



Peningkatan Performa Termal Bangunan dengan Menggunakan Atap UPVC Berbasis PCM *Paraffin Wax* dan *Bees Wax*

Silviana Simbolon¹, Ahmad Syahrul Mubarak², Ihat Solihat³, Muhammad Yunus⁴
^{1,2,3,4}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang
dosen03077@unpam.ac.id

Abstract

Indonesia is a tropical country characterized by relatively high air temperatures, which can reach 35 °C, and relative humidity levels of up to 80%. These conditions highlight the need for an effective passive cooling system to improve indoor thermal comfort. This study aims to analyze and compare the effectiveness of Phase Change Materials (PCMs) based on paraffin wax and beeswax in reducing roof and indoor temperatures. PCMs function by absorbing and releasing latent heat through phase-change processes, including liquid-gas and solid-solid transitions, known as Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES). An experimental method was employed, with temperature measurements digitally recorded using an Arduino IDE-based system. Temperature measurements were taken at several predetermined points to evaluate the thermal performance characteristics of each PCM variation. The experimental results showed that the roof without PCM resulted in an indoor temperature of 44.8 °C. The use of 100% beeswax reduced the indoor temperature by 4.36%. Meanwhile, a mixture of 75% paraffin wax and 25% beeswax achieved a temperature reduction of 5.39%. The best performance was obtained using a mixture of 50% paraffin wax and 50% beeswax, which reduced the temperature by up to 12.7%. Overall, the application of PCM reduced the indoor temperature by up to 2.36 °C compared with the condition without PCM. These results demonstrate that PCM has the potential to serve as an alternative passive cooling material for improving thermal comfort, particularly in buildings located in tropical climates.

Keywords: 3D printing, impeller, propulsion, thrust, waterjet thruster

Abstrak

Indonesia merupakan negara beriklim tropis yang memiliki temperatur udara relatif tinggi, bahkan dapat mencapai 35 °C, dengan kelembapan relatif hingga 80%. Kondisi tersebut mendorong perlunya penerapan sistem pendinginan pasif yang efektif untuk meningkatkan kenyamanan termal di dalam ruangan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan efektivitas penggunaan Phase Change Material (PCM) berbasis paraffin wax dan bees wax dalam mengurangi temperatur pada atap dan ruang bangunan. PCM berfungsi menyerap dan melepaskan panas laten melalui proses perubahan fase, baik cair-gas maupun padat-padat, yang dikenal sebagai Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES). Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan sistem pengukuran temperatur secara digital menggunakan perangkat berbasis Arduino IDE. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik yang telah ditentukan untuk mengetahui dan mengevaluasi karakteristik kinerja termal dari setiap variasi PCM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa atap tanpa PCM menghasilkan temperatur ruangan sebesar 44,8 °C. Penggunaan bees wax 100% mampu menurunkan temperatur ruangan sebesar 4,36%. Sementara itu, campuran paraffin wax 75% dan bees wax 25% menghasilkan penurunan temperatur sebesar 5,39%. Kinerja terbaik diperoleh pada komposisi paraffin wax 50% dan bees wax 50%, yang mampu menurunkan temperatur hingga 12,7%. Secara keseluruhan, penerapan PCM dapat menurunkan temperatur ruangan hingga 2,36 °C dibandingkan dengan kondisi tanpa PCM. Hasil tersebut menunjukkan bahwa PCM berpotensi menjadi salah satu alternatif material pendinginan pasif untuk meningkatkan kenyamanan termal, terutama pada bangunan yang berada di wilayah beriklim tropis. Kata kunci: 3D printing, impeller, propulsion, gaya dorong, waterjet thruster.

1. Pendahuluan

Ruangan tertutup cenderung berpotensi mengalami akumulasi panas yang disebabkan terhambatnya aliran udara dari lingkungan akibat terhalang oleh dinding pembatas. Kondisi tersebut dapat menyebabkan ketidaknyamanan termal bagi penghuni ruangan. Selain disebabkan oleh sirkulasi udara yang kurang optimal, peningkatan temperatur di dalam ruangan juga dapat dipengaruhi oleh keberadaan berbagai sumber panas, seperti manusia, hewan, serta peralatan elektronik. Semakin banyak sumber panas yang terdapat di dalam ruangan, semakin cepat pula terjadi akumulasi energi termal, sehingga udara panas dan lembap cenderung terperangkap serta menurunkan kualitas kenyamanan (Siricharoenpanich et al., 2019).

