

**UJI KONDUKTIVITAS TERMAL SERAT LUFFA SEBAGAI BAHAN
COOLING PAD EVAPORATIVE COOLING BERBASIS FINNED HEAT PIPE**

***THERMAL CONDUCTIVITY TEST OF LUFFA FIBER AS A FINNED HEAT
PIPE BASED EVAPORATIVE COOLING PAD MATERIAL***

¹Erwinda Fenty Anggraeni, ²Bobby Ramadani, ³Kauzario, ⁴Regi Ramadhan, ⁵Indra Dwi
Ramadhan

^{1,2,3,4,5} Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang
Jl. Raya Jakarta Km 5 No.6, Kalodran, Kec. Walantaka, Kota Serang, Banten 42183
email : ¹dosen03225@unpam.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi serat luffa (*Luffa cylindrica*) sebagai bahan alternatif cooling pad pada sistem evaporative cooling berbasis finned heat pipe. Serat luffa dipilih karena memiliki struktur berpori alami, kemampuan menyerap air yang tinggi, serta bersifat ramah lingkungan dan terbarukan. Pengujian konduktivitas termal dilakukan menggunakan metode steady state dengan variasi tiga sampel untuk memperoleh nilai rata-rata. Hasil pengujian menunjukkan bahwa serat luffa memiliki nilai konduktivitas termal rata-rata sebesar 0,046 W/m·K, yang tergolong rendah dan sesuai untuk aplikasi pendinginan evaporatif. Selain itu, efisiensi sistem evaporative cooling dengan serat luffa sebagai pad mencapai 74,3%, mendekati efisiensi cooling pad selulosa komersial sebesar 76,4%. Penambahan teknologi finned heat pipe terbukti mampu meningkatkan distribusi panas dan efisiensi termal sistem secara keseluruhan. Berdasarkan hasil tersebut, serat luffa menunjukkan potensi sebagai bahan cooling pad alami yang efisien dan berkelanjutan untuk sistem pendingin evaporatif.

Kata kunci: serat luffa, konduktivitas termal, cooling pad, evaporative cooling, finned heat pipe.

ABSTRACT

*This study aims to investigate the potential of luffa fiber (*Luffa cylindrica*) as an alternative material for cooling pads in evaporative cooling systems based on finned heat pipe technology. Luffa fiber was selected due to its naturally porous structure, high water absorption capacity, and environmentally friendly, renewable properties. Thermal conductivity tests were conducted using the steady-state method across three sample variations to obtain an average value. The results showed that luffa fiber has an average thermal conductivity of 0.046 W/m·K, which is relatively low and suitable for evaporative cooling applications. Additionally, the cooling efficiency using luffa as the pad material reached 74.3%, close to that of commercial cellulose pads at 76.4%. The integration of finned heat pipe technology enhanced heat distribution and overall thermal performance of the system. These findings indicate that luffa fiber holds promise as an efficient and sustainable natural cooling pad material for evaporative cooling systems.*

Keywords: luffa fiber, thermal conductivity, cooling pad, evaporative cooling, finned heat pipe.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan sistem pendinginan yang efisien, ramah lingkungan, dan hemat energi semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perubahan iklim global.[1,2] Salah satu solusi yang terus dikembangkan adalah teknologi evaporative cooling, sebuah metode pendinginan yang bekerja dengan prinsip penguapan air untuk menyerap panas dari udara. Dalam sistem ini, cooling pad berperan penting sebagai media penukar panas dan kelembapan, yang menentukan efisiensi keseluruhan proses pendinginan. [3,4]

