapkan meliputi biaya untuk pengukuran lapangan, pengadaan peralatan, serta tenaga ahli yang berpengalaman. Oleh karena itu, simulasi berbasis model matematis menjadi salah satu alternatif untuk memperkirakan suhu sebagai data pendukung dalam analisis konsumsi energi listrik [25]. Pendekatan ini hanya memerlukan sebagian data lapangan, lebih efisien dalam penggunaan sumber daya, dan dapat menekan biaya penelitian. Pada penelitian ini dilakukan pengembangan simulasi model fisis untuk menentukan suhu di dalam dinding dan pada permukaan dinding bagian dalam pada setiap waktu untuk berbagai jenis material yang digunakan sebagai dinding, yaitu bata ringan, batu bata merah, dan batako. Dengan diketahui suhu pada dinding bagian luar, dilakukan perbandingan suhu pada dinding bagian dalam untuk dinding dengan ketebalan yang berbeda.

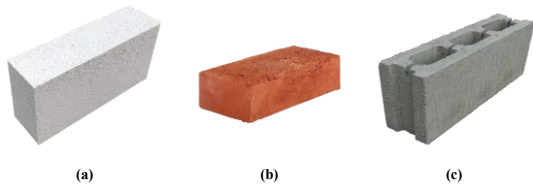
METODE

Objek dan Material Penelitian

Objek penelitian dalam studi ini adalah dinding bangunan yang menerima paparan panas dari lingkungan luar dan mentransferkannya menuju sisi dalam bangunan melalui mekanisme konduksi. Perpindahan panas diasumsikan berlangsung dominan dalam arah tegak lurus dinding (arah ketebalan), sehingga sistem direpresentasikan sebagai masalah satu dimensi. Variasi suhu pada arah vertikal dan horizontal diabaikan dengan asumsi bahwa distribusi suhu pada bidang dinding relatif seragam dan pengaruh gradien suhu lateral tidak signifikan dibandingkan gradien suhu sepanjang ketebalan dinding.

Model dinding disimulasikan sebagai lapisan homogen tanpa mempertimbangkan keberadaan plester, rongga udara, maupun lapisan finishing lainnya, sehingga karakteristik termal dinding sepenuhnya ditentukan oleh sifat fisik material utama penyusunnya. Ketebalan dinding divariasikan menjadi tiga tingkat, yaitu 15 cm, 20 cm, dan 25 cm, yang merepresentasikan ketebalan umum dinding bangunan pada konstruksi perumahan dan Gedung. Material dinding yang dianalisis terdiri bata ringan, bata merah, dan batako, yang

ditampilkan pada Gambar 1. Ketiga material tersebut memiliki perbedaan struktur mikro, tingkat porositas, serta kepadatan, yang berimplikasi langsung terhadap nilai konduktivitas termal dan massa jenis material, sehingga memengaruhi laju perambatan panas di dalam dinding.



Gambar 1. Material dinding a) bata ringan (*cellular lightweight concret*); b) bata merah (*brick*); c) batako (*dense concret*).

Parameter sifat termal material yang digunakan dalam simulasi meliputi konduktivitas termal, dan massa jenis, yang ditunjukkan pada Tabel 1. Parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai difusivitas panas masing-masing material sebagai dasar dalam pemodelan perambatan panas transien di dalam dinding, dengan λ adalah konduktivitas termal material yang menunjukkan kemampuan material dalam menghantarkan panas; ρ adalah massa jenis material dinding, yang menunjukkan banyaknya massa per satuan volume; C_p adalah kalor jenis material yang menunjukkan jumlah panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu satu satuan massa material sebesar satu derajat Celsius.

Tabel 1. Karakteristik termal material selubung bangunan [26]

Material	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	λ (W/m.K)
Bata ringan	800	719	0,33
Bata merah	1800	835	0,81
Batako	2400	800	2,40

Perambatan Panas Satu Dimensi

Persamaan panas pada kondisi tidak tunak (transien) yang digunakan untuk menjelaskan mekanisme perpindahan panas di dalam dinding dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial parsial satu dimensi [9]. Persamaan ini menggambarkan hubungan

antara perubahan suhu terhadap waktu dan perubahan suhu terhadap posisi di dalam medium padat, dalam hal ini material dinding.

Bentuk umum persamaan panas satu dimensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

untuk setiap $(x, t) \in [0, l] \times [0, \tau]$ dengan x menyatakan posisi atau kedalaman di dalam dinding yang diukur dari permukaan luar dinding (m); t menyatakan waktu (sekon atau jam) selama proses simulasi berlangsung; l adalah ketebalan total dinding (m); τ adalah waktu total simulasi; $u = u(x, t)$ adalah suhu dinding pada posisi x dan waktu t . Parameter α pada persamaan tersebut merupakan difusivitas panas (m²/s), yang menunjukkan seberapa cepat panas merambat di dalam suatu material, yang didefinisikan sebagai

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}, \quad (2).$$

Untuk menyederhanakan proses perhitungan numerik dan mempermudah analisis, persamaan panas satu dimensi ditransformasikan ke dalam bentuk tak berdimensi:

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{\partial^2 U}{\partial X^2}, \quad (3)$$

dengan $X = \frac{x}{l}$, $T = \frac{\alpha t}{l^2}$, dan $U = \frac{u - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}}$.

