

Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Densitas Spons sebagai Cooling Pad terhadap Kinerja Sistem Evaporative Cooling

Bagiyo Condro Purnomo^{1*}, Oki Tegar Kurniawan¹, Pikri M. Rohim¹

¹ Mesin Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Magelang, Indonesia

*email: bagiyo@unimma.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.31603/35q99e68>

Abstract

The performance of an evaporative cooling system is strongly influenced by the characteristics of the cooling pad, particularly its ability to absorb, distribute, and retain water during the evaporation process. This study aims to investigate the effect of sponge cooling pad density on the performance of a passive evaporative cooling system utilizing capillary water transport without a water circulation pump. Three sponge densities, namely 0.0215 g/cm³, 0.0225 g/cm³, and 0.0233 g/cm³, were evaluated under air velocities of 4 m/s and 5 m/s. The measured parameters included inlet and outlet air temperatures, inlet and outlet relative humidity, water evaporation rate, cooling effect, relative humidity difference (ΔRH), and evaporative cooling effectiveness. The results demonstrate that the cooling pad density significantly affects the system performance. The sponge density of 0.0225 g/cm³ produced the highest cooling effect, the most stable increase in relative humidity, and the best evaporative cooling effectiveness among all tested densities. This performance is attributed to the optimum balance between capillary force, water retention capacity, medium permeability, and airflow resistance, which enhances simultaneous heat and mass transfer during the evaporation process. In contrast, lower sponge density reduced water retention capability, while higher density increased pressure drop, resulting in lower cooling performance. These findings indicate that optimizing the cooling pad density is essential for improving the performance of passive evaporative cooling systems, providing a simple and energy-efficient alternative by eliminating the need for a water circulation pump.

Keywords: *Evaporative Cooling; Cooling Pad; Sponge Density; Capillary Action; Cooling Effect.*

Abstrak

Performa sistem evaporative cooling sangat dipengaruhi oleh karakteristik cooling pad, terutama kemampuan media dalam menyerap, mendistribusikan, dan mempertahankan air selama proses evaporasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh densitas cooling pad berbahan spons terhadap performa sistem evaporative cooling dengan mekanisme pembasahan pasif melalui kapilaritas tanpa menggunakan pompa sirkulasi air. Variasi densitas spons yang digunakan adalah 0,0215 g/cm³, 0,0225 g/cm³, dan 0,0233 g/cm³, sedangkan kecepatan udara divariasikan sebesar 4 m/s dan 5 m/s. Parameter yang diamati meliputi temperatur udara masuk dan keluar, kelembaban relatif masuk dan keluar, laju penguapan air, cooling effect, perubahan kelembaban relatif (ΔRH), dan effectiveness evaporative cooling. Hasil penelitian menunjukkan bahwa densitas cooling pad



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem. Densitas $0,0225 \text{ g/cm}^3$ menghasilkan cooling effect tertinggi, peningkatan kelembaban relatif yang lebih stabil, serta effectiveness evaporative cooling terbaik dibandingkan variasi densitas lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa densitas tersebut mampu memberikan keseimbangan antara gaya kapiler, retensi air, permeabilitas media, dan hambatan aliran udara sehingga proses perpindahan panas dan massa berlangsung lebih efektif. Sebaliknya, densitas yang terlalu rendah menyebabkan kemampuan retensi air menurun, sedangkan densitas yang terlalu tinggi meningkatkan pressure drop sehingga mengurangi efektivitas pendinginan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi densitas cooling pad merupakan faktor penting dalam meningkatkan performa sistem evaporative cooling berbasis pembasahan pasif yang lebih sederhana dan hemat energi.

Kata Kunci: Pendinginan Evaporatif; Bantalan Pendingin; Densitas Spons; Kapilaritas; Efek Pendinginan.

1. Pendahuluan

Dunia saat ini menghadapi dua tantangan besar yang saling terkait: krisis energi dan perubahan iklim. Sektor transportasi, sebagai konsumen energi fosil terbesar kedua setelah industri, menjadi salah satu kontributor utama emisi Gas Rumah Kaca (GRK) (Mebarki et al., 2020)(Guo et al., 2025)(EPA, 2021). Menurut *International Energy Agency* (IEA), sektor transportasi menyumbang sekitar 24% dari emisi CO_2 terkait energi global pada tahun 2022 (Akimoto et al., 2021). Di Indonesia, konsumsi Bahan Bakar Minyak (BBM) untuk transportasi darat terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah kendaraan yang mencapai puluhan juta unit (Zahari & McLellan, 2024)(Kurniawan et al., 2020).