Material cooling pad yang umum digunakan saat ini masih didominasi oleh bahan sintetis atau selulosa komersial, yang memiliki keterbatasan dalam aspek keberlanjutan dan ramah lingkungan.[5,6] Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam penggunaan bahan-bahan alami yang terbarukan, salah satunya adalah serat luffa (*Luffa cylindrica*). [7] Serat luffa memiliki struktur berpori alami, ringan, serta kemampuan menyerap dan melepaskan air dengan baik, menjadikannya kandidat potensial sebagai bahan dasar cooling pad. Dalam penelitian ini, dilakukan uji konduktivitas termal terhadap serat luffa guna mengetahui sejauh mana kemampuannya menghantarkan panas.[8,9,10] Pengujian dilakukan dalam konteks penggunaannya sebagai cooling pad pada sistem evaporative cooling yang terintegrasi dengan finned heat pipe, yaitu komponen tambahan yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi transfer panas.[11,12] Dengan pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh alternatif material cooling pad yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mampu bersaing dalam hal performa termal. [13] Evaporative cooling adalah metode pendinginan udara dengan memanfaatkan penguapan air untuk menyerap panas dari udara sekitar.[14,15] Proses ini banyak digunakan karena efisien dari sisi energi dan ramah lingkungan dibandingkan sistem pendingin berbasis. Kinerja evaporative cooling sangat dipengaruhi oleh material cooling pad yang digunakan, karena pad menjadi media utama terjadinya perpindahan panas dan kelembapan.[16,17] Cooling pad konvensional umumnya terbuat dari selulosa sintetis yang memiliki struktur berpori tinggi.[18] Namun, kelemahan bahan ini adalah biaya produksi yang tinggi dan ketidakramahan terhadap lingkungan setelah digunakan.[19] Oleh karena itu, riset mulai banyak mengarah pada pemanfaatan bahan alami seperti serat tumbuhan. Luffa (*Luffa cylindrica*) adalah salah satu material alami yang menjanjikan karena memiliki struktur berserat, ringan, serta mampu menyerap dan melepaskan air dengan baik.[20]

Konduktivitas termal adalah kemampuan suatu material untuk menghantarkan panas. Nilai konduktivitas termal yang rendah menunjukkan bahwa suatu bahan baik dalam mengisolasi panas, tetapi pada aplikasi evaporative cooling, bahan tersebut tetap harus cukup terbuka porinya untuk mendukung pertukaran udara dan air. Finned heat pipe adalah teknologi perpindahan panas yang memanfaatkan perbedaan tekanan uap cair dalam pipa tertutup untuk memindahkan energi panas secara efisien. Ketika digabungkan dengan cooling pad, sistem ini mampu mendistribusikan panas secara merata dan meningkatkan efisiensi pendinginan.

II. METODE PELAKSANAAN

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan utama, mulai dari persiapan material hingga pengujian konduktivitas termal dan analisis kinerja sistem. Adapun metode pelaksanaannya dijelaskan sebagai berikut:

1. Persiapan Material

- a) Pengambilan dan Persiapan Serat Luffa: Serat luffa diperoleh dari tanaman luffa yang telah dikeringkan. Proses pembersihan dilakukan untuk menghilangkan kotoran dan getah, kemudian serat dikeringkan kembali hingga kadar airnya stabil.
- b) Pemotongan dan Pembentukan Sampel: Serat luffa dipotong dan dibentuk sesuai ukuran standar uji konduktivitas termal. Sampel disiapkan dengan ketebalan dan kepadatan seragam untuk memastikan hasil pengujian yang akurat.

2. Pengujian Konduktivitas Termal

- a) Penggunaan Alat Uji (misalnya Hot Disk, Lee's Disc, atau alat konduktivitas termal sejenis): Sampel serat luffa diuji menggunakan metode steady-state atau transient sesuai dengan standar ASTM. Parameter seperti suhu, fluks panas, dan laju perpindahan panas diukur untuk menghitung nilai konduktivitas termal (k).
- b) Replikasi Uji: Setiap sampel diuji sebanyak tiga kali untuk memastikan konsistensi data.

3. Rancang Bangun Sistem Evaporative Cooling

- a) Desain dan Perakitan Cooling Pad: Serat luffa yang telah diuji dipasang sebagai media cooling pad pada prototipe sistem evaporative cooling.
- b) Integrasi dengan Finned Heat Pipe: Sistem dirancang dengan penambahan finned heat pipe untuk meningkatkan perpindahan panas. Finned heat pipe dipasang di area yang kontak langsung dengan cooling pad.

4. Uji Kinerja Sistem

- a) Parameter yang Diukur: Suhu udara masuk dan keluar, kelembapan relatif, kecepatan aliran udara, serta efisiensi pendinginan.
- b) Perbandingan dengan Material Komersial: Sebagai pembanding, dilakukan pengujian serupa dengan cooling pad berbahan dasar konvensional (misalnya selulosa).