Domain dinding dibagi menjadi beberapa lapisan kecil (node) sepanjang ketebalan dinding. Suhu pada setiap titik dihitung berdasarkan keseimbangan aliran panas dari titik-titik di sekitarnya pada waktu sebelumnya. Dengan cara ini, dapat diperoleh distribusi suhu di dalam dinding sebagai fungsi posisi dan waktu.

Kondisi awal didefinisikan sebagai suhu dinding yang seragam sebesar u_0 pada seluruh ketebalan dinding. Dalam bentuk tak berdimensi, kondisi awal dinyatakan sebagai:

$$U(X, 0) = \frac{u_0 - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}}, \quad \text{untuk } 0 \leq X \leq 1.$$

Kondisi batas pada permukaan luar dinding ditetapkan sebagai suhu konstan yang merepresentasikan pengaruh radiasi matahari, sedangkan kondisi batas pada permukaan dalam dinding merepresentasikan suhu sisi dalam ruangan.

Dalam formulasi tak berdimensi, kondisi batas tersebut dinyatakan sebagai $U(0, T) = 1$ dan $U(1, T) = \frac{u_l - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}}$.

Persamaan panas diselesaikan secara numerik menggunakan metode beda hingga dengan skema *Backward Time – Central Space* (BTCS) yang merepresentasikan bahwa suhu pada suatu titik dipengaruhi oleh suhu titik-titik tetangganya dan kondisi sebelumnya, yaitu

$$\frac{U_i^m - U_i^{m-1}}{\Delta T} = \frac{U_{i-1}^m - 2U_i^m + U_{i+1}^m}{(\Delta X)^2} \quad (4)$$

Pemilihan skema implisit ini bertujuan untuk memperoleh solusi yang stabil secara numerik, terutama untuk simulasi waktu yang relatif panjang.

Prosedur Simulasi

Perpindahan panas pada dinding bangunan dimodelkan sebagai konduksi panas satu dimensi dalam arah ketebalan dinding. Persamaan konduksi panas diselesaikan secara transien menggunakan skema implisit BTCS. Domain dinding dengan ketebalan L didiskritisasi menjadi sejumlah node spasial sebanyak N . Dalam penelitian ini, untuk setiap variasi ketebalan dinding dibagi menjadi 61 node. Diskritisasi ini bertujuan untuk memperoleh resolusi spasial yang cukup dalam menangkap gradien suhu di dalam material. Posisi setiap node dihitung secara linier dari sisi luar hingga sisi dalam dinding. Simulasi dilakukan dengan interval waktu sebesar 10 detik dan durasi total 3 jam. Distribusi suhu awal diasumsikan seragam sebesar 25°C di seluruh domain. Kondisi batas diterapkan berupa suhu tetap sebesar 34°C pada sisi luar dinding (*Dirichlet boundary*), sedangkan sisi dalam dinding diasumsikan adiabatik dengan gradien suhu nol, ditampilkan pada gambar 2.

```

11 - format short g
12
13 %% ----- Simulation Domain -----
14 - L = 0.20;           % Ketebalan dinding (m)
15 - nx = 61;           % Jumlah node spasial
16 - dx = L/(nx-1);
17 - x = linspace(0, L, nx)';
18
19 %% ----- Time Setup -----
20 - dt = 10;           % Time step (s)
21 - t_end = 3 * 3600; % Total simulasi (7 Jam)
22 - nt = round(t_end/dt);
23 - tges = linspace(0, t_end, nt+1)';
24
25 %% ----- Material Properties (Batako) -----
26 - rho = 2400;        % Density (kg/m^3)
27 - Lambda = 2.40;    % Thermal Conductivity (W/mK)
28 - cp = 800;         % Specific Heat (J/kgK)
29
30 - alpha = Lambda/(rho*cp);

```

Gambar 2. Pengaturan domain simulasi, parameter waktu, dan sifat material pada program.

Parameter material yang digunakan meliputi densitas, konduktivitas termal, dan

kalor jenis. Difusivitas termal dihitung menggunakan $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, kemudian digunakan untuk menentukan bilangan difusi numerik dalam skema beda hingga. Persamaan diferensial parsial didiskritisasi menggunakan metode beda hingga implisit sehingga diperoleh sistem persamaan linear tridiagonal yang diselesaikan pada setiap langkah waktu, ditampilkan pada gambar 3.

```

26 - rho = 2400;           % Density (kg/m^3)
27 - Lambda = 2.40;      % Thermal Conductivity (W/mK)
28 - cp = 800;           % Specific Heat (J/kgK)
29
30 - alpha = Lambda/(rho*cp);
31 - kx = alpha * dt / dx^2;
32 - fprintf('Diffusion number kx = %4e \n', kx)
33
34 %% ----- Initial & Boundary Conditions -----
35 - TL = 34;            % Suhu luar tetap (Celsius)
36 - Tstart = 25;       % Suhu awal seluruh dinding
37
38 - T = Tstart * ones(nx, 1);
39 - T(1) = TL;         % Sisi kiri (luar)
40 - Tp = T;
41
42 %% ----- Build Matrix A (Implicit) -----
43 % Kita menyelesaikan untuk node 2 sampai nx (N = nx-1)
44 - N = nx - 1;
45 - e = ones(N, 1);

```

Gambar 3. Pengaturan parameter material dan skema numerik implisit dalam simulasi.