Dalam konteks ini, sistem pendingin udara (*Air Conditioning/AC*) konvensional pada kendaraan ternyata menjadi beban tersembunyi yang signifikan. Penelitian oleh Alani et al., 2022) menunjukkan bahwa penggunaan AC dapat meningkatkan konsumsi bahan bakar kendaraan konvensional hingga 20%. Di daerah perkotaan yang padat dan panas, kontribusi AC terhadap emisi kendaraan bahkan bisa lebih tinggi. Sistem AC konvensional menggunakan kompresor yang digerakkan langsung oleh mesin kendaraan melalui sabuk (belt), sehingga daya yang dibutuhkan untuk menjalankan kompresor secara langsung mengurangi daya mesin yang tersedia untuk penggerak kendaraan dan meningkatkan konsumsi bahan bakar.

Selain dampak energinya, sistem AC konvensional juga menggunakan refrigeran seperti R134a dan R1234yf yang memiliki Potensi Pemanasan Global (*Global Warming Potential/GWP*) yang tinggi (Meng et al., 2018). Oleh karena itu, pencarian teknologi pendingin alternatif yang lebih efisien energi dan ramah lingkungan menjadi sebuah keniscayaan, tidak hanya untuk kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) yang daya baterainya terbatas, tetapi juga untuk kendaraan konvensional berbahan bakar fosil.

Sementara itu, Indonesia dan negara tropis lainnya menghadapi tantangan unik dalam pencapaian kenyamanan termal kendaraan. Kondisi iklim dengan suhu tinggi ($28\text{-}35^\circ\text{C}$) dan kelembaban relatif tinggi ($70\text{-}90\%$) menciptakan lingkungan yang tidak nyaman bagi penghuni kabin (Tan et al., 2025). Kenyamanan termal, sebagaimana didefinisikan dalam ASHRAE Standard 55, tidak hanya bergantung pada suhu udara tetapi juga pada kelembaban relatif, kecepatan udara, dan suhu radiasi rata-rata. Suhu kabin kendaraan yang diparkir di bawah sinar matahari dapat mencapai $60\text{-}80^\circ\text{C}$ (Purnomo et al., 2020)(Salih et al., 2023)(Tong & Liu, 2020). Ketika pengemudi masuk, terjadi paparan

panas radiasi dari permukaan interior yang dapat meningkatkan risiko heat stress dan menurunkan konsentrasi mengemudi (Sun & Dong, 2022).

Sistem AC konvensional, meskipun efektif menurunkan suhu, seringkali gagal mengatasi masalah kelembaban tinggi yang menyebabkan rasa "sumuk" atau pengap. Oleh karena itu, sebuah sistem pendingin yang ideal untuk kendaraan di iklim tropis harus mampu tidak hanya menurunkan suhu udara (*sensible cooling*) tetapi juga mengatur tingkat kelembaban (*latent cooling*) untuk menciptakan kondisi nyaman yang seimbang. Sistem pendinginan alternatif lainnya adalah pendinginan evaporatif/*evaporative cooling system* (ECS), di mana area yang didinginkan oleh penguapan air karena energi udara (Sampath et al., 2020).

Pendinginan evaporative telah lama dikenal sebagai teknologi pendinginan yang efisien energi. Prinsip kerjanya yang memanfaatkan panas laten penguapan air hanya membutuhkan konsumsi energi untuk kipas dan pompa air, jauh lebih hemat dibandingkan siklus kompresi uap pada AC konvensional (Abdullah et al., 2023). Penelitian menunjukkan bahwa *direct evaporative cooler* (DEC) dapat mencapai COP hingga 15, sementara AC konvensional maksimal hanya 3-4 (Chen et al., 2021). Namun, aplikasi DEC di iklim lembab memiliki keterbatasan yaitu bertambahnya kelembaban udara yang sebelumnya sudah lembab. *Indirect evaporative cooler* (IEC) muncul sebagai solusi parsial dengan memisahkan saluran udara proses dan udara yang dilembapkan. Sebuah penelitian menunjukkan bahwa kemampuan IEC mendinginkan udara hingga mendekati suhu titik embun (*dew point*). Efektivitas IEC tetap menurun pada kelembaban sangat tinggi karena terbatasnya kemampuan pendinginan ketika *wet-bulb depression* kecil (Abdullah et al., 2023).

