

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Simulasi Numerik Perpindahan Panas Transien Pada Kain Komposit Berlapis Mikrokapsul Bahan Ubah Fasa Dan Grafena/MXene Untuk Evaluasi Performa Kamuflase Inframerah

Numerical Simulation Of Transient Heat Transfer In Fabric Composites Coated With Phase Change Material Microcapsules And Graphene/MXene For Evaluating Infrared Camouflage Performance

Muhammad Rizky Dayrobby[1*], Sovian Aritonang[2], Hotma Renta R. Siringoringo[3], Muhammad Hafidh Husna Ashshidqi[4], Ivan Harendra Yusuf Setyawan[5], Ayyash Khoyyir Ahmad Kemal[6], Rhaulza Fathir Jabar Hamdi[7]

[1,3,4,5,6,7]*Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia*
[2]*Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia*

[1]rizkydayrobby@gmail.com*, [2]sovian.aritonang@idu.ac.id, [4]hafidh.ashshidqi@mipa.idu.ac.id, [5]ivan.setyawan@mipa.idu.ac.id, [6]ayyash.kemal@mipa.idu.ac.id, [7]rhaulza.hamdi@mipa.idu.ac.id

Abstract

Thermal cameras detect objects through the contrast in surface temperature and emissivity against the background, so visual camouflage alone is no longer sufficient. This study develops a one-dimensional numerical model of transient heat transfer in a fabric composite coated with phase change material (PCM) microcapsules and graphene or MXene fillers, and evaluates infrared camouflage performance in the 8–14 μm band. The model solves the conduction equation with an enthalpy formulation for PCM melting using an implicit finite volume method, with convective, long-wave radiative and solar boundary conditions. Camouflage performance is expressed as the apparent temperature contrast between the fabric and its background. Verification shows agreement with the analytical steady-state solution and an energy balance error of the order of 10^{-16}. With material properties taken from the literature or assumed by the authors, adding 2 wt% MXene reduced the mean apparent contrast from 4.86 K to 2.86 K over a diurnal cycle and from 6.66 K to 3.96 K in a shade-to-sun transient, mainly through a lower effective emissivity, at the cost of a higher surface temperature and heat load toward the skin. PCM with a 28 °C melting point had no effect because it was fully molten over the operating range, and a 48 °C melting point was never reached, whereas a 42 °C melting point with a 3 mm coating reduced the contrast from 8.09 K to 7.61 K. A sensitivity analysis showed that the optical properties, the filler coverage model and the radiative environment, not the thermal properties, control the magnitude of the contrast, while the ranking of the designs was unchanged.

Keywords **:** *infrared camouflage, phase change material, MXene, graphene, numerical simulation*

Abstrak

Kamera termal mendeteksi objek melalui kontras suhu permukaan dan emisivitas terhadap latar belakang, sehingga kamuflase visual saja tidak lagi memadai. Penelitian ini mengembangkan model numerik satu dimensi untuk perpindahan panas transien pada kain komposit yang dilapisi mikrokapsul bahan ubah fasa (PCM) dan filler grafena atau MXene, serta mengevaluasi performa kamuflase inframerah pada pita 8–14 μm. Model menyelesaikan persamaan konduksi dengan formulasi entalpi untuk pelelehan PCM menggunakan metode volume hingga implisit, dengan kondisi batas konveksi, radiasi gelombang panjang, dan radiasi surya. Performa kamuflase dinyatakan sebagai kontras suhu tampak antara kain dan latar belakang. Verifikasi menunjukkan kesesuaian dengan solusi analitik keadaan tunak dan galat keseimbangan energi berorde 10^{-16}. Dengan sifat material dari literatur atau asumsi penulis, penambahan 2% berat MXene menurunkan rata-rata kontras tampak

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

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

dari 4,86 K menjadi 2,86 K pada siklus harian dan dari 6,66 K menjadi 3,96 K pada transien teduh–matahari, terutama melalui emisivitas efektif yang lebih rendah, dengan konsekuensi suhu permukaan dan beban panas ke kulit yang lebih tinggi. PCM dengan titik leleh 28 °C tidak berpengaruh karena sudah cair seluruhnya pada rentang operasi, dan titik leleh 48 °C tidak pernah tercapai, sedangkan titik leleh 42 °C dengan lapisan 3 mm menurunkan kontras dari 8,09 K menjadi 7,61 K. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa sifat optik, model tutupan filler, dan lingkungan radiatif, bukan sifat termal, yang mengendalikan besarnya kontras, sementara urutan desain tidak berubah.

Kata Kunci: Kamuflase Inframerah, Bahan Ubah Fasa, MXene, Grafena, Simulasi Numerik

**Penulis Korespondensi : Muhammad Rizky Dayrobby*

I. PENDAHULUAN

Sensor pencitraan termal kini digunakan luas untuk pengawasan, pencarian, dan pengamatan lapangan (Gade and Moeslund, 2014). Kamera ini tidak melihat warna, melainkan radiansi inframerah yang dipancarkan dan dipantulkan permukaan, yang ditentukan oleh suhu permukaan dan emisivitasnya. Tubuh manusia dengan suhu kulit sekitar 30–34 °C bergantung kondisi (Fernández-Cuevas et al., 2015) hampir selalu berkontras dengan latar belakang yang suhunya berubah sepanjang hari, sehingga kamuflase visual perlu dilengkapi dengan kamuflase inframerah.

Ada tiga strategi umum untuk menekan kontras inframerah pada tekstil: mengurangi suhu permukaan melalui pengelolaan termal, menurunkan emisivitas permukaan, dan membuat respons termal beradaptasi terhadap perubahan lingkungan (Degenstein et al., 2021; Hossain, 2024). Mikrokapsul PCM menyimpan dan melepas kalor laten saat melebur dan membeku sehingga dapat menyangga fluktuasi suhu (Keyan et al., 2012). Grafena dan MXene dilaporkan memiliki emisivitas inframerah yang rendah sehingga menarik sebagai lapisan fungsional (Guo et al., 2024; Hou et al., 2025).