Distribusi suhu diperbarui secara iteratif hingga waktu simulasi tercapai. Suhu pada permukaan dalam dinding diekstraksi sebagai fungsi waktu untuk mengevaluasi performa isolasi termal material., ditampilkan pada Gambar 4. Profil distribusi suhu terhadap posisi (ketebalan dinding) dan waktu divisualisasikan dalam bentuk heatmap untuk menggambarkan propagasi panas dari sisi luar ke dalam dinding

```

54 - Tsol = zeros(nx, nt+1);
55 - Tsol(:, 1) = T;    % Simpan kondisi awal
56 - T_inner_surface = zeros(nt+1, 1);
57 - T_inner_surface(1) = T(nx);
58 %% ----- Time Loop -----
59 - fprintf('Starting simulation...\n')
60 - tic
61 - for k = 1:nt
62     % Bangun Right-Hand Side (RHS) dari suhu sebelumnya (n
63     RHS = Tp(2:nx);
64     % Kontribusi Boundary Kiri (Dirichlet)
65     RHS(1) = RHS(1) + kx * TL;
66     % Solve Sistem Linear
67     T_new_nodes = A \ RHS;
68     % Update Vektor Suhu
69     T(2:nx) = T_new_nodes;
70     T(1) = TL; % Tetap
71     % Simpan Hasil
72     Tsol(:, k+1) = T;
73     T_inner_surface(k+1) = T(nx);

```

Gambar 4. Pengaturan loop waktu dan pembaruan distribusi suhu dalam simulasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

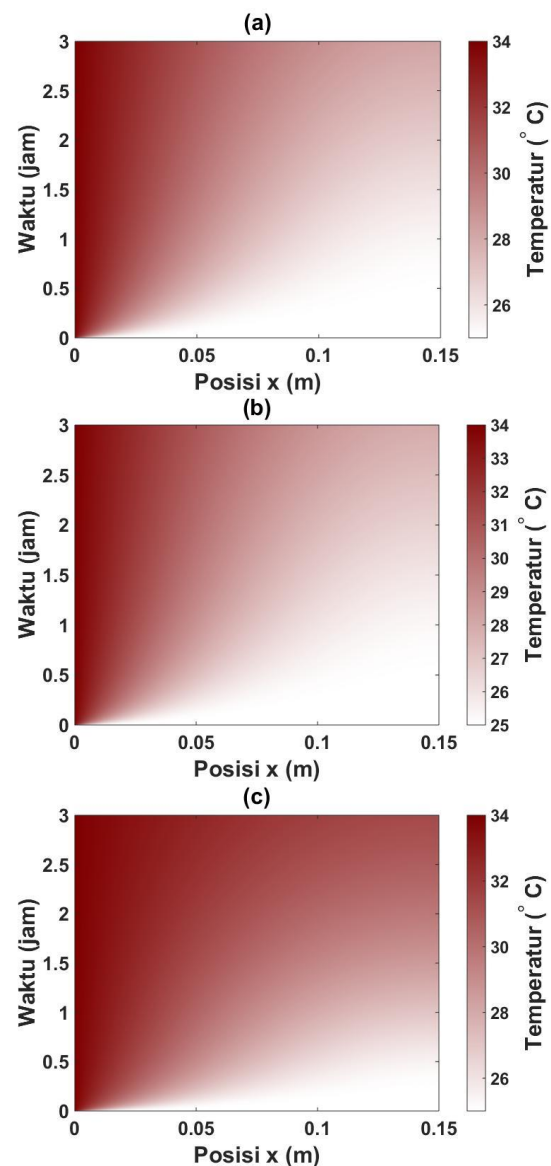
Distribusi Suhu Spasial dan Temporal pada Dinding

Bagian ini menyajikan hasil simulasi numerik konduksi panas satu dimensi secara transien pada dinding bangunan yang dikenai pembebanan suhu permukaan luar akibat radiasi matahari dengan suhu rata-rata sebesar 34 °C. Variasi ketebalan dinding sebesar 0,15 m, 0,20 m, dan 0,25 m dianalisis untuk menangkap pengaruh panjang karakteristik difusi terhadap kedalaman penetrasi panas dan respons waktu termal. Suhu awal dinding dalam ditetapkan seragam sebesar 25 °C, yang merepresentasikan kondisi kesetimbangan termal ruang dalam sebelum pemanasan akibat radiasi matahari. Permukaan dalam dinding diasumsikan terisolasi secara termal, sedangkan tiga jenis material dinding yang umum digunakan, yaitu bata ringan jenis CLC (*cellular lightweight concrete*), bata merah, dan batako, dipertimbangkan untuk mengevaluasi pengaruh difusivitas termal material.