Kinerja sistem ECS sangat dipengaruhi oleh karakteristik cooling pad sebagai media kontak antara udara dan air. Karakteristik seperti jenis material, ketebalan, porositas, luas permukaan spesifik, serta kondisi operasi (kecepatan udara, temperatur, dan kelembaban udara masuk) berperan penting terhadap proses perpindahan panas dan massa sehingga menentukan efisiensi pendinginan (Rahman et al., 2023). Cooling pad berbahan selulosa masih menjadi media yang paling banyak digunakan karena memiliki efisiensi pendinginan yang tinggi. Namun, harganya relatif mahal sehingga berbagai penelitian telah mengembangkan material alternatif, seperti tempurung kelapa, batu apung, dan bata merah. Obando Vega et al. (2022) melaporkan bahwa cooling pad selulosa memiliki efisiensi pendinginan tertinggi sekitar 68,6%, sedangkan tempurung kelapa mampu mencapai sekitar 65,1%, sehingga berpotensi menjadi alternatif yang lebih ekonomis. Selain itu, penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketebalan *cooling pad* dan kelembaban udara masuk memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap performa evaporative cooling dibandingkan kecepatan udara (Obando Vega et al., 2022).

Selain jenis material, struktur internal media seperti ukuran pori dan kerapatan (*density*) juga memengaruhi kemampuan *cooling pad* dalam menyerap air, menyediakan luas permukaan penguapan, dan menghambat aliran udara (Tejero-González & Franco-Salas, 2021). Spons merupakan material berpori yang memiliki daya serap air tinggi, ringan, mudah diperoleh, serta berbiaya relatif rendah

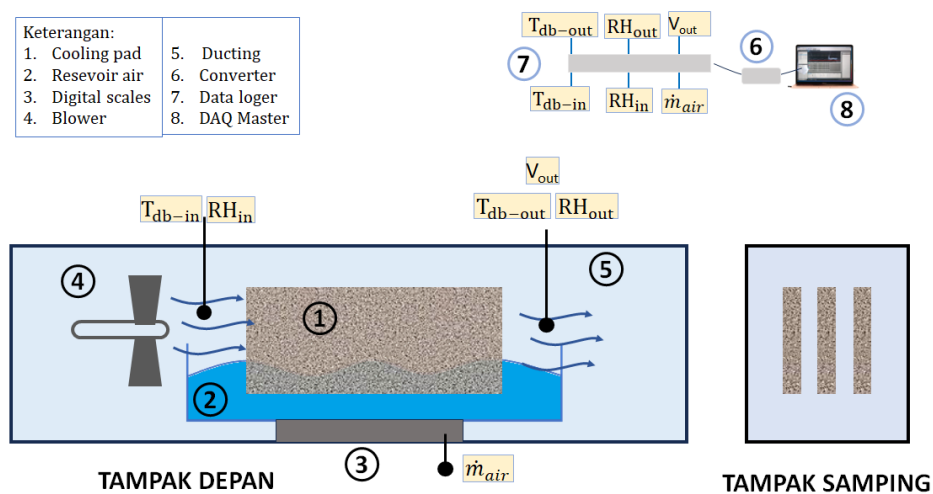
sehingga berpotensi digunakan sebagai cooling pad. Namun, kajian mengenai pengaruh kerapatan spons terhadap performa evaporative cooling masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kerapatan spons sebagai cooling pad terhadap performa evaporative cooling berdasarkan parameter penurunan temperatur udara, peningkatan kelembapan relatif, dan efisiensi pendinginan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan cooling pad spons sebagai alternatif media pendingin yang ekonomis dan efisien untuk aplikasi di daerah beriklim tropis.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis pengaruh variasi kerapatan spons (*Polyester-Polyurethane*) sebagai *cooling pad* terhadap kinerja sistem *evaporative cooling*. Pengujian dilakukan pada sebuah alat uji evaporative cooling skala laboratorium dengan sistem aliran udara paksa (*forced convection*). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kerapatan spons yang digunakan sebagai media pendingin dan kecepatan aliran udara yang melewati cooling pad, sedangkan variabel terikat meliputi penurunan temperatur udara, perubahan kelembapan relatif, laju penguapan air, dan efektivitas pendinginan.

2.1. Set-up Penelitian

Sistem pengujian terdiri atas sebuah kipas aksial sebagai penghasil aliran udara, *cooling pad* berbahan spons yang dialiri air secara kontinu, reservoir air, serta timbangan digital yang ditempatkan di bawah reservoir untuk mengukur perubahan massa air selama proses pengujian. *Cooling pad* dipasang 3 baris sejajar didalam *ducting* dengan jarak antara pad tersebut adalah 8 mm dengan ukuran *cooling pad* tinggi 28 cm lebar 20 cm dan tebal 5 cm (volume *cooling pad* 2800 cm³). Diagram skematik sistem pengujian ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Set up penelitian.

Udara lingkungan dihisap oleh kipas dan dialirkan menuju *cooling pad* yang terbasahi oleh air akibat proses absorpsi dari efek kapilaritas spons yang dicelupkan air. Ketika udara melewati pori-pori

spons, sebagian air menguap sehingga terjadi perpindahan panas sensibel dari udara ke air yang mengakibatkan temperatur udara menurun dan kelembapan relatif meningkat.