Sebagian besar studi kamuflase inframerah berbasis mikrokapsul PCM bersifat eksperimental, yaitu fabrikasi mikrokapsul dan pengukuran kain terlapis pada satu atau beberapa konfigurasi (Gu, Wang and Yu, 2021; Su, Zhao and Han, 2023). Studi simulasi yang melibatkan PCM untuk kamuflase inframerah umumnya memakai PCM kalkogenida yang mengubah emisivitas melalui transisi fasa kristal–amorf (Qu et al., 2018), bukan kalor laten mikrokapsul. Sepengetahuan penulis, simulasi transien yang mengaitkan sifat termofisika komposit PCM–grafena/MXene dengan metrik kamuflase berbasis radiansi, dan yang memperlakukan titik leleh PCM sebagai variabel desain, masih terbatas. Simulasi numerik memungkinkan penjelajahan ruang desain yang luas tanpa fabrikasi berulang.

Tujuan penelitian ini adalah (1) membangun model numerik 1D transien dengan pelelehan PCM untuk kain komposit berlapis, (2) mengkuantifikasi pengaruh parameter desain terhadap suhu permukaan dan radiansi tampak, dan (3) mengidentifikasi kondisi ketika PCM dan filler memberi manfaat kamuflase. Kontribusi utamanya ialah kerangka simulasi terintegrasi yang menghubungkan sifat termofisika komposit dengan metrik kontras radiansi 8–14 μm, serta temuan bahwa titik leleh PCM harus berada dalam rentang suhu permukaan agar PCM berperan.

II. METODE

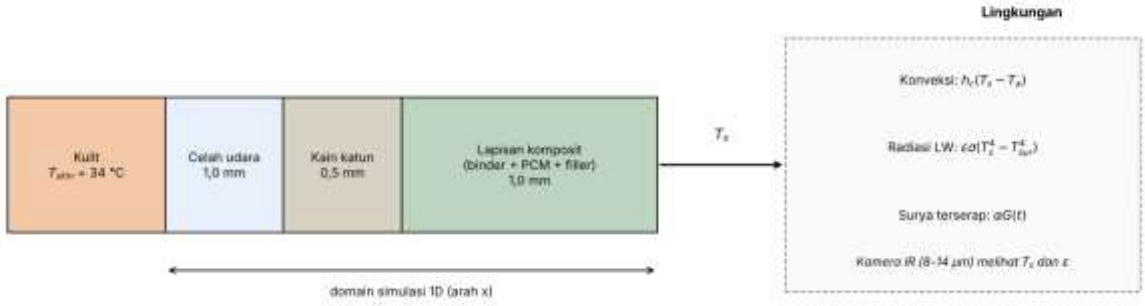
Sistem dimodelkan sebagai susunan lapisan satu dimensi dari kulit ke lingkungan: celah udara (1,0 mm), kain katun (0,5 mm), dan lapisan komposit (1,0 mm) yang terdiri atas binder polimer, mikrokapsul PCM, dan filler grafena atau MXene (Gambar 1). Asumsi yang dipakai:

- perpindahan panas satu dimensi dengan sifat material efektif yang homogen pada tiap lapisan;
- suhu kulit tetap (kondisi Dirichlet) sebesar 34 °C dan kontak antarlapis ideal;

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

- celah udara hanya menghantarkan panas secara konduksi (konveksi dan radiasi dalam celah serta kelembapan diabaikan);
- PCM melebur pada rentang suhu berbentuk Gaussian dengan lebar σ_m, dan pengaruh volume kapsul terhadap geometri diabaikan.



Gambar 1. Skema model 1D dan beban termal pada permukaan luar.

Konduksi transien dengan pelelehan PCM dituliskan dalam bentuk entalpi volumetrik H(T) [J/m^3]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\,\frac{\partial T}{\partial x}\right) \tag{1}$$

$$H(T) = \rho c_p T + L_v \varphi(T),\quad \varphi(T) = \frac{1}{2}\left[1 + erf\left(\frac{T - T_m}{\sqrt{2}\sigma_m}\right)\right] \tag{2}$$

dengan φ fraksi cair, T_m titik leleh puncak, σ_m lebar rentang leleh, dan $L_v = \rho \cdot w_{cap} \cdot f_{core} \cdot L_{core}$ kalor laten per volume komposit (w_{cap} fraksi massa kapsul, f_{core} fraksi massa inti dalam kapsul, L_{core} kalor laten inti). Formulasi ini menjaga konservasi energi secara diskret karena kalor laten termasuk dalam entalpi, bukan hanya dalam kapasitas panas semu. Pendekatan entalpi grid tetap ini mengikuti Voller dan Prakash (1987).

Kondisi batas di sisi kulit ialah $T(0,t) = T_{skin}$. Di permukaan luar (x = L), fluks konduksi keluar sama dengan jumlah konveksi dan radiasi gelombang panjang dikurangi radiasi surya terserap:

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = h_c(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma[(T_s + 273{,}15)^4 - (T_{sur} + 273{,}15)^4] - \alpha G(t) \tag{3}$$

dengan h_c koefisien konveksi (12 W/m²·K, setara korelasi konveksi paksa seluruh tubuh $h_c = 10{,}3v^{0{,}6}$ menurut de Dear et al. (1997) pada kecepatan angin ≈ 1,3 m/s), T_a suhu udara, T_{sur} suhu radiatif lingkungan, σ konstanta Stefan–Boltzmann, ε emisivitas permukaan (diasumsikan sama pada pita 8–14 µm dan untuk pertukaran radiasi total, yaitu permukaan abu-abu), α absorptivitas surya, dan G(t) radiasi surya.