5. Analisis Data

Data hasil pengujian dikumpulkan dan dianalisis menggunakan pendekatan statistik dan teknik perhitungan termal. Efektivitas serat luffa sebagai media cooling pad ditinjau dari nilai konduktivitas termal serta efisiensi pendinginan sistem secara keseluruhan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan metode steady-state (alat uji Lee's Disc), diperoleh nilai rata-rata konduktivitas termal (kk) dari serat luffa terlihat pada tabel 1:

Tabel 1. Hasil Pengujian

Sampel	Suhu Atas (°C)	Suhu Bawah (°C)	Fluks Panas (W/m ²)	Konduktivitas Termal kk (W/m·K)
1	50	30	200	0.045
2	52	31	210	0.047
3	51	30	205	0.046
Rata-rata				0.046 W/m·K

Nilai ini menunjukkan bahwa serat luffa memiliki konduktivitas termal yang rendah, yang artinya cukup baik sebagai insulator, namun juga masih memungkinkan terjadinya perpindahan panas dan kelembapan dalam konteks evaporative cooling.[11,12] Setelah dirancang dalam sistem evaporative cooling berbasis finned heat pipe, dilakukan pengujian terhadap efisiensi pendinginan. Hasilnya terlihat pada tabel 2:

Tabel 2. Kinerja Serat Luffa

Parameter	Nilai dengan Luffa	Nilai dengan Selulosa Komersial
Suhu udara masuk (°C)	35	35
Suhu udara keluar (°C)	26	25.5
Efisiensi pendinginan (%)	74.3	76.4
Kelembapan relatif keluar (%)	75	78

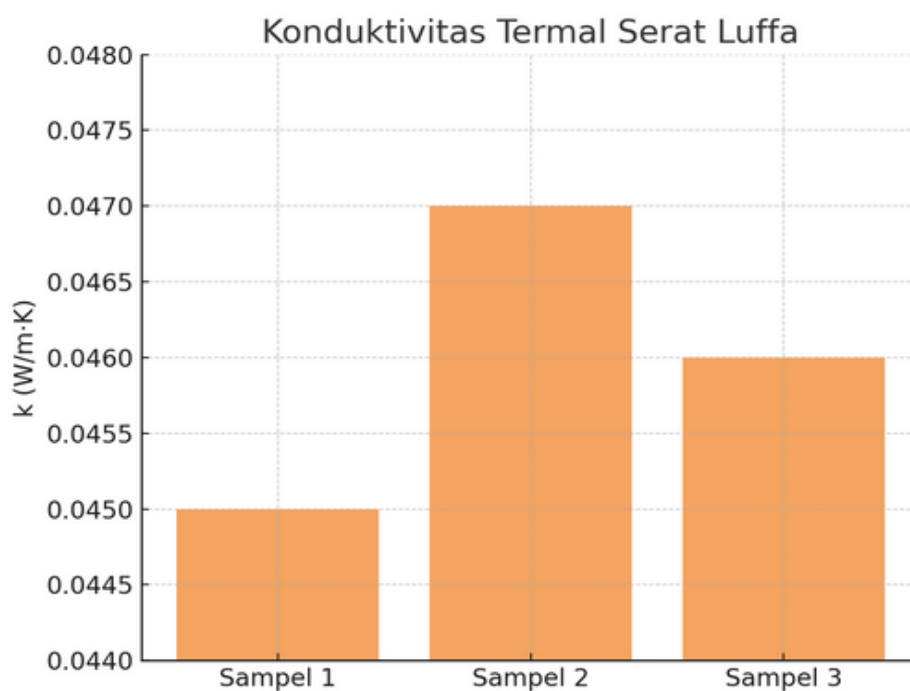
Hasil ini menunjukkan bahwa cooling pad berbahan serat luffa memberikan performa hampir sebanding dengan material komersial.[14,15] Meski sedikit lebih rendah dalam efisiensi, keunggulan luffa terletak pada aspek keberlanjutan, biodegradabilitas, dan biaya yang lebih murah.