Penelitian ini menggunakan dua jenis variabel, yaitu variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas terdiri atas kerapatan cooling pad berbahan spons, yaitu $0,0215 \text{ g/cm}^3$, $0,0225 \text{ g/cm}^3$, dan $0,0233 \text{ g/cm}^3$, serta kecepatan aliran udara sebesar 4 m/s dan 5 m/s . Variasi kedua parameter tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja sistem *evaporative cooling*.

Variabel terikat yang diamati meliputi temperatur udara kering masuk (T_{db-in}), temperatur udara kering keluar (T_{db-out}), kelembapan relatif udara masuk (RH_{in}), kelembapan relatif udara keluar (RH_{out}), serta laju aliran massa air ($\dot{m}_{air}$) yang dihitung berdasarkan perubahan massa air pada reservoir selama proses pengujian. Data hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh variasi kerapatan *cooling pad* dan kecepatan aliran udara terhadap kinerja sistem *evaporative cooling*.

2.2. Prosedur Penelitian

Reservoir diisi air hingga bagian bawah *cooling pad* berbahan spons terendam. Pembasahan cooling pad dilakukan secara pasif melalui mekanisme absorpsi (kapilaritas) sehingga air terserap dari reservoir dan terdistribusi merata ke seluruh permukaan spons tanpa menggunakan pompa. Setelah *cooling pad* mencapai kondisi jenuh air, kipas dioperasikan untuk mengalirkan udara melewati *cooling pad*.

Selama pengujian, temperatur udara masuk (T_{db-in}) dan keluar (T_{db-out}), kelembapan relatif udara masuk (RH_{in}) dan keluar (RH_{out}), serta kecepatan udara (V_{udara}) diukur menggunakan instrumen yang telah dikalibrasi. Laju penguapan air ($\dot{m}_{air}$) ditentukan berdasarkan perubahan massa reservoir yang diukur menggunakan timbangan digital selama waktu pengujian. Setiap variasi kerapatan spons dan kecepatan udara diuji sebanyak tiga kali, kemudian data dianalisis untuk menentukan pengaruh kerapatan cooling pad terhadap kinerja sistem evaporative cooling.

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan pengaruh variasi densitas *cooling pad* dan kecepatan udara terhadap *cooling effect*, perubahan kelembapan relatif (ΔRH), dan *effectiveness evaporative cooling*. Hubungan antarparameter dianalisis berdasarkan prinsip perpindahan panas dan massa pada proses pendinginan evaporatif, kemudian diinterpretasikan dengan mempertimbangkan karakteristik media berpori, meliputi kapilaritas, tegangan permukaan, retensi air, permeabilitas, dan *pressure drop*. Analisis ini digunakan untuk menjelaskan pengaruh perubahan densitas *cooling pad* terhadap mekanisme evaporasi dan performa sistem secara keseluruhan.

Effectiveness evaporative cooling merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan sistem *evaporative cooling* dalam memanfaatkan energi sensibel udara untuk menguapkan air. Pada proses pendinginan evaporatif, udara yang mengalir melewati *cooling pad* melepaskan kalor sensibel sehingga temperatur udara menurun. Energi sensibel yang dilepaskan tersebut tidak hilang, tetapi digunakan sebagai energi laten untuk mengubah air dari fase cair menjadi uap. Oleh karena itu, efektivitas sistem dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara energi sensibel yang dilepas udara terhadap energi laten yang dibutuhkan untuk proses penguapan air. Secara matematis, *effectiveness evaporative cooling* dinyatakan sebagai (Incropera et al., 2007):

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_u C_p \Delta T}{\dot{m}_a h_{fg}}$$

dimana:

$\dot{m}_u$ = Laju aliran massa udara (kg/s)

ε = Effectiveness Evaporative Cooling

$\dot{m}_a$ = Laju aliran massa air (kg/s)

C_p = Kalor jenis udara pada tekanan konstan (J/kg°C)

ΔT = Penurunan temperatur udara melewati Cooling Pad (°C)