Jarak diskretisasi ruang ditetapkan sebesar 2,5 cm untuk menjamin resolusi gradien suhu yang memadai di sepanjang ketebalan dinding sekaligus menjaga stabilitas numerik. Evolusi suhu dihitung menggunakan skema beda hingga implisit, sehingga memungkinkan simulasi yang stabil untuk rentang waktu pemanasan yang relatif panjang. Berdasarkan hasil simulasi pada ketebalan dinding 15 cm, laju penetrasi panas ke dinding dalam untuk material batako lebih cepat dibandingkan material lainnya. Pola kontur suhu menunjukkan bahwa perpambatan panas tidak terjadi secara instan, melainkan mengikuti karakteristik difusi yang ditentukan oleh difusivitas termal material, $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$. Secara fisis, hal ini konsisten dengan solusi transien persamaan panas satu dimensi, dengan jarak penetrasi panas meningkat sebanding dengan $\sqrt{\alpha t}$. Oleh karena itu, untuk material dengan nilai α yang lebih besar, front panas akan menjangkau kedalaman yang lebih besar dalam interval waktu yang sama. Berdasarkan nilai difusivitas batako yang hampir dua kali lipat lebih besar dibandingkan bata ringan ($\alpha = 12,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$), energi panas merambat secara lebih cepat pada batako sehingga respons suhu pada permukaan dalam terjadi lebih cepat.

Gambar 5 menunjukkan distribusi suhu spasial-temporal pada dinding dengan

ketebalan 15 cm selama 3 jam pemanasan akibat paparan radiasi matahari. Pola kontur memperlihatkan bahwa *front* panas merambat secara bertahap dari permukaan luar menuju bagian dalam dinding.



Gambar 5. Perpindahan panas dari permukaan luar menuju permukaan dalam pada dinding dengan ketebalan 15 cm selama 3 jam untuk material: (a) bata ringan, (b) bata merah, dan (c) batako.

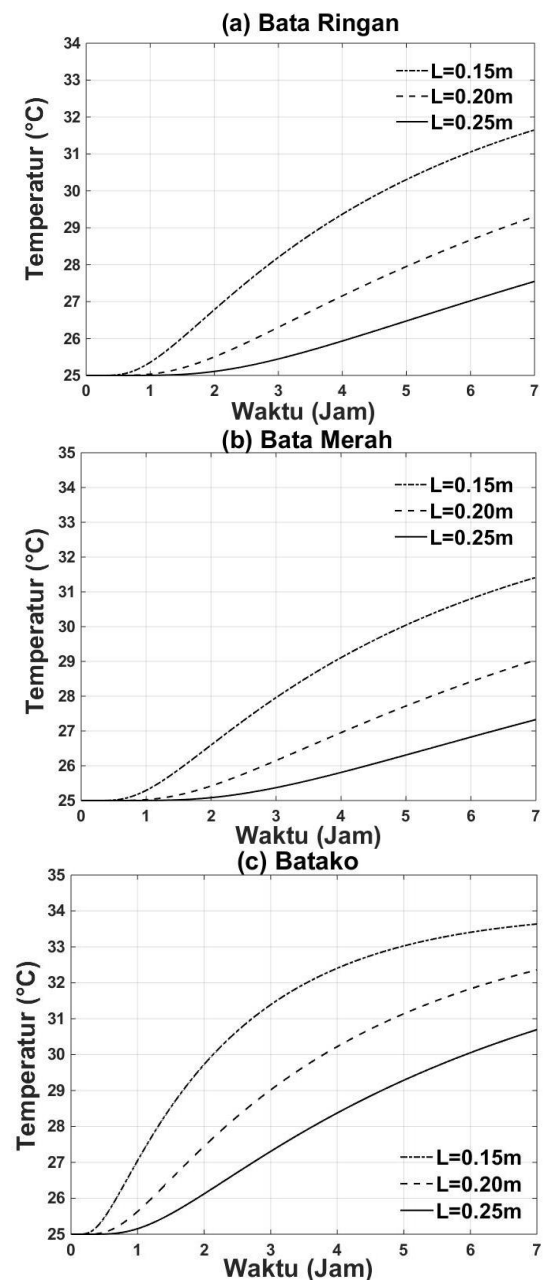
Gradien suhu yang tajam pada tahap awal menunjukkan dominasi mekanisme difusi, yaitu energi termal pertama kali diserap oleh lapisan dekat permukaan sebelum mencapai kedalaman yang lebih besar. Pada ketiga material, kenaikan suhu pada sisi luar terjadi secara cepat karena

distribusi suhu sangat dipengaruhi oleh kondisi awal seragam (25 °C), dan respons material terutama dikendalikan oleh difusivitas termal. Namun, laju propagasi panas ke arah dalam menunjukkan perbedaan yang signifikan antar material.