3. Sifat efektif lapisan komposit

Massa jenis campuran dihitung dari fraksi massa komponen ($1/\rho = \Sigma\, w_i/\rho_i$) dan kalor jenis sebagai rata-rata berbobot massa. Konduktivitas efektif dihitung dalam dua langkah dengan model Hamilton–Crosser (Hamilton and Crosser, 1962): pertama binder dengan kapsul (bola), kemudian campuran tersebut dengan filler berbentuk lembaran:

$$k_{eff} = k_m \frac{k_d + (n-1)k_m - (n-1)\varphi_v(k_m - k_d)}{k_d + (n-1)k_m + \varphi_v(k_m - k_d)},\quad n = 3/\psi \tag{4}$$

dengan k_m konduktivitas matriks, k_d fase terdispersi, φ_v fraksi volume terdispersi (dibedakan dari fraksi cair φ pada Persamaan (2)), dan ψ sphericity (ψ = 1 untuk bola; ψ = 0,15 untuk lembaran filler). Emisivitas dan absorptivitas permukaan diperoleh dari model tutupan filler:

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

$$\theta = 1 - exp\left(-\frac{w_{fill}}{w_\theta}\right), \quad \varepsilon = \varepsilon_b(1-\theta) + \varepsilon_f\theta \tag{5}$$

dengan w_θ = 0,03 sebagai skala tutupan. Persamaan (5) merupakan model fenomenologis yang diasumsikan penulis untuk menggambarkan tutupan permukaan oleh filler, bukan hukum fisika, sehingga nilai w_θ diuji pada analisis sensitivitas. Absorptivitas surya α dihitung dengan bentuk yang sama. Nilai awal sifat material disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai awal sifat material. Sumber: ε katun (Belliveau et al., 2020), α katun kain gelap (Watanabe et al., 2008), k grafena (Cabrera et al., 2021), k MXene (Akura et al., 2024; Huang et al., 2024), dan ε MXene (Guo et al., 2024; Hou et al., 2025); nilai lain (termasuk ρ mikrokapsul) adalah asumsi penulis. Nilai k grafena 3,2 W/m·K dipilih dalam rentang terukur 1–3,5 W/m·K (Cabrera et al., 2021), sedangkan k MXene 0,4 W/m·K sesuai dengan konduktivitas tegak lurus bidang $Ti_3C_2T_x$ yang terukur sangat rendah, sekitar 0,4–0,6 W/m·K (Huang et al., 2024).

Material	ρ (kg/m³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	ε (8–14 µm)	α surya
Udara (celah)	1,16	1007	0,026	–	–
Kain katun efektif	400	1300	0,06	0,88	0,61
Binder PU/akrilik	1100	1800	0,25	0,90	0,60
Mikrokapsul PCM	935	2000	0,20	–	–
Grafena (GNP)	2200	700	3,2 (tegak lurus bidang)	0,50	0,90
MXene $Ti_3C_2T_x$	3800	500	0,4	0,25	0,80

Titik leleh PCM diperlakukan sebagai variabel desain dengan tiga kasus, yaitu T_m = 28, 42, dan 48 °C. Kalor laten inti L_{core} = 245 kJ/kg dan fraksi inti f_{core} = 0,63 diambil dari Gu, Wang dan Yu (2021), sedangkan σ_m = 1 K merupakan asumsi penulis. Desain acuan memakai T_m = 28 °C, w_{cap} = 0,27, dan w_{fill} = 0,02.

Dua skenario digunakan. Pada **siklus harian**, suhu udara dan suhu latar belakang (tanah/vegetasi) berupa fungsi kosinus: T_a rata-rata 27,5 °C, amplitudo 4,5 K, puncak pukul 14.00; T_{bg} rata-rata 29 °C, amplitudo 9 K, puncak pukul 13.30. Radiasi surya berbentuk setengah sinusoida pukul 06.00–18.00 dengan puncak 800 W/m². Suhu radiatif lingkungan ditetapkan $T_{sur} = T_a - 3$ K. Pada transien cepat teduh–matahari, kain mula-mula berada pada keadaan tunak di tempat teduh (T_a = 30 °C, G = 0, T_{bg} = 28 °C) selama 30 menit, kemudian terkena radiasi 700 W/m²; sejak saat itu suhu latar belakang naik dari 28 °C menuju 36 °C dengan konstanta waktu 30 menit. $T_{sur} = T_a - 3$ K berlaku pada kedua skenario. Profil sinusoidal ini merupakan idealisasi cuaca cerah tropis, bukan data cuaca lapangan. Nilai $T_{sur} = T_a - 3$ K mewakili lingkungan radiatif efektif bagi permukaan vertikal (tubuh berdiri) yang melihat kira-kira separuh langit dan separuh tanah/vegetasi. Untuk langit cerah, rumus Swinbank (1963) memberi suhu langit efektif sekitar 12 K di bawah T_a pada 27,5 °C, sehingga dengan tanah bersuhu setara T_a diperoleh $T_{sur} \approx T_a - 6$ K; pada siang hari tanah lebih hangat daripada udara sehingga selisihnya lebih kecil. Karena nilai ini belum diukur, T_{sur} divariasikan dari T_a hingga $T_a - 12$ K pada uji sensitivitas.

Radiansi tampak permukaan pada pita 8–14 µm mencakup emisi dan pantulan lingkungan:

$$L_{app} = \varepsilon\, L_b(T_s) + (1-\varepsilon)\, L_b(T_{sur}) \tag{6}$$

$$L_b(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1}\, d\lambda \tag{7}$$

dengan λ_1 = 8 µm dan λ_2 = 14 µm. Radiansi tampak dikonversi kembali menjadi suhu tampak T_{app} (suhu benda hitam ekuivalen) dengan interpolasi tabel $L_b(T)$, dan kontras terhadap latar belakang (ε_{bg} = 0,95; $T_{app,bg}$ dihitung dengan Persamaan (6) memakai ε_{bg} dan T_{bg} sebagai pengganti ε dan T_s) didefinisikan sebagai:

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

$$\Delta T_{app}(t) = T_{app,s}(t) - T_{app,bg}(t) \quad (8)$$

Empat metrik dihitung pada jendela analisis: rata-rata $|\Delta T_{app}|$, akar rata-rata kuadrat (RMS), nilai maksimum $|\Delta T_{app}|$, dan fraksi waktu ketika $|\Delta T_{app}| < 2$ K. Metrik fraksi waktu di bawah ambang ini mengikuti Olsen (2004), yang tidak menetapkan nilai ambang baku; nilai 2 K dipilih penulis sebagai batas konservatif, karena kontras yang dapat dideteksi bergantung pada resolusi suhu sensor dan jarak pengamatan.