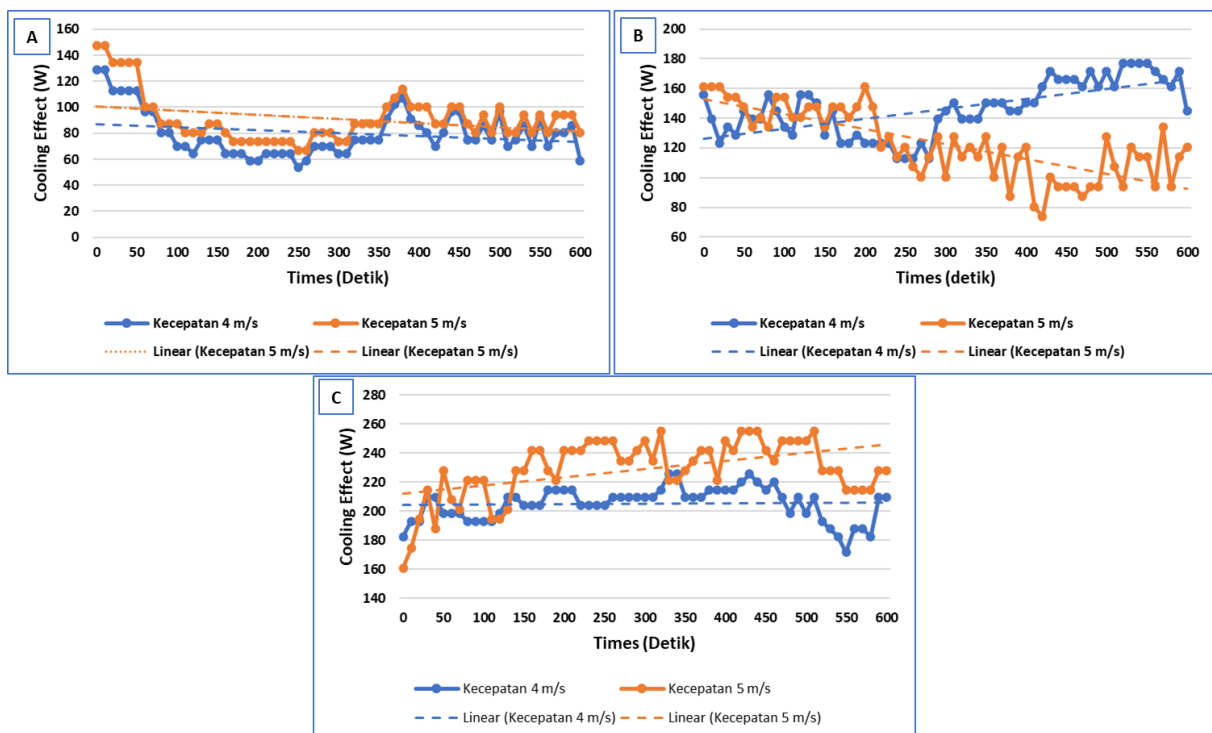
h_{fg} = Kalor laten penguapan air (J/kg)

3. Hasil dan pembahasan

Kinerja sistem *evaporative cooling* dianalisis berdasarkan penurunan temperatur udara, peningkatan kelembapan relatif, laju penguapan air, dan efektivitas pendinginan.

3.1. Cooling Effect Evaporative Cooling System

Gambar 3.1 menunjukkan perubahan *cooling effect* terhadap waktu pada tiga variasi densitas cooling pad, yaitu 0,0215 g/cm³ (Gambar 3.1-A), 0,0233 g/cm³ (Gambar 3.1-B), dan 0,0225 g/cm³ (Gambar 3.1-C), dengan variasi kecepatan udara 4 m/s dan 5 m/s. Secara umum, *cooling effect* mengalami fluktuasi selama pengujian akibat perubahan laju evaporasi air pada *cooling pad*. Fluktuasi tersebut dipengaruhi oleh kemampuan spons dalam menyerap dan mempertahankan air melalui mekanisme kapilaritas serta interaksi antara aliran udara dan permukaan spons.



Gambar 3.1 Perubahan *Cooling Effect* terhadap waktu; A: *Cooling Effect* untuk densitas Cooling Pad 0,0215 g/cm³; Gambar B: *Cooling Effect* untuk densitas Cooling Pad 0,0233 g/cm³; Gambar C: *Cooling Effect* untuk densitas Cooling Pad 0,025 g/cm³.

Pada densitas $0,0215 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.1-A), cooling effect cenderung menurun seiring waktu pada kedua variasi kecepatan udara. Densitas spons yang rendah menyebabkan struktur pori relatif besar sehingga air lebih mudah terserap pada awal pengujian, tetapi kemampuan spons dalam mempertahankan air menjadi lebih rendah. Akibatnya, kandungan air pada permukaan *cooling pad* berkurang lebih cepat karena proses evaporasi berlangsung lebih cepat daripada proses penyerapan air dari reservoir melalui gaya kapiler. Kondisi ini menyebabkan luas permukaan basah (*wet surface area*) semakin berkurang sehingga laju perpindahan panas dan massa menurun, yang ditunjukkan oleh penurunan cooling effect selama pengujian.