Indonesia memiliki iklim tropis dengan kelembaban udara yang tinggi, yang dapat mencapai 80%, serta suhu udara yang relatif tinggi hingga 35°C (H.H & Lapisa, 2019). Sebagai Upaya untuk memperoleh kenyamanan termal, pada umumnya masyarakat memanfaatkan sistem pendingin untuk menurunkan temperatur udara ruangan. Menurut (Purbakawaca & Fauzan, 2022) tingkat kenyamanan termal yang berada pada kondisi optimal yaitu 22,8°C - 25,8°C dengan kelembaban relatif rata-rata sebesar 65%. *Air Conditioner* (AC) banyak digunakan sebagai pengkondisian suhu ruangan. Penggunaan AC dapat mengeluarkan biaya operasional listrik yang cukup besar, yang sangat tergantung pada kapasitas panas yang dikeluarkan oleh AC untuk memperoleh kesejukan sesuai dengan kebutuhan ruangan (Fransisco, 2020). Oleh karena itu, untuk mengurangi beban energi dari penggunaan AC, penggunaan insulasi bangunan telah banyak digunakan seperti atap insulasi yang bertujuan untuk menghambat panas masuk ke dalam ruangan. Saat ini, pengembangan insulasi atap dengan menggunakan *Phase Change Material* (PCM) mulai dilakukan karena dengan sifat PCM yang dapat menyimpan energi melalui perubahan fase sangat potensial dalam menyerap panas (Yu et al., 2024).

Phase Change Material merupakan bahan yang mampu menyerap, menyimpan, dan melepas energi panas secara signifikan saat terjadi perubahan fase dari padat ke cair atau sebaliknya pada suhu atau tekanan tertentu. Dengan demikian bahan yang digunakan sebagai PCM diharapkan mampu menyerap dan melepaskan panas yang lebih efektif

pada atap bangunan dibandingkan tanpa menggunakan PCM (Ben Hamida et al., 2024).

Berbagai jenis *Phase Change Material* (PCM) memiliki sifat fisik yang beragam, seperti suhu leleh, suhu beku, dan energi panas laten yang dimilikinya. Oleh sebab itu, pemilihan PCM perlu disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dan kondisi lingkungan aplikasi. Material PCM dapat ditemukan dalam kehidupan sehari-hari, seperti parafin, minyak nabati, minyak kelapa, serta garam hidrat. Dalam penerapannya, PCM berperan sebagai sistem pendingin pasif ruangan, karena kemampuannya dalam menyimpan dan melepas panas secara efektif dapat membantu mengurangi konsumsi energi sekaligus menjaga kestabilan suhu dalam ruang tertutup (Ummah, 2020). PCM dapat diimplementasikan dalam konstruksi bangunan baru, serta perombakan bangunan yang ada tanpa perlu renovasi besar. Ini memberikan peluang untuk meningkatkan kinerja termal dan efisiensi energi dari stok bangunan yang ada (Al-Absi et al., 2021).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk pengkondisian udara pasif tersebut. Seperti yang telah dilakukan oleh Akeiber, dkk, eksperimen ini menggunakan tiga jenis PCM dengan komposisi yaitu PCM 1 60% minyak + 40% *paraffin*, PCM 2 50% minyak + 50% *paraffin*, PCM 3 40% minyak + 60% *paraffin*. Ketiga PCM ini diuji dalam prototipe struktur atap berukuran 1 m x 1 m x 1m. Didapatkan bahwa PCM3 menunjukkan titik leleh tertinggi (40-44°C) dengan kapasitas penyimpanan panas yang besar. PCM ini merupakan pilihan terbaik untuk digunakan dalam konstruksi atap di iklim panas karena kemampuan superior dalam menyimpan energi panas dan menjaga stabilitas termal (Akeiber et al., 2016). Penelitian lain yang dilakukan oleh Inzamam Ahmad dkk. berfokus pada evaluasi pengaruh penggunaan PCM murni yang dikombinasikan dengan sistem ventilasi aktif pada atap terhadap pengurangan energi termal yang masuk ke dalam bangunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PCM dengan temperatur perubahan fase di bawah 36 °C, baik diterapkan dengan maupun tanpa ventilasi aktif, memiliki potensi yang cukup efektif dalam mereduksi perpindahan energi panas ke dalam bangunan hingga mencapai 75% (Ahmad et al., 2024).

Berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa PCM berpotensi digunakan sebagai material penyimpan energi termal untuk mengurangi beban panas pada bangunan, namun

sebagian besar kajian masih berfokus pada penggunaan PCM tunggal atau konfigurasi tertentu dan belum banyak membahas penggunaan kombinasi *paraffin-beeswax* pada atap bangunan, khususnya terkait pengaruh variasi komposisinya terhadap distribusi suhu ruang dan fluks panas yang masuk ke dalam bangunan. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi kinerja komposit *paraffin-beeswax* sebagai sistem pengondisian udara pasif yang diaplikasikan pada atap rumah dalam mereduksi panas, menurunkan dan menstabilkan suhu udara dalam ruang, serta meningkatkan kenyamanan termal. Evaluasi dilakukan menggunakan model bangunan sederhana dengan mengukur suhu pada beberapa titik menggunakan termokopel. Data suhu dan yang masuk ke dalam ruang kemudian dianalisis dan dibandingkan untuk mengetahui komposisi optimal PCM dalam mereduksi panas.

2. Metode Penelitian

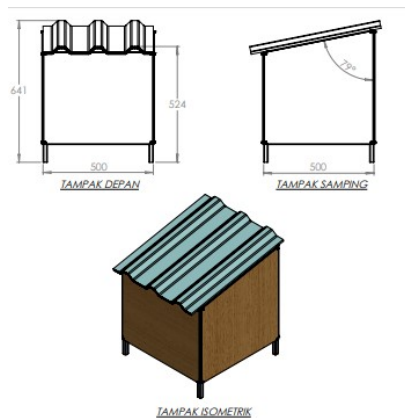
Pada penelitian ini dilakukan studi eksperimental untuk mengamati perubahan suhu serta perubahan fase pada *paraffin wax* yang dikombinasikan dengan *beeswax*. Untuk menganalisis karakterisasi kombinasi PCM tersebut, maka dilakukan pengujian pada atap bangunan yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan material tersebut dalam menurunkan suhu udara di dalam ruangan, sehingga dapat menciptakan kondisi termal yang lebih nyaman.

Agar diperoleh komposisi komposit PCM yang optimal, maka di dalam penelitian ini digunakan perbandingan *paraffin wax* dan *beeswax* dengan

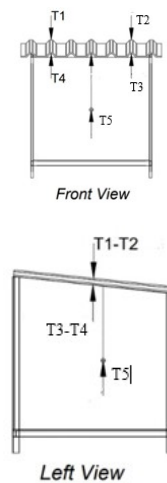
tiga variasi, yaitu beeswax 100%, paraffin wax 75% dan beeswax 25%, serta paraffin wax 50% dan beeswax 50%, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Material PCM ditempatkan pada setiap rongga atap UPVC untuk menyerap panas ketika atap terpapar sinar matahari. Penggunaan PCM pada atap diharapkan dapat mengurangi perpindahan panas ke dalam ruangan sehingga temperatur ruangan dapat menurun.

Pengujian dilakukan pada model bangunan dengan dimensi 50 cm × 50 cm yang terbuat dari triplek dengan kerangka aluminium hollow. Sementara tinggi bangunan pada bagian depan yaitu 64,1 cm dan bagian belakang 52,4 cm. Pada bagian atas bangunan dipasang atap UPVC yang membentuk kemiringan sudut 79°. Bentuk dari model bangunan tersebut ditunjukkan pada Gambar 1a. Model bangunan tersebut digunakan untuk mengamati pengaruh penggunaan PCM pada atap terhadap perubahan temperatur di dalam ruangan.

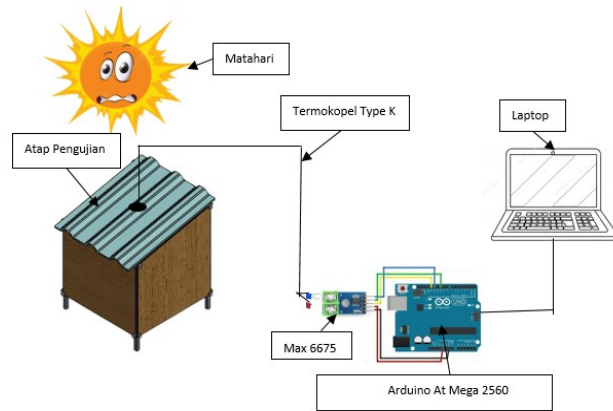
Proses pengujian dilakukan selama 4 jam dibawah paparan sinar matahari langsung. Pengukuran temperatur dilakukan menggunakan lima unit termokopel tipe K. Empat termokopel ditempatkan pada bagian atap, sedangkan satu termokopel digantung di dalam ruangan untuk mengukur temperatur udara ruangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1b. Termokopel dihubungkan dengan sistem akusisi data menggunakan Arduino Mega 2560 dan perangkat lunak Arduino IDE. Data temperatur yang terukur dikirim dan disimpan pada laptop untuk dianalisis. Rangkaian pengujian atau set up eksperimen pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1c.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. a) Model bangunan untuk pengujian PCM, b) posisi termokopel, c) rangkaian pengujian karakterisasi PCM pada atap bangunan