Domain didiskretisasi dengan metode volume hingga *cell-centered* (Patankar, 1980) (4 sel pada celah udara, 6 pada kain, dan 30 pada lapisan komposit; total 40 sel). Integrasi waktu memakai skema implisit *backward Euler* dengan langkah waktu 30 s (siklus harian, tiga hari simulasi dengan dua hari pertama sebagai *spin-up* dan hari ketiga sebagai jendela analisis) dan 5 s (transien cepat). Sistem nonlinear akibat entalpi PCM dan radiasi diselesaikan dengan iterasi Newton–Raphson menggunakan matriks Jacobi tridiagonal, toleransi 10^{-7} K, dan pembatas langkah 5 K. Model diimplementasikan dalam Python (NumPy, SciPy). Kode tersedia di: https://github.com/dayrobby1449/simulasi-uji-thermal-mxene-dan-grafena

Tiga uji verifikasi dilakukan: (i) kesesuaian integral kapasitas panas semu dengan kalor laten analitik, (ii) perbandingan suhu permukaan keadaan tunak dengan solusi analitik hambatan seri (Incropera et al., 2007), dan (iii) galat keseimbangan energi global. Uji konvergensi dengan 20, 40, dan 80 sel serta langkah waktu 60, 30, dan 15 s menghasilkan perbedaan $|\Delta T_{app}|$ rata-rata di bawah 10^{-4} K, sehingga 40 sel dan langkah waktu 30 s dipakai.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Verifikasi model

Integral kapasitas panas semu pada lapisan komposit sama dengan kalor laten analitik (44,36 MJ/m³ pada kedua perhitungan, desain MXene 2%). Suhu permukaan keadaan tunak sebesar 31,910 °C (T_a = 30 °C, T_{sur} = 27 °C, tanpa radiasi surya) sama dengan solusi analitik hingga ketelitian mesin. Galat relatif keseimbangan energi global pada siklus harian tiga hari sebesar $4{,}8 \times 10^{-16}$, dan iterasi Newton rata-rata 2,8 per langkah waktu (maksimum 5). Hasil ini menunjukkan implementasi benar secara matematis, tetapi belum membuktikan kecocokan dengan fisika sebenarnya; itu memerlukan validasi eksperimen.

2. Sifat efektif lapisan

Tabel 2. Sifat efektif lapisan komposit hasil perhitungan.

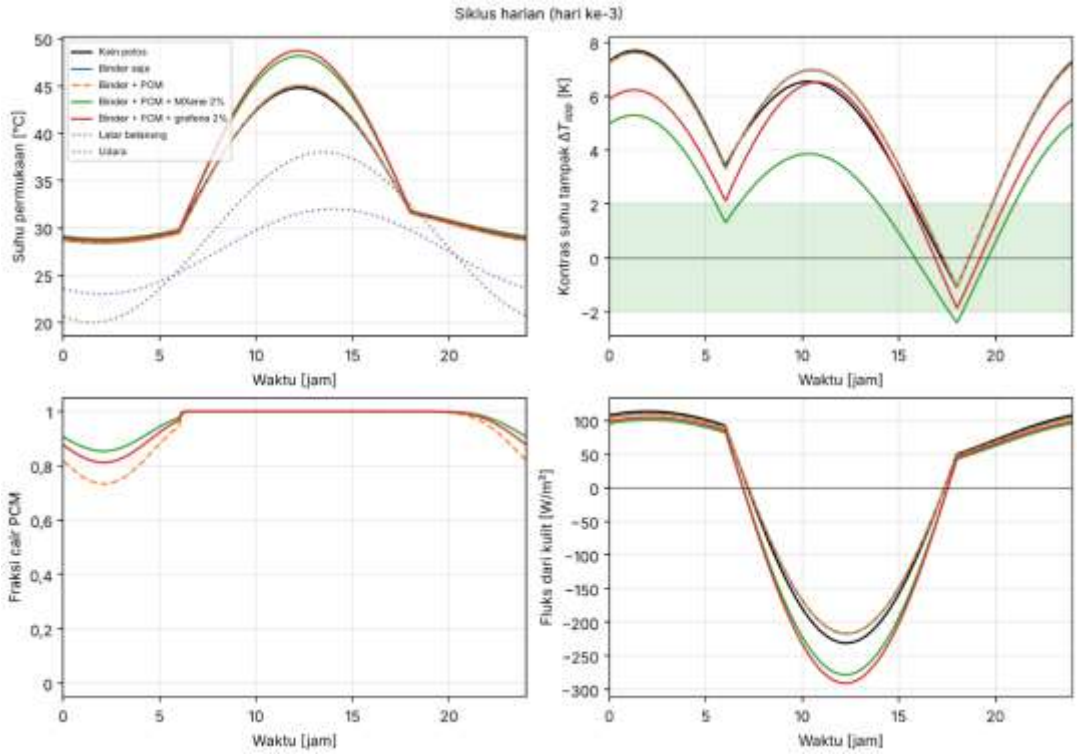
Desain	ρ (kg/m³)	c_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	ε	α	L (kJ/kg)
Binder saja	1100	1800	0,250	0,900	0,600	0
Binder + PCM	1050	1854	0,234	0,900	0,600	41,7
Binder + PCM + MXene 2%	1064	1828	0,235	0,584	0,697	41,7
Binder + PCM + grafena 2%	1060	1832	0,251	0,705	0,746	41,7

Penambahan kapsul menurunkan konduktivitas (karena k kapsul lebih rendah dari binder), sedangkan filler menaikkannya kembali. Filler 2% berat menurunkan emisivitas efektif dari 0,90 menjadi 0,58 (MXene) atau 0,71 (grafena), tetapi menaikkan absorptivitas surya dari 0,60 menjadi 0,70–0,75. Perubahan ε dan α ini ditentukan model tutupan Persamaan (5) sehingga bergantung pada asumsi kalibrasi. Nilai ε MXene yang dipakai (0,25) sebanding dengan emisivitas ≈0,29 yang dilaporkan untuk komposit MXene (Guo et al., 2024), dan Hou dkk. (2025) melaporkan emisivitas kain menurun seiring bertambahnya jumlah pelapisan grafena/MXene, yang secara kualitatif sesuai dengan bentuk Persamaan (5).