Pada densitas $0,0233 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.1-B), struktur spons menjadi lebih rapat sehingga ukuran pori lebih kecil. Kondisi ini meningkatkan gaya kapiler dan kemampuan media mempertahankan kandungan air, tetapi di sisi lain meningkatkan hambatan aliran udara (*pressure drop*). Peningkatan *pressure drop* menyebabkan aliran udara yang melewati cooling pad menjadi kurang optimal, terutama pada kecepatan udara yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pada kecepatan 4 m/s cooling effect cenderung meningkat karena waktu kontak udara dengan permukaan basah masih cukup lama, sedangkan pada kecepatan 5 m/s cooling effect justru menurun akibat berkurangnya waktu kontak udara dengan media dan meningkatnya hambatan aliran. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa peningkatan densitas atau ketebalan media pendingin dapat meningkatkan kemampuan retensi air, tetapi juga meningkatkan pressure drop sehingga tidak selalu menghasilkan performa pendinginan yang lebih baik (Obando Vega et al., 2022).

Hasil yang berbeda ditunjukkan oleh densitas $0,0225 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.1-C), yang menghasilkan *cooling effect* tertinggi pada kedua variasi kecepatan udara. Densitas ini diduga menghasilkan keseimbangan antara ukuran pori dan gaya kapiler. Pori spons masih cukup besar untuk memungkinkan udara mengalir dengan hambatan yang relatif rendah, namun cukup rapat untuk mempertahankan pasokan air secara kontinu melalui mekanisme kapilaritas. Kondisi tersebut menyebabkan permukaan *cooling pad* tetap basah selama proses pengujian sehingga luas bidang penguapan tetap terjaga. Akibatnya, perpindahan panas sensibel dari udara ke air berlangsung lebih efektif, sehingga menghasilkan *cooling effect* yang lebih tinggi dibandingkan kedua variasi densitas lainnya.

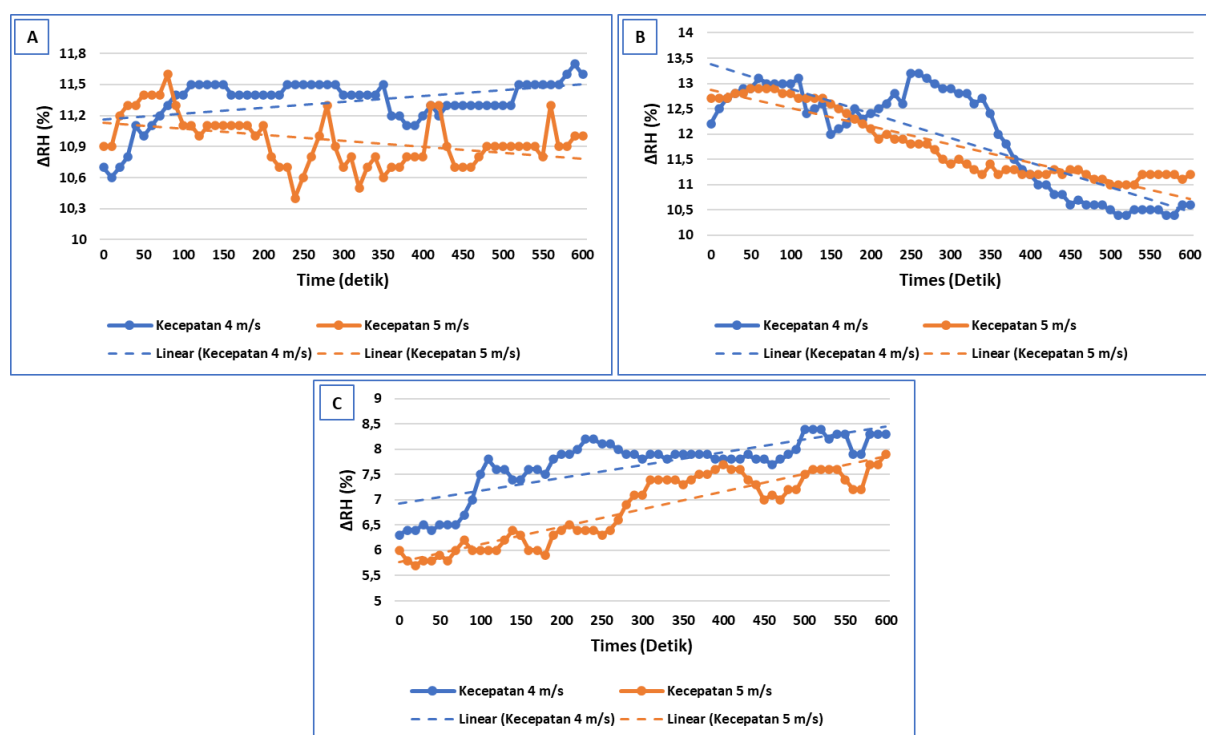
Selain dipengaruhi oleh densitas cooling pad, kecepatan udara juga berpengaruh terhadap besarnya *cooling effect*. Peningkatan kecepatan udara meningkatkan laju perpindahan massa uap air dari permukaan spons ke udara, tetapi sekaligus mengurangi waktu kontak udara dengan cooling pad. Oleh karena itu, pengaruh kecepatan udara sangat bergantung pada kemampuan spons mempertahankan distribusi air melalui gaya kapiler. Pada densitas optimum, mekanisme kapilaritas mampu menyuplai air ke permukaan spons secara kontinu sehingga peningkatan kecepatan udara masih dapat meningkatkan *cooling effect*. Sebaliknya, pada densitas yang terlalu rendah atau terlalu tinggi, peningkatan kecepatan udara tidak selalu menghasilkan peningkatan performa pendinginan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa densitas cooling pad berperan penting dalam menentukan karakteristik kapilaritas spons, distribusi air, dan luas permukaan basah yang tersedia untuk proses evaporasi. Densitas yang terlalu rendah menyebabkan kemampuan penyimpanan air menurun, sedangkan densitas yang terlalu tinggi meningkatkan hambatan aliran