Untuk menghasilkan komposisi PCM *paraffin* dan *bees wax* dengan berbagai perbandingan konsentrasi, maka dilakukan proses pencampuran. Proses pembuatan bahan komposit diawali dengan preparasi material *paraffin wax* dan *beeswax* (sesuai perbandingan berat) melalui proses penumbukan dan penghalusan untuk memperoleh ukuran material yang lebih kecil dan seragam. Selanjutnya, kedua material dimasukkan ke dalam wadah pemanas dan dipanaskan secara bertahap hingga mengalami perubahan fase dari padat menjadi cair.

Selama proses pemanasan, campuran diaduk secara kontinu untuk memperoleh distribusi material yang merata dan menghasilkan campuran yang homogen. Setelah seluruh material mencair dan tercampur secara sempurna, campuran didiamkan sementara hingga suhunya menurun agar lebih aman dan mudah ditangani pada tahap berikutnya. Campuran *paraffin wax* dan *beeswax* kemudian dipindahkan ke dalam gelas ukur atau spuit sebagai media untuk mempermudah proses pengisian.

Selanjutnya, campuran PCM cair tersebut dimasukkan secara perlahan ke dalam setiap rongga atau lubang yang terdapat pada atap hingga seluruh bagian yang direncanakan terisi secara merata. Setelah proses pengisian selesai, bahan dibiarkan mengalami proses pendinginan dan pemadatan sehingga terbentuk material komposit sesuai dengan konfigurasi yang telah ditentukan.

Tabel 1. Komposisi PCM

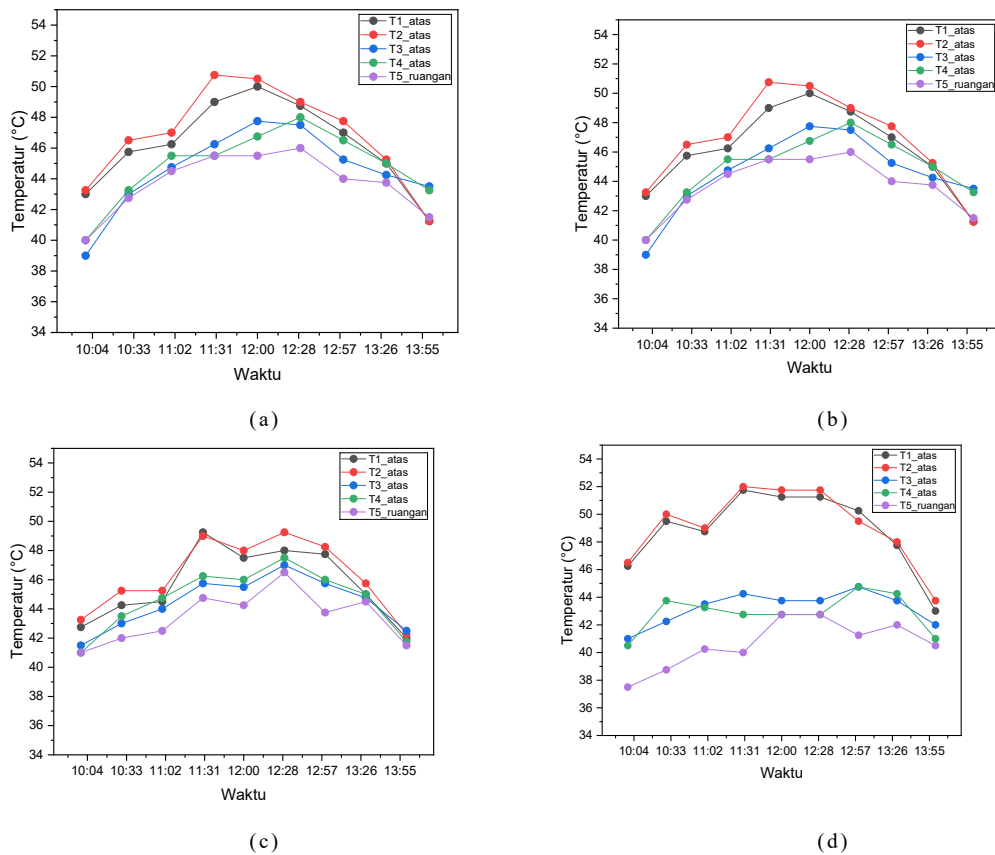
No.	PCM	Konsentrasi%	
		<i>Paraffin</i>	<i>Bees wax</i>
1.	Non PCM	0	0
2.	<i>Bees wax</i>	0	100
3.	<i>Paraffin wax</i> - <i>Bees wax</i>	75	25
4.	<i>Paraffin wax</i> - <i>Bees wax</i>	50	50