Berdasarkan peta distribusi termal, pada waktu sekitar 30 menit, distribusi suhu pada sisi dalam dinding batako telah mengalami peningkatan suhu sekitar 0,5 °C, yang mengindikasikan bahwa energi panas telah mulai mencapai batas dinding bagian dalam. Kenaikan suhu pada sisi dalam dinding batako menunjukkan bahwa gelombang panas sudah menembus ketebalan dinding, menandakan difusivitas termal efektif yang lebih tinggi dan inersia termal yang lebih rendah. Sedangkan pada dinding bata ringan dan bata merah belum menunjukkan respon termal yang signifikan, dengan distribusi suhu yang masih berada pada kondisi awal (kesetimbangan). Ketidakresponsifan dinding bata ringan dan bata merah dalam 30 menit menunjukkan efek penundaan (*time lag*) yang lebih panjang dan *decrement factor* yang lebih kecil, selaras dengan hasil eksperimen dan model pada dinding inertial bermassa besar atau *insulative* [27]. Pola ini sejalan dengan teori konduksi transien dan studi-studi yang menekankan pentingnya hubungan antara λ , ρ , C_p , ketebalan dinding, dan geometri rongga, dalam menentukan kecepatan dan besarnya respon termal sisi bagian dalam [28].

Pengaruh ketebalan dinding terhadap dinamika suhu bagian dalam ditunjukkan secara lebih jelas pada Gambar 6. Pada ketebalan yang sama, batako mencapai suhu bagian dalam yang lebih tinggi dalam interval waktu pemanasan yang sama dibandingkan bata merah dan beton ringan. Hal ini mengindikasikan bahwa batako memiliki kemampuan insulasi termal yang lebih rendah, sehingga kurang efektif dalam menahan laju perpindahan panas menuju ruang dalam. Bata ringan, di sisi lain, secara konsisten menunjukkan suhu bagian dalam yang paling rendah untuk seluruh variasi ketebalan, yang menegaskan perannya sebagai material dengan performa termal yang lebih baik dalam konteks peredaman panas akibat radiasi matahari. Dari sudut desain selubung bangunan, temuan ini mengindikasikan bahwa batako tanpa optimasi geometri atau insulasi tambahan berpotensi kurang menguntungkan dalam menahan lonjakan suhu luar, sedangkan dinding bata

ringan dan bata merah dapat berperan sebagai “*buffer termal*” yang lebih efektif pada skala waktu beberapa jam hingga harian [29].



Gambar 6. Perbandingan pembacaan suhu dinding bagian dalam terhadap waktu pada variasi ketebalan dinding: (a) bata ringan, (b) bata merah, dan (c) batako.

Pola kurva suhu permukaan dalam pada Gambar 6 menunjukkan secara jelas bahwa untuk ketiga material, peningkatan ketebalan dinding secara konsisten menyebabkan keterlambatan respons termal dan penurunan

laju kenaikan suhu pada permukaan dalam. Kemiringan kurva yang semakin landai dan pergeseran waktu tercapainya suhu maksimum ke arah (t) yang lebih besar mengindikasikan bahwa skala waktu difusi termal meningkat seiring bertambahnya panjang lintasan rambat panas konsisten dengan dependensi $t \sim l^2/\alpha$, untuk konduksi transien satu dimensi yang menempatkan difusivitas termal sebagai pengontrol utama kecepatan perambatan panas [30].

Meskipun difusivitas termal menjadi parameter penentu jenis respon material, besarnya pangkat dua pada parameter ketebalan (l^2) menunjukkan bahwa modifikasi geometris dinding (ketebalan) memberikan dampak yang lebih signifikan terhadap penundaan panas dibandingkan modifikasi sifat termal material (α) secara linear. Dengan demikian, meskipun kondisi batas luar identik, dinding yang lebih tebal mampu memberikan efek penundaan yang lebih signifikan terhadap fluktuasi suhu luar.

Signifikansi efek penundaan ini berimplikasi langsung pada profil distribusi suhu akhir, di mana nilai suhu maksimum pada permukaan dalam tetap berada jauh di bawah suhu permukaan luar sepanjang durasi simulasi. Kondisi tersebut menegaskan bahwa sistem sepenuhnya berada dalam fase respons transien dan belum mencapai kesetimbangan tunak (*steady-state*) [31]. Secara fisis, hal ini membuktikan bahwa hambatan termal dan inersia material berhasil menekan amplitudo suhu melalui *decrement factor* yang signifikan, sehingga panas yang terserap tidak seluruhnya diteruskan ke ruang dalam. Temuan ini sangat relevan untuk merepresentasikan kondisi bangunan dengan siklus pemanasan harian yang periodik, di mana fluktuasi suhu luar cenderung berubah kembali sebelum kondisi tunak sempat tercapai secara penuh. Dengan demikian, hasil ini menegaskan temuan dalam literatur bahwa performa termal dinding bangunan pada skala waktu harian dipengaruhi secara simultan oleh dimensi ketebalan dan sifat termofisika material—khususnya difusivitas termal. Hal ini memperkuat argumen bahwa evaluasi kinerja selubung bangunan sebaiknya tidak hanya terpaku pada nilai statis (seperti *U-value*), tetapi wajib memasukkan parameter transien seperti *time lag* dan *decrement factor*, terutama untuk mengoptimalkan desain bangunan di iklim tropis dengan fluktuasi suhu luar yang kuat [32].