udara. Oleh karena itu, densitas $0,0225 \text{ g/cm}^3$ memberikan kondisi paling optimum karena mampu menghasilkan keseimbangan antara kemampuan kapilaritas, retensi air, dan kemudahan aliran udara, sehingga menghasilkan cooling effect tertinggi pada sistem evaporative cooling.

3.2. Relative Humidity

Gambar 3.2 menunjukkan perubahan kelembaban relatif udara (ΔRH) pada sistem *evaporative cooling* menggunakan tiga variasi densitas *cooling pad*, yaitu $0,0215 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.2-A), $0,0225 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.2-C), dan $0,0233 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.2-B), dengan variasi kecepatan udara 4 m/s dan 5 m/s . Secara umum, perubahan kelembaban relatif dipengaruhi oleh jumlah air yang berhasil diuapkan dari *cooling pad* ke aliran udara. Semakin besar massa air yang mengalami evaporasi, semakin tinggi kandungan uap air di dalam udara sehingga kelembaban relatif meningkat. Besarnya proses evaporasi dipengaruhi oleh kemampuan *cooling pad* mempertahankan distribusi air melalui mekanisme kapilaritas, karakteristik pori material, serta kecepatan aliran udara yang melewati media. Oleh karena itu, perubahan ΔRH memiliki hubungan langsung dengan *cooling effect* yang telah dibahas pada Gambar 3.1, karena kedua parameter tersebut dipengaruhi oleh mekanisme perpindahan panas dan massa yang terjadi pada media pendingin.



Gambar 3.2 Perubahan Kelembaban Relatif terhadap waktu; A: Cooling Effect untuk densitas Cooling Pad $0,0215 \text{ g/cm}^3$; Gambar B: Cooling Effect untuk densitas Cooling Pad $0,0233 \text{ g/cm}^3$; Gambar C: Cooling Effect untuk densitas Cooling Pad $0,025 \text{ g/cm}^3$.

Pada densitas $0,0215 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.2-A), ΔRH relatif stabil pada kisaran 10,5-11,6% selama pengujian. Akan tetapi, pada Gambar 3.1-A terlihat bahwa *cooling effect* cenderung mengalami penurunan terhadap waktu. Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun udara masih menerima uap air dari *cooling pad*, jumlah air yang mampu diuapkan secara efektif semakin berkurang. Densitas spons yang rendah diduga memiliki ukuran pori yang lebih besar sehingga tekanan kapiler menjadi lebih kecil.

Akibatnya, kemampuan media untuk mempertahankan air (*water retention*) juga menurun. Selama proses pengujian, laju penguapan lebih besar dibandingkan laju suplai air dari reservoir melalui mekanisme kapilaritas sehingga sebagian permukaan spons mulai kehilangan lapisan air. Berkurangnya luas permukaan basah menyebabkan perpindahan panas sensibel dari udara ke air menurun sehingga *cooling effect* ikut mengalami penurunan, meskipun kenaikan kelembaban relatif masih relatif stabil.