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis ini bertujuan untuk membandingkan kinerja dari dua jenis *Phase Change Material* (PCM), yaitu *paraffin wax* dan *bees wax*, dalam proses penurunan temperatur pada atap rumah. Hasil pengujian menggambarkan secara rinci perbandingan performa masing-masing PCM dalam menahan dan mereduksi panas yang diterima oleh atap, sehingga dapat dievaluasi tingkat efektivitasnya dalam mempertahankan suhu ruangan yang lebih rendah.

Pengujian dilakukan secara kontinu dengan material PCM diterapkan pada atap *UPVC double layer* yang identik pada setiap sampel. 2 jenis PCM yang berbeda digunakan sebagai media penyimpan dan pengatur panas yang diharapkan mampu menurunkan suhu ruangan akibat paparan radiasi matahari.

Data yang diperoleh dari beberapa pengujian ini untuk berbagai komposisi PCM ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil pengamatan transien dari pengujian a) Non PCM, b) *Bees wax* 100%, c) *Paraffin wax* 75% - *Bees wax* 25%, dan d) *Paraffin wax* 50% - *Bees wax* 50%,

Berdasarkan hasil pengukuran yang ditunjukkan pada grafik, temperatur pada bagian atap secara umum mengalami peningkatan sejak awal pengujian, kemudian mencapai temperatur maksimum pada kisaran waktu sekitar 11:31–12:28, sebelum mengalami penurunan pada pengukuran berikutnya. Pola tersebut menunjukkan adanya pengaruh intensitas radiasi matahari terhadap temperatur atap. Ketika radiasi matahari meningkat, energi panas yang diterima permukaan atap juga meningkat sehingga temperatur material atap dan PCM mengalami kenaikan.

Pada grafik (a), temperatur beberapa titik pada atap meningkat dari sekitar 39–43 °C pada awal pengukuran menjadi sekitar 46–51 °C pada kondisi temperatur maksimum. Temperatur tertinggi terlihat pada T2_atap, yang mencapai sekitar 50–51 °C pada pukul 11:31. Sementara itu, T1_atap berada pada kisaran 49–50 °C dan T3_atap serta T4_atap berada pada kisaran 47–49 °C. Berbeda dengan temperatur pada bagian atap, T5_ruangan menunjukkan temperatur yang lebih rendah dan

relatif lebih stabil, yaitu sekitar 42–46 °C. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa tidak seluruh panas yang diterima oleh atap secara langsung diteruskan menjadi panas udara di dalam ruangan.

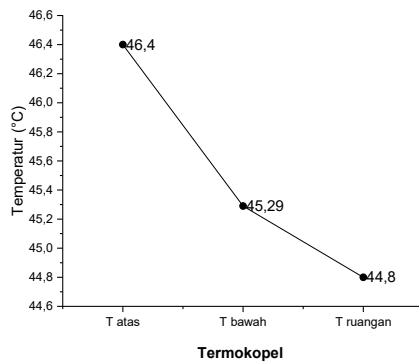
Pola yang hampir sama juga terlihat pada grafik (b). Temperatur pada bagian atap meningkat secara bertahap dan mencapai temperatur maksimum sekitar 49–51 °C, sedangkan temperatur udara ruangan berada pada kisaran 42–46 °C. Kondisi ini memperlihatkan adanya gradien temperatur antara bagian atap dan ruangan. Gradien temperatur tersebut merupakan salah satu indikator bahwa atap mengalami pemanasan lebih intensif dibandingkan udara di dalam model bangunan.