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

3. Siklus harian



Gambar 2. Hasil siklus harian (hari ke-3): suhu permukaan, kontras suhu tampak, fraksi cair PCM, dan fluks dari kulit. Pita hijau menandai $|\Delta T_{app}| < 2$ K.

Tabel 3. Metrik kamuflase, siklus harian (hari ke-3).

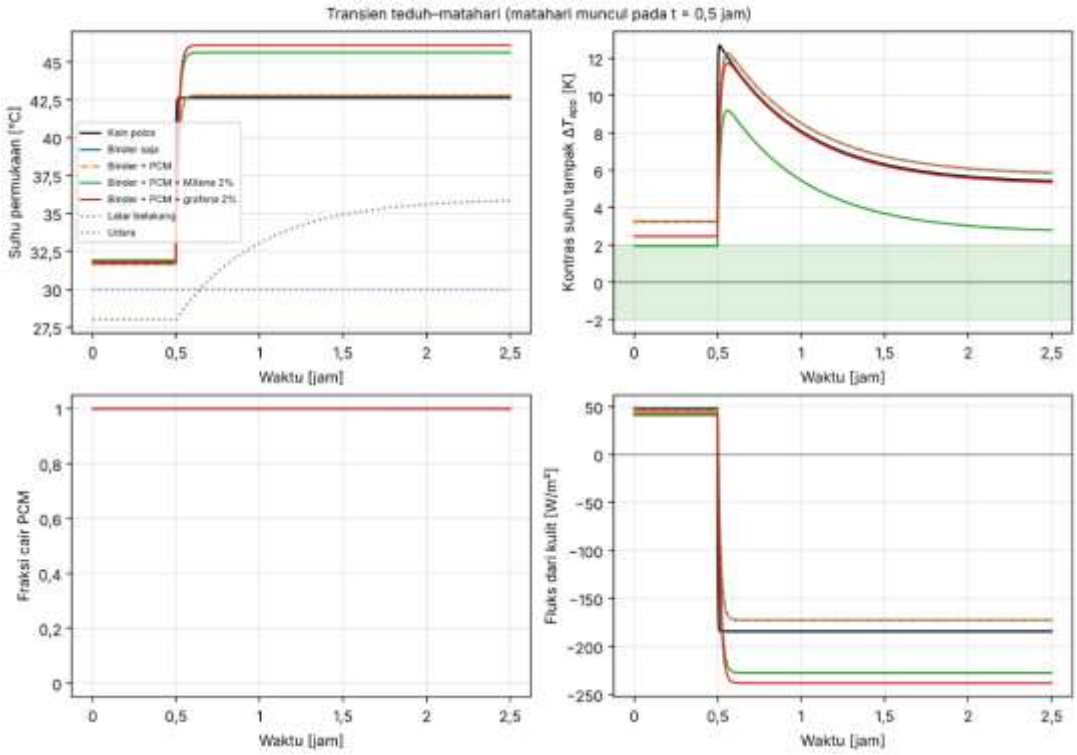
Desain	|ΔT| rata-rata (K)	RMS (K)	Maks. (K)	Tersamar (%)
Kain polos (α = 0,61)	4,74	5,24	7,69	17,0
Binder saja	4,86	5,35	7,62	16,1
Binder + PCM	4,86	5,35	7,62	16,1
Binder + PCM + MXene 2%	2,86	3,21	5,29	31,4
Binder + PCM + grafena 2%	4,07	4,53	6,52	20,2

Karena lapisan sangat tipis, suhu permukaan mengikuti keseimbangan energi permukaan secara kuasi-tunak, dan pada siang hari radiasi surya mendominasi. Suhu permukaan maksimum hari ke-3 mencapai 44,8 °C (kain polos), 45,0 °C (binder saja), 48,2 °C (MXene), dan 48,8 °C (grafena), karena absorptivitas desain berfiller lebih tinggi. Meski demikian, kontras suhu *tampak* desain MXene paling kecil, karena emisivitas rendah membuat radiansi tampak lebih mengikuti suhu radiatif lingkungan yang lebih dingin. Binder saja dan kain polos memberi kontras hampir sama (4,86 dan 4,74 K) karena sifat optiknya hampir sama (α 0,60 vs 0,61; ε 0,90 vs 0,88). Kain polos sengaja memakai α kain gelap; kain putih (α = 0,17) akan tampak lebih baik daripada semua desain berlapis, padahal lapisan binder di atasnya lebih gelap, sehingga perbandingannya tidak adil. Kurva binder saja dan binder + PCM berimpit, menandakan PCM tidak berperan pada pengaturan ini. Konsekuensi lain dari suhu permukaan yang lebih tinggi adalah beban panas ke arah kulit: pada puncak siang, fluks dari kulit mencapai sekitar −280 W/m² (MXene) dan −290 W/m² (grafena), dibanding sekitar −215 W/m² untuk binder saja (Gambar 2). Penurunan kontras inframerah oleh MXene dengan demikian dibayar dengan beban termal yang lebih besar bagi pemakai, meskipun nilai absolutnya dilebih-lebihkan oleh asumsi suhu kulit tetap.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

4. Transien teduh–matahari



Gambar 3. Hasil transien teduh–matahari (matahari muncul pada t = 0,5 jam).

Tabel 4. Metrik kamuflase, transien teduh–matahari (seluruh durasi 2,5 jam).