Secara keseluruhan, hasil simulasi ini mengonfirmasi hipotesis bahwa performa termal dinding bangunan tidak hanya ditentukan oleh ketebalan, tetapi juga oleh sifat termofisika material penyusunnya [33]. Kombinasi ketebalan yang memadai dan material dengan difusivitas termal rendah terbukti efektif dalam memperlambat penetrasi panas ke ruang dalam, yang berimplikasi langsung pada peningkatan kenyamanan termal dan potensi penghematan energi pendinginan. Temuan ini memberikan dasar kuantitatif yang kuat untuk pemilihan material dan desain dinding bangunan di daerah beriklim tropis dengan intensitas radiasi matahari yang tinggi.

Analisis Nondimensi Menggunakan bilangan Fourier

Transformasi persamaan panas ke dalam bentuk tak berdimensi, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (3), memungkinkan analisis respons termal dinding dilakukan secara lebih umum dan bebas dari skala absolut waktu maupun ketebalan [34]. Dalam formulasi ini, parameter waktu tak berdimensi $T = \alpha t/l^2$ merepresentasikan bilangan Fourier (F_0), yang secara fisika menyatakan rasio antara laju difusi panas terhadap kapasitas penyimpanan panas dalam medium padat. Lebih jauh lagi, F_0 juga berfungsi sebagai parameter keserupaan (*similarity*) yang menggambarkan kemiripan variasi suhu pada lapisan dinding yang berbeda, terlepas dari perbedaan material penyusunnya.

Berdasarkan Gambar 5 dan 6, hingga waktu $t = 7$ jam, nilai F_0 untuk seluruh spesimen tetap berada pada orde rendah ($F_0 \ll 1$). Hal ini menjelaskan persistensi gradien suhu yang tajam dan penyebab suhu permukaan dalam belum mencapai kondisi kuasi-tunak. Dalam kerangka nondimensi ini, perbedaan respons antar material merupakan manifestasi dari laju peningkatan nilai F_0 . Batako, dengan difusivitas yang lebih tinggi, mencapai ambang penetrasi panas lebih cepat dibandingkan bata merah atau beton ringan. Secara bersamaan, peningkatan ketebalan memperlambat peningkatan nilai F_0 secara kuadratik ($F_0 \propto \alpha t/l^2$), yang secara fisis memperpanjang fase transien dan meningkatkan efek penundaan panas.

Konsistensi hasil simulasi pada berbagai variasi material dan ketebalan saat ditransformasikan ke dalam bentuk nondimensi membuktikan validitas penskalaan fisika yang digunakan. Fenomena ini menegaskan bahwa

model telah mengikuti hukum keserupaan termal (*thermal similarity law*), di mana mekanisme difusi panas direpresentasikan secara konsisten oleh bilangan Fourier. Selain itu, penggunaan skema implisit BTCS menjamin bahwa profil suhu yang teramati merupakan representasi fisis dari proses transien, dengan meminimalkan risiko instabilitas numerik yang dapat mendistorsi hasil analisis. Hal ini sejalan dengan pendekatan yang menempatkan bilangan Fourier dan Biot sebagai parameter pengendali utama dalam pemodelan struktur bangunan [35].

Dari aspek reliabilitas numerik, pemilihan nilai F_o sangat krusial untuk menjamin akurasi perhitungan tak tunak. Merujuk pada studi eksperimental yang pernah dilakukan sebelumnya, hasil simulasi yang paling akurat (distorsi minimum) pada dinding multilapis dicapai ketika setiap lapisan kondisional memiliki nilai F_o di kisaran 0,17 hingga 0,5 [36]. Berbeda dengan studi-studi tersebut yang memfokuskan F_o sebagai kriteria diskritisasi, analisis dalam penelitian ini memanfaatkan F_o sebagai kerangka fisis untuk memahami dinamika penetrasi panas. Pendekatan ini sangat relevan karena dalam kondisi nyata, proses perpindahan panas melalui dinding bangunan selalu berlangsung dalam kondisi tak tunak akibat fluktuasi suhu lingkungan dan radiasi surya harian. Dengan demikian, analisis berbasis F_o memberikan landasan kuantitatif yang kokoh untuk mengevaluasi desain dinding di iklim tropis, di mana pengendalian penetrasi panas transien menjadi prioritas utama bagi kenyamanan termal penghuni dan efisiensi energi bangunan.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Penelitian ini menganalisis konduksi panas satu dimensi secara transien pada dinding bangunan dengan variasi ketebalan dan material menggunakan metode numerik implisit. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perpambatan panas dari permukaan luar ke bagian dalam dinding dikendalikan oleh mekanisme difusi panas, dengan respons termal yang dipengaruhi secara signifikan oleh difusivitas termal material dan ketebalan dinding. Material dengan difusivitas termal lebih tinggi menunjukkan penetrasi panas yang lebih cepat, sedangkan peningkatan ketebalan dinding secara konsisten memperlambat kenaikan suhu