Pada grafik (c), peningkatan temperatur juga terjadi sejak awal pengujian. Temperatur atap pada awal pengujian berada pada kisaran 41–43 °C, kemudian meningkat hingga sekitar 47–49 °C. Temperatur tertinggi terjadi sekitar pukul 11:31–12:28. Setelah mencapai temperatur maksimum, seluruh temperatur cenderung mengalami

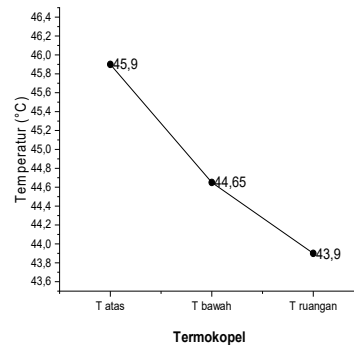
penurunan hingga akhir pengujian. Sementara itu, temperatur T5_ruangan meningkat dari sekitar 41 °C menjadi sekitar 46–47 °C sebelum kemudian menurun kembali. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur atap diikuti oleh peningkatan temperatur udara di dalam ruangan, tetapi dengan respons yang lebih lambat dibandingkan temperatur atap.

Kondisi yang berbeda terlihat pada grafik (d), dimana temperatur pada bagian atap mencapai nilai yang lebih tinggi dibandingkan grafik lainnya. Temperatur T1_atap dan T2_atap mencapai sekitar 51–52 °C, sedangkan T3_atap dan T4_atap berada

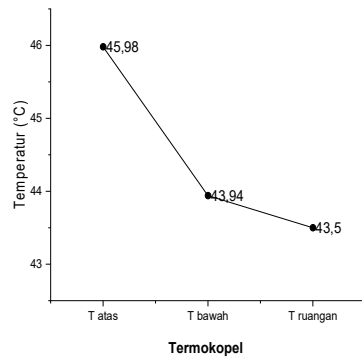
pada kisaran 43–45 °C. Pada saat yang sama, temperatur udara ruangan T5_ruangan berada pada kisaran sekitar 37–43 °C. Perbedaan temperatur antara sensor pada atap dan sensor di dalam ruangan terlihat lebih besar pada kondisi ini. Hal tersebut menunjukkan bahwa terdapat hambatan perpindahan panas dari atap menuju udara ruangan sehingga peningkatan temperatur pada bagian atap tidak sepenuhnya diteruskan ke dalam ruangan.



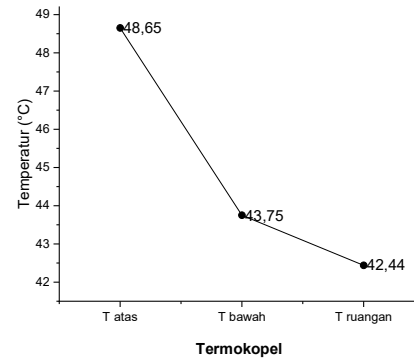
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3. Data Perbandingan temperature rata-rata dari pengujian a) Non PCM, b) *Bees wax* 100%, c) *Paraffin wax* 75% - *Bees wax* 25%, dan d) *Paraffin wax* 50% - *Bees wax* 50%.

Berdasarkan hasil keempat sampel yang diuji, masing-masing menunjukkan pola kenaikan dan penurunan suhu yang berbeda-beda seiring berjalannya waktu. Pada detik awal pengujian, terjadi peningkatan temperatur yang signifikan, terutama pada titik pengukuran T_{atas} . Untuk atap dengan variasi tanpa PCM, temperatur rata-rata T_{atas} tercatat sebesar 46,4°C. Pada atap dengan komposisi PCM *bees wax* 100%, temperatur T_{atas} sedikit lebih rendah, yaitu 45,9°C. Pada atap dengan variasi PCM *paraffin wax* 75% dan *bees wax* 25%, temperatur T_{atas} menunjukkan 45,98°C. Sementara pada atap dengan kombinasi variasi PCM *paraffin wax* 75% dan *bees wax* 25%, temperatur atas tercatat sebesar 48,65°C.

Pada titik pengukuran T_{bawah} , atap dengan variasi tanpa PCM menunjukkan temperatur rata-rata sebesar 45,29°C. Dengan penggunaan *bees wax* 100%, temperatur T_{bawah} ada kenaikan sedikit menjadi 44,65°C. Untuk kombinasi komposisi PCM *paraffin wax* 75% dan *bees wax* 25%, temperatur T_{bawah} yakni sebesar 44,94°C. Sedangkan pada variasi komposisi PCM *paraffin wax* 50% dan *bees wax* 50%, temperatur T_{bawah} tercatat yakni sebesar 43,75°C.