Desain	|ΔT| rata-rata (K)	RMS (K)	Maks. (K)	Tersamar (%)
Kain polos (α = 0,61)	6,38	6,79	12,70	0,0
Binder saja	6,66	7,07	12,25	0,0
Binder + PCM	6,68	7,09	12,29	0,0
Binder + PCM + MXene 2%	3,96	4,40	9,20	19,9
Binder + PCM + grafena 2%	6,10	6,57	11,73	0,0

Suhu permukaan naik dalam hitungan menit setelah paparan matahari, lalu mencapai nilai kuasi-tunak sekitar 42,6 °C (kain polos), 42,8 °C (binder), 45,6 °C (MXene), dan 46,1 °C (grafena). Kontras maksimum terjadi tepat setelah matahari muncul karena suhu latar belakang naik jauh lebih lambat (konstanta waktu 30 menit) daripada permukaan kain, kemudian menurun seiring latar belakang memanas. Pola ini menunjukkan bahwa pada kain tipis, ketertinggalan termal latar belakang, bukan respons kain, yang menentukan kontras transien. Desain MXene merupakan satu-satunya yang masuk ke rentang tersamar (19,9% waktu), tetapi seluruhnya terjadi pada periode teduh sebelum matahari muncul (0,5 jam pertama, dengan $\Delta T_{app} \approx 2$ K, tepat di batas ambang). Setelah paparan matahari, tidak ada desain yang mencapai $|\Delta T_{app}| < 2$ K.

5. Peran PCM: titik leleh dan tebal lapisan

Pada desain acuan, titik leleh 28 °C berada di bawah suhu permukaan pada hampir seluruh skenario. Pada transien teduh–matahari PCM sudah cair seluruhnya sebelum matahari muncul (fraksi cair ≈ 1,0 pada Gambar 3), sehingga tidak menyerap kalor laten. Pada siklus harian PCM memang melebur dan membeku (fraksi cair 0,73–1,0), tetapi lapisan 1 mm hanya menyimpan sekitar 44 kJ/m² (kalor laten volumetrik 43,8–44,4 MJ/m³), yang

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

habis dalam hitungan menit terhadap fluks puluhan hingga ratusan W/m². Untuk menguji kondisi ketika PCM aktif, titik leleh dan tebal lapisan divariasikan pada skenario teduh–matahari dengan 50% berat kapsul tanpa filler, dan metrik dihitung setelah matahari muncul (Tabel 5). Pada kolom "tanpa PCM", kapsul tetap ada dengan sifat termal yang sama tetapi kalor latennya dibuat nol (L = 0), sehingga selisih kedua kolom murni berasal dari kalor laten. Metrik yang ditampilkan adalah rata-rata $|\Delta T_{app}|$ setelah matahari muncul.

Tabel 5. Pengaruh titik leleh dan tebal lapisan (transien teduh–matahari, 50% berat kapsul, tanpa filler).

T_m (°C)	Tebal (mm)	$\|\Delta T\|$ tanpa PCM (K)	$\|\Delta T\|$ dengan PCM (K)	Fraksi cair maks.
28	1	7,56	7,56	1,00
28	3	8,09	8,09	1,00
42	1	7,56	7,39	0,66
42	3	8,09	7,61	0,63
48	1	7,56	7,56	0,00
48	3	8,09	8,09	0,00

PCM bermanfaat hanya bila titik lelehnya berada dalam rentang suhu yang dilalui permukaan: T_m = 42 °C menurunkan $|\Delta T|$ dari 7,56 K menjadi 7,39 K pada lapisan 1 mm dan dari 8,09 K menjadi 7,61 K pada lapisan 3 mm (fraksi cair maksimum 0,63–0,66). Sebaliknya, T_m = 28 °C tidak memberi manfaat karena PCM sudah cair seluruhnya, dan T_m = 48 °C juga tidak karena suhu permukaan tidak pernah mencapainya (maksimum 42,8–43,5 °C) sehingga PCM tidak meleleh. Perbaikan hingga 0,48 K ini nyata tetapi kecil dibanding pengaruh emisivitas efektif (Tabel 3 dan 4). Implikasinya, T_m perlu diperlakukan sebagai variabel desain yang dipasangkan dengan skenario termal target, bukan sebagai konstanta. Keterbatasan kapasitas kalor laten ini sejalan dengan pengamatan eksperimental Gu dkk. (2021), yang melaporkan efek pengendalian suhu kain berlapis mikrokapsul PCM hanya bertahan sekitar 27 menit; PCM pada lapisan tipis menunda, tetapi tidak menghilangkan, kenaikan suhu permukaan.

6. Uji sensitivitas

Karena sebagian nilai pada Tabel 1 masih berstatus asumsi penulis, setiap sifat material dan parameter lingkungan diubah satu per satu pada kedua skenario (32 kasus; Tabel 6). Untuk menghemat waktu komputasi, skenario harian pada uji ini memakai langkah waktu 60 s; uji konvergensi menunjukkan pengaruhnya di bawah 10^{-4} K. Sifat termal (ρ, c_p, dan k, termasuk konduktivitas filler dalam bidang dibanding tegak lurus bidang) mengubah $|\Delta T_{app}|$ rata-rata paling banyak sekitar 0,3 K. Sifat optik (ε dan α) dan skala tutupan w_θ pada Persamaan (5) mengubahnya hingga sekitar 1,3 K; untuk desain MXene, w_θ paling berpengaruh, dengan $|\Delta T_{app}|$ harian berkisar 2,24 K (w_θ = 0,02) hingga 3,54 K (w_θ = 0,05). Parameter lingkungan berpengaruh paling besar: $T_{sur} = T_a - 12$ K mengubah $|\Delta T_{app}|$ hingga sekitar 2,5 K, dan h_c = 8–16 W/m²·K hingga sekitar 1,2 K. Makin dingin lingkungan radiatif, makin besar keunggulan MXene, karena permukaan beremisivitas rendah memantulkan radiasi lingkungan yang lebih dingin. Pada seluruh kasus, desain MXene 2% tetap memberi kontras terkecil di antara desain berlapis, dengan penurunan 25–72% dibanding binder saja, dan PCM dengan T_m = 28 °C mengubah hasil kurang dari 0,01 K. Dengan demikian, kalibrasi model tutupan, data ε serta α yang terukur, dan karakterisasi lingkungan radiatif lebih menentukan ketelitian hasil daripada sifat termal.