pada sisi dalam. Analisis nondimensi menggunakan bilangan Fourier menegaskan bahwa selama waktu pemanasan hingga 7 jam, sistem masih berada pada rezim difusi transien, sehingga gradien suhu di dalam dinding tetap tajam dan suhu permukaan dalam belum mendekati suhu permukaan luar. Dengan demikian, perbedaan respons termal yang diamati merupakan konsekuensi langsung dari sifat termofisika material dan skala panjang karakteristik difusi.

Saran

Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model dengan kondisi batas yang lebih realistis, seperti mempertimbangkan konveksi pada permukaan dalam dan variasi suhu permukaan luar yang bersifat periodik. Selain itu, integrasi model konduksi dinding dengan model termal ruang dalam dapat dilakukan untuk meningkatkan relevansi hasil terhadap aplikasi perancangan bangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Jafarpur P, Berardi U. 2021. Effects of climate changes on building energy demand and thermal comfort in Canadian office buildings adopting different temperature setpoints Canadian Model of Ocean Carbon Canadian Weather Year for Energy Calculation. *J. Build. Eng.* **42**(May): 102725.
- 2 Qin M, Feaugas O, Zu K. 2022. Energy & Buildings Novel metal-organic framework (MOF) based phase change material composite and its impact on building energy consumption. *Energy Build.* **273**: 112382.
- 3 Ghamari M, Hwang C, Hughes D, Mallick T, Reddy KS, Patchigolla K, Sundaram S. 2024. Energy & Buildings Advancing sustainable building through passive cooling with phase change materials, a comprehensive literature review. *Energy Build.* **312**(February): 114164.
- 4 Webb M. 2022. Biomimetic building facades demonstrate potential to reduce energy consumption for different building typologies in different climate zones. *Clean Technol. Environ. Policy.* **24**(2): 493.
- 5 Elghamry R, Hassan H. 2019. Impact of

- window parameters on the building envelope on the thermal comfort , energy consumption and cost and environment. *Int. J. Vent.* **0**(0): 1.
- 6 Ustaoglu A, Kurtoglu K, Gencil O, Kocuyigit F. 2020. Impact of a low thermal conductive lightweight concrete in building: Energy and fuel performance evaluation for different climate region. *J. Environ. Manage.* **268**(May): 110732.
- 7 Sassine E, Kinab E, Cherif Y, Antczak E, Nasrallah M. 2021. Thermal performance of lightweight concrete applications in building envelopes in Lebanon. *Build. Simul.* **14**(5): 1359.
- 8 Khabaz A. 2022. Assessment of frictional-bond strength at the interface of single SSF in cementitious composite and prediction of accompanying pressure of surrounding matrix. *Compos. Interfaces.* **29**(7): 765.
- 9 Khabaz A. 2023. Pull-off bond strength of novel wide rounded ends fiber and impact of fiber stretching on fiber / matrix frictional-slip bond strength. *Compos. Interfaces.* **30**(4): 393.
- 10 Opoku R, Obeng GY, Darkwa J, Kwofie S. 2020. Minimizing heat transmission loads and improving energy efficiency of building envelopes in sub-Saharan Africa using bio-based composite materials. *Sci. African.* **8**: e00358.
- 11 Zoure AN, Genovese PV. 2023. Comparative Study of the Impact of Bio-Sourced and Recycled Insulation Materials on Energy Efficiency in Office Buildings in Burkina Faso. *Sustainability.* **15**: .
- 12 Dowou K, Nougbléga Y, Toka KA, Amou KA. 2025. Numerical Study of Integrating Thermal Insulation Local Bio-Sourced Materials into Walls and Roofs for Thermal Comfort Improvement in Buildings in a Tropical Climate. *Constr. Mater.* **5**(4): .
- 13 Lee YH, Chua N, Amran M, Lee YY, Kueh AH, Fediuk R, Vatin N, Vasilev Y. 2021. Thermal Performance of Structural Lightweight Concrete Composites for Potential Energy Saving. *Crystals.* **11**: 1.
- 14 Khan FJ. 2022. Investigative Study on the Properties of Hollow Concrete Blocks. *Int. J. Innov. Res. Comput. Sci. Technol.* **9**(1): 49.
- 15 Ali YAY, Fahmy EHA, Abouzeid MN, Shaheen YBI, Abdel MN. 2020. Use of expanded polystyrene wastes in developing hollow block masonry units. *Constr. Build. Mater.* **241**: 118149.
- 16 Philip S, Rakendu R. 2020. Materials Today : Proceedings Thermal insulation materials based on water hyacinth for application in sustainable buildings. *Mater. Today Proc.* **33**: 3803.
- 17 Torres-rivas A, Palumbo M, Haddad A, Cabeza LF, Jiménez L. 2018. Multi-objective optimisation of bio-based thermal insulation materials in building envelopes considering condensation risk. *Appl. Energy.* **224**(April): 602.
- 18 Montrose G, Soubdhan T. 2021. Study of the Thermal Performance of Bio-Sourced Materials Used as Thermal Insulation in Buildings under Humid Tropical Climate. *Int. J. Civ. Environ. Eng.* **15**(7): 360.
- 19 Laoubi H, Meddah A, Pantelidis L, Laoubi H. 2025. Bio-Based Plaster Composites Reinforced with Typha *Angustifolia* Fibers: Mechanical and Thermal Behavior for Energy-Efficient Building Envelopes Bio-Based Plaster Composites Reinforced with Typha *Angustifolia* Fibers: *J. Nat. Fibers.* **22**(1): .
- 20 Marin-calvo N. 2024. Rice Husk-Based Insulators : Manufacturing Process and Thermal Potential Assessment. *Materials (Basel).* **17**: .
- 21 Deshmukh M, Yadav M. 2025. Optimizing Thermal Efficiency of Building Envelopes with Sustainable Composite Materials. *Buildings.* **15**: .
- 22 Zhang L, Chen Z, Dong H, Fu S, Ma L, Yang X. 2021. Wood plastic composites based wood wall ' s structure and thermal insulation performance. *J. Bioresour. Bioprod.* **6**(February): 65.
- 23 Vieira J, Oliveira R, Abreu A, Ró M, Niemiec T, Sitarz M. 2025. Thermal Performance of Wood Frame Construction with Phase Change Material in the Brazilian Subtropical Climate. *Materials (Basel).* **18**: .
- 24 Wang H, Lei C. 2020. A numerical