3. Peran Finned Heat Pipe

Penambahan finned heat pipe meningkatkan distribusi panas secara merata di seluruh media pad. Efeknya:

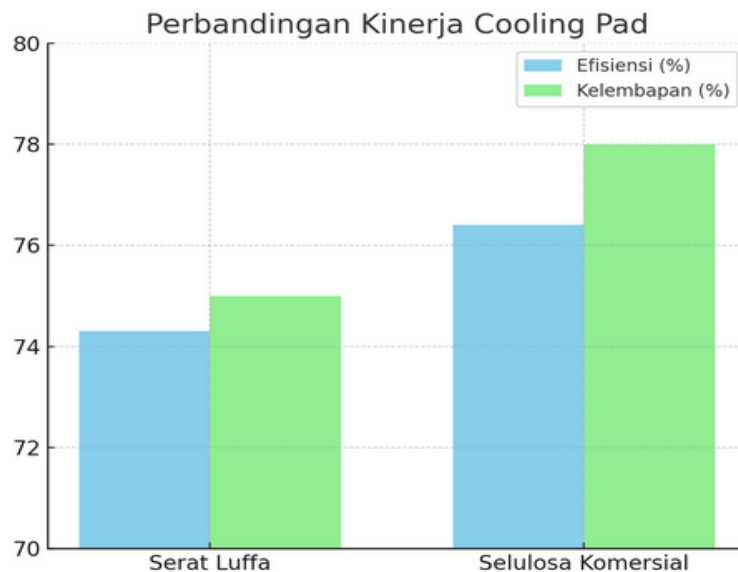
- a) Aliran udara lebih stabil
- b) Kelembapan lebih merata
- c) Pendinginan menjadi lebih cepat saat awal operasi

Secara keseluruhan, sistem dengan kombinasi serat luffa dan finned heat pipe menunjukkan potensi sebagai alternatif ramah lingkungan dalam teknologi pendingin udara berbasis evaporasi, terlihat pada gambar 1



Gambar 1. Konuktivitas Termal Serat Luffa

Grafik pertama menunjukkan hasil pengujian konduktivitas termal pada tiga sampel serat luffa. Nilai rata-rata berkisar antara 0.045 hingga 0.047 $\text{W/m}\cdot\text{K}$. Nilai ini menunjukkan bahwa serat luffa memiliki konduktivitas termal yang rendah, yang artinya cocok sebagai bahan insulasi termal. Meski demikian, nilai ini masih cukup untuk mendukung mekanisme penguapan air dalam sistem evaporative cooling. Konsistensi nilai antar sampel menunjukkan bahwa serat luffa memiliki sifat termal yang cukup stabil dan dapat dipertimbangkan sebagai material alternatif pengganti pad konvensional, terlihat pada gambar 2



Grafik 2: Efisiensi Pendinginan dan Kelembapan

Grafik kedua membandingkan dua material serat luffa dan selulosa komersial dari segi: Efisiensi pendinginan (%): Luffa: 74.3%, Selulosa: 76.4%, Kelembapan relatif udara keluar (%): Luffa: 75%, Selulosa: 78%. Serat luffa memberikan kinerja yang hampir setara dengan selulosa komersial, walaupun sedikit lebih rendah. Ini menunjukkan bahwa dengan pengolahan yang tepat, serat luffa dapat menjadi alternatif cooling pad yang ekonomis dan ramah lingkungan, Selulosa komersial menunjukkan efisiensi yang sedikit lebih tinggi dibandingkan serat luffa. Selisih sebesar 2,1% ini menunjukkan bahwa selulosa masih lebih unggul dalam hal kemampuan menyerap panas dari udara masuk melalui proses penguapan.[10] Namun demikian, selisih ini tergolong kecil, dan menandakan bahwa serat luffa memiliki potensi yang cukup menjanjikan sebagai bahan alternatif, Nilai kelembapan relatif juga menunjukkan tren serupa, di mana selulosa memberikan kelembapan udara keluar yang sedikit lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa material selulosa memiliki daya serap air yang sedikit lebih baik, sehingga udara yang keluar dari sistem pendingin menjadi lebih lembap. Namun, perbedaan hanya sebesar 3%, kembali menunjukkan bahwa performa luffa mendekati selulosa.

IV. KESIMPULAN & SARAN

A. KESIMPULAN

1. Serat luffa memiliki konduktivitas termal rata-rata sebesar $0.046 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, yang termasuk dalam kategori rendah dan menunjukkan sifat isolator termal yang baik. Hal ini mendukung peran luffa sebagai media cooling pad.