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 6. Hasil uji sensitivitas: rata-rata $|\Delta T_{app}|$ (K) pada siklus harian (hari ke-3) dan transien teduh–matahari. Desain Binder + PCM berbeda kurang dari 0,1 K dari binder saja sehingga tidak ditampilkan.

Kasus	Siklus harian				Transien teduh–matahari			
	Kain polos	Binder	MXene	Grafena	Kain polos	Binder	MXene	Grafena
Acuan (Tabel 1)	4,74	4,86	2,86	4,07	6,38	6,66	3,96	6,10
k filler dalam bidang (GNP 1000; MXene 50)	4,74	4,86	2,86	4,07	6,38	6,66	3,94	6,07
k MXene 6,2 (nanosheet)	4,74	4,86	2,86	4,07	6,38	6,66	3,94	6,10
k binder 0,13	4,74	4,88	2,89	4,11	6,38	6,88	4,10	6,25
k mikrokapsul 0,1	4,74	4,86	2,87	4,09	6,38	6,66	4,01	6,15
k mikrokapsul 0,5	4,74	4,86	2,85	4,06	6,38	6,66	3,89	6,03
k katun 0,04	4,77	4,89	2,91	4,14	6,64	6,90	4,19	6,38
k katun 0,07	4,73	4,85	2,85	4,06	6,30	6,59	3,89	6,02
c_p binder 1500	4,74	4,86	2,86	4,08	6,38	6,67	3,96	6,11
c_p binder 2000	4,74	4,86	2,86	4,07	6,38	6,66	3,95	6,10
ρ katun 300	4,74	4,86	2,86	4,07	6,38	6,66	3,96	6,10
ρ katun 500	4,74	4,86	2,86	4,07	6,38	6,66	3,96	6,10
ε binder 0,80	4,74	4,10	2,47	3,63	6,38	5,57	3,24	5,40
ε binder 0,95	4,74	5,24	3,06	4,30	6,38	7,19	4,31	6,44
α binder 0,50	4,74	4,27	2,68	3,83	6,38	5,33	3,47	5,53
α binder 0,70	4,74	5,46	3,05	4,32	6,38	7,99	4,45	6,67
ε MXene 0,29	4,74	4,86	3,01	4,07	6,38	6,66	4,22	6,10
ε MXene 0,15	4,74	4,86	2,49	4,07	6,38	6,66	3,28	6,10
α MXene 0,70	4,74	4,86	2,69	4,07	6,38	6,66	3,49	6,10
α MXene 0,90	4,74	4,86	3,04	4,07	6,38	6,66	4,43	6,10
ε grafena 0,40	4,74	4,86	2,86	3,66	6,38	6,66	3,96	5,44
ε grafena 0,60	4,74	4,86	2,86	4,49	6,38	6,66	3,96	6,75
α grafena 0,80	4,74	4,86	2,86	3,84	6,38	6,66	3,96	5,56
w_θ 0,02	4,74	4,86	2,24	3,77	6,38	6,66	2,87	5,76
w_θ 0,05	4,74	4,86	3,54	4,37	6,38	6,66	4,98	6,38
α katun 0,36 (abu-abu)	3,45	4,86	2,86	4,07	3,22	6,66	3,96	6,10
α katun 0,17 (putih)	3,48	4,86	2,86	4,07	1,85	6,66	3,96	6,10
k grafena 5	4,74	4,86	2,86	4,07	6,38	6,66	3,96	6,09
$T_{sur} = T_a$	5,24	5,34	3,78	4,87	6,93	7,19	5,16	7,02
$T_{sur} = T_a - 6$ K	4,28	4,42	2,14	3,39	5,84	6,15	2,78	5,19
$T_{sur} = T_a - 12$ K	3,50	3,66	1,73	2,33	4,80	5,15	1,45	3,57
$h_c = 8$	5,43	5,59	3,41	4,78	7,42	7,77	4,95	7,27
$h_c = 16$	4,19	4,28	2,45	3,52	5,52	5,76	3,17	5,16

7. Keterbatasan

Hasil ini berlaku dalam batas asumsi model: (i) suhu kulit tetap, sehingga fluks negatif siang hari merupakan konsekuensi asumsi, bukan prediksi fisiologis; (ii) radiasi dan kelembapan dalam celah udara diabaikan; (iii) cuaca dan latar belakang disederhanakan; (iv) model 1D tidak menangkap *hot spot* lateral; (v) sebagian sifat material berupa asumsi dan model tutupan filler belum dikalibrasi, padahal keduanya paling memengaruhi besarnya kontras; (vi) perbandingan dengan kain polos hanya berlaku untuk kain gelap; (vii) belum ada validasi eksperimen.