Adapun pada pengukuran temperatur ruangan (T_5), diperoleh hasil sebesar 44,8°C untuk pengujian dengan variasi tanpa PCM, 43,9°C untuk penggunaan 100% *bees wax*, dan 43,5°C untuk kombinasi PCM *paraffin wax* 75% dan *bees wax* 25%. Sedangkan 42,44°C untuk kombinasi PCM *paraffin wax* 50% dan *bees wax* 50%. Data ini menunjukkan bahwa variasi material memiliki pengaruh yang nyata terhadap penurunan temperatur, baik pada bagian atap maupun di dalam ruangan.

Selanjutnya, jika dibandingkan penurunan temperatur antara permukaan atap (T_{atas}) dan suhu di dalam ruangan (T_{ruangan}) pada masing-masing variasi menunjukkan bahwa atap tanpa penggunaan PCM mengalami penurunan suhu sebesar 3,45%. Pada penggunaan *bees wax* murni 100%, penurunan temperatur sedikit lebih rendah yaitu 4,36%. Variasi PCM dengan komposisi *paraffin wax* 75% dan *bees wax* 25% menghasilkan penurunan temperatur sebesar 5,39%. Sedangkan kombinasi *paraffin wax* 50% dan *bees wax* 50% menunjukkan efektivitas paling tinggi dalam menurunkan suhu, dengan penurunan mencapai 12,7%.

Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa kombinasi *paraffin wax* 50% dan *bees wax* 50% memberikan efek penurunan temperatur paling signifikan dibandingkan variasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi material tersebut memiliki performa lebih baik dalam menyerap dan mengurangi panas, sehingga dapat meningkatkan kenyamanan termal.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat diamati perbandingan performa penurunan temperatur

ruangan antara sistem atap yang menggunakan material PCM dengan komposisi *paraffin wax* 50% dan *bees wax* 50% serta sistem atap yang tidak dilengkapi dengan PCM menunjukkan kemampuan penurunan temperatur ruangan sebesar 42,44°C. Sementara itu, atap tanpa penggunaan PCM hanya mampu menurunkan temperatur ruangan rata-rata sebesar 44,8°C. Dengan demikian, selisih penurunan suhu sebesar 2,36°C antara kedua variasi tersebut memberikan indikasi bahwa penggunaan kombinasi PCM *paraffin wax* dan *bees wax* mampu meningkatkan efektivitas penurunan temperatur dengan pendinginan pasif pada bangunan.

Secara keseluruhan, penggabungan *paraffin wax* dan *bees wax* dalam komposisi seimbang meningkatkan kinerja PCM karena memadukan kelebihan kedua material, yaitu kalor laten tinggi dari *paraffin* dan konduktivitas termal relatif lebih baik dari *bees wax*. Dengan demikian, penggunaan campuran PCM ini memiliki potensi besar dalam aplikasi bangunan hemat energi, terutama sebagai lapisan termal pasif pada atap untuk mengurangi beban pendinginan ruangan.

Proses penurunan temperatur ini berkaitan langsung dengan mekanisme perubahan fasa dari PCM. Ketika PCM dipanaskan dan mencapai titik leleh-nya, material tersebut menyerap kalor laten dari lingkungan sekitarnya untuk mengubah wujud dari padat menjadi cair. Selama proses ini, energi panas diserap tanpa menaikkan suhu lingkungan secara signifikan, sehingga menghasilkan efek penurunan temperatur ruangan secara efektif. Mekanisme ini telah banyak dilaporkan dalam literatur, seperti dijelaskan oleh (Farid et al., 2004), bahwa PCM mampu menyimpan energi panas dalam jumlah besar melalui proses perubahan fasa, yang menjadikannya sangat efektif sebagai sistem pendingin pasif dalam aplikasi bangunan. Selain itu, penggunaan PCM memberikan keuntungan dalam kestabilan suhu/temperatur. Pada grafik, fluktuasi temperatur pada sampel dengan PCM cenderung lebih stabil dibandingkan sampel tanpa PCM. Tanpa PCM, suhu meningkat lebih tajam pada termokopel 2 dan 4, mengindikasikan bahwa sistem lebih responsif terhadap variasi lingkungan termal. Sebaliknya, pada penggunaan PCM, khususnya komposisi *paraffin wax* 50% + *bees wax* 50%, fluktuasi ini lebih diredam, yang membuktikan kemampuannya sebagai penyangga termal (*thermal buffer*).