- investigation of combined solar chimney and water wall for building ventilation and thermal comfort. *Build. Environ.* **171**(December 2019): 106616.
- 25 Bai L, Xie J, Farid MM, Wang W, Liu J. 2020. Analytical model to study the heat storage of phase change material envelopes in lightweight passive buildings. *Build. Environ.* **169**(July 2019): 106531.
- 26 Taylor P, Hamdani M, Mohammed S, Amine E, Benouaz T. 2014. Minimization of indoor temperatures and total solar insolation by optimizing the building orientation in hot climate. *Eng. Struct. Technol.* **6**(December): 37.
- 27 Summa S, Remia G, Perna C Di, Stazi F. 2023. Experimental and numerical study on a new thermal masonry block by comparison with traditional walls. *Energy Build.* **292**(April): 113125.
- 28 Al-tamimi AS, Al-amoudi OSB, Al-osta MA, Ali MR, Ahmad A. 2020. Effect of insulation materials and cavity layout on heat transfer of concrete masonry hollow blocks. *Constr. Build. Mater.* **254**: 119300.
- 29 Ismaiel M, Chen Y, Cruz-noguez C, Hagel M. 2022. Thermal resistance of masonry walls : a literature review on influence factors , evaluation , and improvement. *J. of Building Phys.* **45**(4): 528.
- 30 Falcini F, Garra R, Voller V. 2019. International Journal of Thermal Sciences Modeling anomalous heat diffusion : Comparing fractional derivative and non-linear diffusivity treatments. *Int. J. Therm. Sci.* **137**(November 2018): 584.
- 31 Adom K, Wendsongre E, Atsu Y, Fiagbe K, Ato D. 2020. Evaluation of time lag and decrement factor of walls in a hot humid tropical climate. *Therm. Sci. Eng. Prog.* **20**(October): 100758.
- 32 Lu Y, Wang L, He J, Yang R, Yuan L. 2024. Case Studies in Thermal Engineering Dimensionless resolutions for heat flux decrement factor and time lag of the wall during cyclic variations in outdoor air temperature. *Case Stud. Therm. Eng.* **60**(April): 104678.
- 33 Li ZX, Al-rashed AAAA, Rostamzadeh M, Kalbasi R. 2019. Heat transfer reduction in buildings by embedding phase change material in multi-layer walls : Effects of repositioning , thermophysical properties and thickness of PCM. *Energy Convers. Manag.* **195**(May): 43.
- 34 Kovacs R. 2023. Transient non-Fourier behavior of large surface bodies. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **148**(July):
- 35 Hillary J, Walsh E, Shah A, Zhou R, Walsh P. 2018. Energy & Buildings Universal approach to modelling multi-layer structures in building energy simulations. *Energy Build.* **170**: 122.
- 36 Bruzgevicus P, Burlingis A, Norvaisiene R. 2016. Determination of the Optimal Fourier Number on the Dynamic Thermal Transmission. *Int. J. Thermophys.* **37**: .