IV. KESIMPULAN

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Model 1D transien dengan formulasi entalpi PCM dan metrik kontras radiansi 8–14 μm berhasil dikembangkan dan lolos verifikasi dasar (solusi analitik tunak dan konservasi energi) serta uji konvergensi mesh dan langkah waktu. Dengan sifat material dari literatur dan asumsi penulis, emisivitas efektif yang lebih rendah akibat MXene 2% berat adalah tuas utama: $|\Delta T_{app}|$ rata-rata turun dari 4,86 K ke 2,86 K (siklus harian) dan dari 6,66 K ke 3,96 K (teduh–matahari), dengan konsekuensi suhu permukaan yang lebih tinggi akibat absorptivitas surya yang naik serta beban panas ke arah kulit sekitar 60 W/m² lebih besar pada puncak siang. Urutan desain ini tidak berubah pada uji sensitivitas. PCM hanya berperan bila titik lelehnya berada dalam rentang suhu permukaan dan lapisannya cukup tebal; T_m = 42 °C pada lapisan 3 mm menurunkan $|\Delta T|$ dari 8,09 K ke 7,61 K, sedangkan T_m = 28 °C dan 48 °C tidak berpengaruh. Penelitian lanjutan: kalibrasi model tutupan filler dan nilai sifat material dengan data eksperimen (terutama ε, α, dan skala tutupan w_θ), pengukuran suhu radiatif lingkungan di lapangan, validasi eksperimen, serta optimasi multi-parameter dengan T_m sebagai variabel desain.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Pertahanan Republik Indonesia (Unhan RI) yang telah menjadi tempat penulis belajar dan mengembangkan penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada orang tua atas doa dan dukungan yang diberikan selama proses penelitian hingga publikasi artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Akura, Y., Matsunaga, Y., Morotomi, H., Shimofuri, M., Banerjee, A., Tsuchiya, T. and Hirotani, J. (2024) 'Thermal conductivity measurement of $Ti_3C_2T_x$ MXene thin film using frequency-domain thermoreflectance', in *2024 MRS Fall Meeting & Exhibit*. Boston, MA, USA, Abstract SB06.05.10.

Belliveau, R. G., DeJong, S. A., Boltin, N. D., Lu, Z., Cassidy, B. M., Morgan, S. L. and Myrick, M. L. (2020) 'Mid-infrared emissivity of nylon, cotton, acrylic, and polyester fabrics as a function of moisture content', *Textile Research Journal*, 90(13–14), pp. 1431–1445. doi: 10.1177/0040517519888825.

Cabrera, H., Korte, D., Budasheva, H., Abbasgholi N. Asbaghi, B. and Bellucci, S. (2021) 'Through-plane and in-plane thermal diffusivity determination of graphene nanoplatelets by photothermal beam deflection spectrometry', *Materials*, 14(23), p. 7273. doi: 10.3390/ma14237273.

de Dear, R. J., Arens, E., Hui, Z. and Oguro, M. (1997) 'Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments', *International Journal of Biometeorology*, 40(3), pp. 141–156. doi: 10.1007/s004840050035.

Degenstein, L. M., Sameoto, D., Hogan, J. D., Asad, A. and Dolez, P. I. (2021) 'Smart textiles for visible and IR camouflage application: State-of-the-art and microfabrication path forward', *Micromachines*, 12(7), p. 773. doi: 10.3390/mi12070773.

Fernández-Cuevas, I. *et al.* (2015) 'Classification of factors influencing the use of infrared thermography in humans: A review', *Infrared Physics & Technology*, 71, pp. 28–55. doi: 10.1016/j.infrared.2015.02.007.

Gade, R. and Moeslund, T. B. (2014) 'Thermal cameras and applications: A survey', *Machine Vision and Applications*, 25(1), pp. 245–262. doi: 10.1007/s00138-013-0570-5.

Gu, J., Wang, W. and Yu, D. (2021) 'Temperature control and low infrared emissivity double-shell phase change microcapsules and their application in infrared stealth fabric', *Progress in Organic Coatings*, 159, p. 106439. doi: 10.1016/j.porgcoat.2021.106439.

Guo, B.-F. *et al.* (2024) 'Large-scale, mechanically robust, solvent-resistant, and antioxidant MXene-based composites for reliable long-term infrared stealth', *Advanced Science*, 11(17), p. 2309392. doi: 10.1002/advs.202309392.

Hamilton, R. L. and Crosser, O. K. (1962) 'Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems', *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3), pp. 187–191. doi: 10.1021/i160003a005.

Hossain, M. A. (2024) 'Advancement in UV-visible-IR camouflage textiles for concealment of defence surveillance against multidimensional combat backgrounds', *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 19, p. 45. doi: 10.1186/s40712-024-00182-8.

Hou, X. *et al.* (2025) 'A graphene/MXene-modified flexible fabric for infrared camouflage, electrothermal, and electromagnetic interference shielding', *Nanomaterials*, 15(2), p. 98. doi: 10.3390/nano15020098.

Huang, Y., Spiece, J., Parker, T., Lee, A., Gogotsi, Y. and Gehring, P. (2024) 'Violation of the Wiedemann–Franz law and ultralow thermal conductivity of $Ti_3C_2T_x$ MXene', *ACS Nano*, 18(47), pp. 32491–32497. doi: 10.1021/acsnano.4c08189.

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

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

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Hoboken, NJ: Wiley.
Keyan, K., Ramachandran, T., Shumugasundaram, O. L., Balasubramaniam, M. and Ragavendra, T. (2012) 'Microencapsulation of PCMs in textiles: A review', *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 7(3).
Olsen, F. B. (2004) 'Methods for evaluating thermal camouflage', in *Proceedings of the RTO SCI Symposium on Sensors and Sensor Denial by Camouflage, Concealment and Deception*. Brussels, Belgium, RTO-MP-SCI-145, Paper 16.
Patankar, S. V. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Washington, DC: Hemisphere.
Qu, Y. *et al.* (2018) 'Thermal camouflage based on the phase-changing material GST', *Light: Science & Applications*, 7, p. 26. doi: 10.1038/s41377-018-0038-5.
Su, Y., Zhao, X. and Han, Y. (2023) 'Phase change microcapsule composite material with intelligent thermoregulation function for infrared camouflage', *Polymers*, 15(14), p. 3055. doi: 10.3390/polym15143055.
Swinbank, W. C. (1963) 'Long-wave radiation from clear skies', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), pp. 339–348. doi: 10.1002/qj.49708938105.
Voller, V. R. and Prakash, C. (1987) 'A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems', *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(8), pp. 1709–1719. doi: 10.1016/0017-9310(87)90317-6.
Watanabe, S., Koganezawa, S., Horikoshi, T. and Tomita, A. (2008) 'Measurement of solar radiation absorptance of different clothing fabric for outdoor thermal comfort study', *Japanese Journal of Biometeorology*, 45(4), pp. 121–129. doi: 10.11227/seikisho.45.121.