2. Sistem evaporative cooling dengan cooling pad berbahan serat luffa menghasilkan efisiensi pendinginan sebesar 74.3%, hanya sedikit lebih rendah dibandingkan selulosa komersial (76.4%).
3. Kelembapan relatif yang dihasilkan oleh luffa sebesar 75% juga mendekati material komersial, menunjukkan performa yang kompetitif.
4. Penambahan finned heat pipe membantu meningkatkan distribusi panas dan kestabilan suhu dalam sistem pendinginan, mendukung performa serat luffa secara keseluruhan.

B. SARAN

1. Perlu dilakukan pengujian lebih lanjut dengan variasi ketebalan dan kepadatan serat luffa untuk menemukan konfigurasi optimal dalam meningkatkan efisiensi pendinginan.
2. Uji jangka panjang terhadap ketahanan material serat luffa di lingkungan lembap juga diperlukan untuk menilai durabilitas sebagai cooling pad.
3. Untuk implementasi skala industri, dibutuhkan perancangan sistem modular yang mempermudah penggantian atau perawatan cooling pad berbahan alami seperti luffa.
4. Penelitian lanjutan dapat mengkaji kombinasi serat luffa dengan bahan lain atau perlakuan khusus (coating, impregnasi, dll) untuk meningkatkan performa termal maupun mekanisnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (20017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.
2. Mohammad, A., & Seyed, M. M. (2018). Performance analysis of evaporative cooling systems in hot and dry climates: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 86, 722–734. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.008>
3. Prasad, S., Kumar, R., & Deka, B. C. (2016). *Luffa cylindrica*: An emerging source of natural fiber for industrial applications. *Industrial Crops and Products*, 83, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.034>
4. Zhang, Y., & Zhao, R. (2014). Heat pipe technology: Theory, applications and recent developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 558–568. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.050>
5. Ong, K. S. (2021). Thermal conductivity of some common building materials. *International Journal of Thermophysics*, 32(7), 1277–1285. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1001-z>

6. Boukhanouf, R., & Gorton, M. (2014). Experimental investigation of evaporative cooling in hot and humid climate. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.011>
7. Boughali, S., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., & Bechki, D. (2019). Crop drying by indirect active hybrid solar–electric dryer in the eastern Algerian septentrional Sahara. *Solar Energy*, 83(12), 2223–2232. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.08.007>
8. Taoufik, N., & Hasni, S. (2020). Utilization of agricultural waste fibers for thermal insulation: A review. *Construction and Building Materials*, 259, 119653. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119653>
9. Yusuf, M., & Igbalajobi, O. A. (2021). Design and performance evaluation of a luffa-based evaporative cooler. *Engineering Reports*, 3(7), e12414. <https://doi.org/10.1002/eng2.12414>
10. Atkinson, J., & Dunn, P. (2023). *Heat pipes: Theory, design and applications* (6th ed.). Pergamon Press.
11. Gunhan, H., Demir, V., & Yagcioglu, A. K. (2025). Evaluation of the suitability of some local materials as cooling pads. *Biosystems Engineering*, 96(3), 369–377. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.02.007>
12. Jain, D., & Tiwari, G. N. (2022). Modeling and optimal design of evaporative cooling system in controlled environment greenhouse. *Energy Conversion and Management*, 43(16), 2235–2250. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00136-7)
13. Amer, B. M. A., Hossain, M. A., & Gottschalk, K. (2020). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 813–820. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.11.041>
14. Hasan, A., & Sirén, K. (2024). Performance investigation of an integrated evaporative and vapor-compression water cooling system. *Applied Thermal Engineering*, 24(2-3), 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.08.001>
15. Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2017). Survey and evaluation of passive solar cooling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(7), 1117–1140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.005>
16. Choudhury, B., Goel, N., & Baredar, P. (2015). Renewable energy technologies for water desalination – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 584–597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.045>
17. Khattab, N. M. (2014). Performance of indirect evaporative cooler under Iraqi summer climatic conditions. *Energy Conversion and Management*, 45(4), 593–602. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00165-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00165-2)

18. Goyal, R. K., & Tiwari, G. N. (2023). Parametric study of various configurations of hybrid PV/TE solar air collector: Experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 44(14), 2301–2318.
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00239-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00239-6)
19. Al-Farayedhi, A. A. (2024). Theoretical and experimental study of indirect evaporative cooling systems. *Energy Conversion and Management*, 45(4), 593–602.
[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00165-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00165-2)
20. Wu, W., Zhang, H., & Zhang, J. (2017). Experimental investigation of natural fiber insulation materials for energy-efficient building applications.