Lebih lanjut, perbandingan komposisi PCM menunjukkan bahwa tidak hanya keberadaan PCM yang penting, tetapi juga komposisi campuran yang digunakan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kombinasi tertentu antara *paraffin wax* dan *bees wax* mampu meningkatkan performa penyerapan panas, karena menyatukan kelebihan masing-masing bahan. *Paraffin wax*, dengan kalor laten tinggi, memberikan

kapasitas penyimpanan panas yang besar. Sementara itu, *bees wax*, meskipun memiliki kalor laten lebih rendah, mempunyai konduktivitas termal yang lebih baik, sehingga mempercepat transfer panas masuk ke dalam bahan. Ketika dikombinasikan, keduanya menciptakan efek sinergis dalam penyerapan dan pelepasan panas.

4. Kesimpulan

Penggunaan *Phase Change Material* (PCM) berbasis *paraffin wax* dan *bees wax* terbukti efektif dalam menurunkan dan menyerap panas sehingga dapat meningkatkan kinerja pengkondisian termal pada ruangan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kondisi tanpa PCM menghasilkan temperatur sebesar 44,8 °C, sedangkan penggunaan PCM dengan berbagai komposisi mampu menurunkan temperatur secara signifikan. Variasi *bees wax* 100% menghasilkan penurunan temperatur sebesar 4,36%, komposisi *paraffin wax* 75%–*bees wax* 25% sebesar 5,39%, dan komposisi *paraffin wax* 50%–*bees wax* 50% menghasilkan penurunan temperatur tertinggi, yaitu sebesar 12,7%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposisi PCM yang seimbang antara *paraffin wax* dan *bees wax* memberikan kinerja termal yang lebih optimal, yang diduga berkaitan dengan kombinasi kapasitas panas laten *paraffin wax* dan karakteristik perpindahan panas *bees wax*. Dengan demikian, penggunaan PCM berbasis campuran *paraffin wax*–*bees wax* pada atap bangunan dapat menjadi salah satu alternatif yang efektif untuk mengurangi temperatur ruangan dibandingkan dengan kondisi tanpa PCM.

Daftar Rujukan

- [1] Siricharoenpanich, A., Wiriyasart, S., Prurapark, R., Naphon, P., 2019. Effect of cooling water loop on the thermal performance of air conditioning system. *Case Stud. Therm. Eng.*, 15.
- [2] H H, T. K., Lapisa, R., 2019. Analisis Pengaruh Karakteristik Thermal Material. *Ranah Research : Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 1 (3), pp. 670–677.
- [3] Purbakawaca, R., Fauzan, S. A., 2022. Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbiaya Rendah Berbasis IoT. *Jurnal Talenta Sipil*, 5 (1), pp. 118-125.
- [4] Fransisco, T. M., 2020. Kajian Sifat Termal Material Fasa Berubahuntuk Aplikasi Ruang Sejuk.
- [5] Yu, J., *et al.*, 2023. Study on thermal performance of dynamic insulation roof integrated with phase change material. *Energy and Buildings*, 303.
- [6] Hamida, M.B.B., *et al.*, 2023. Role of applying PCMs on thermal behavior of innovative unit roof enclosure. *Journal of Energy Storage*, 77.
- [7] Ummah, M.S., 2020. 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析. *Sustain*, 11 (1), pp. 1–14.
- [8] Al-Absi, Z. A., Hafizal, M. I. M., Ismail, M., Ghazali, A., 2021. Towards sustainable development: Building's retrofitting with pcms to enhance the indoor thermal comfort in tropical climate, malaysia. *Sustain*, 13 (7).
- [9] Akeiber, H. J., Wahid, M. A., Hussien, H. M., Mohammad, A. T., 2016. A newly composed paraffin encapsulated prototype roof structure for efficient thermal management in hot climate. *Energy*, 104, pp. 99–106.
- [10] Ahmad, I., Ghosh, U., Bhargav, A., Bennacer, R., El Ganaoui, M., 2024. Phase change with inner ventilation for energy management: Roofs buildings in hot & dry climates case," *Int. J. Heat Mass Transf.*, 222, pp. 125165.
- [11] Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al-Hallaj, S., 2004. A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Convers. Manag.*, 45 (9–10), pp.1597–1615.