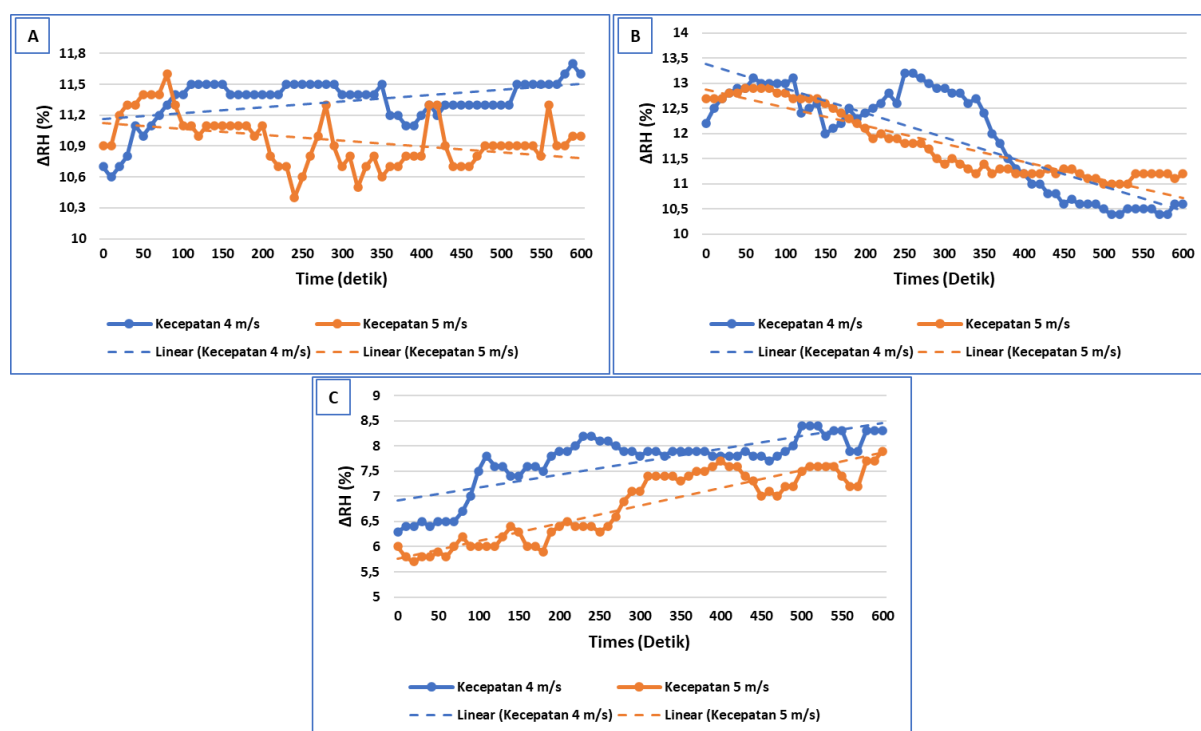
Pada densitas $0,0233 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.2-B), ΔRH menunjukkan kecenderungan menurun pada kedua variasi kecepatan udara, terutama setelah pertengahan waktu pengujian. Pola tersebut sejalan dengan hasil *cooling effect* pada Gambar 3.1-B, khususnya pada kecepatan udara 5 m/s yang juga mengalami penurunan. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan densitas spons tidak selalu meningkatkan performa *evaporative cooling*. Struktur spons yang lebih rapat meningkatkan gaya kapiler sehingga air dapat dipertahankan lebih lama di dalam media. Namun, ukuran pori yang lebih kecil juga meningkatkan hambatan aliran udara (*pressure drop*) dan menurunkan permeabilitas media. Pada kecepatan udara yang lebih tinggi, waktu kontak antara udara dan permukaan basah menjadi lebih singkat sehingga perpindahan panas dan massa berlangsung kurang optimal. Akibatnya, jumlah air yang menguap ke udara menurun, yang ditunjukkan oleh penurunan ΔRH dan diikuti oleh penurunan *cooling effect*. Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan kapilaritas yang tinggi harus diimbangi dengan permeabilitas media agar proses evaporasi berlangsung secara efektif.

Berbeda dengan kedua variasi tersebut, densitas $0,0225 \text{ g/cm}^3$ (Gambar 3.2-C) menunjukkan peningkatan ΔRH secara bertahap selama pengujian. Pola ini konsisten dengan hasil *cooling effect* pada Gambar 3.1-C yang juga memberikan nilai tertinggi dibandingkan dua variasi densitas lainnya. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar jumlah air yang diuapkan ke udara, semakin besar pula kalor sensibel udara yang dikonversi menjadi kalor laten penguapan. Akibatnya, temperatur udara mengalami penurunan yang lebih besar sehingga *cooling effect* meningkat. Densitas $0,0225 \text{ g/cm}^3$ diduga menghasilkan distribusi ukuran pori yang optimum, sehingga gaya kapiler cukup besar untuk mempertahankan pasokan air secara kontinu dari reservoir, namun masih memiliki permeabilitas yang baik sehingga hambatan aliran udara relatif rendah. Kondisi tersebut memungkinkan permukaan *cooling pad* tetap basah selama pengujian sehingga luas area evaporasi tetap terjaga dan perpindahan panas serta massa berlangsung secara berkelanjutan.

Pengaruh kecepatan udara juga terlihat pada ketiga variasi densitas. Peningkatan kecepatan udara meningkatkan koefisien perpindahan massa karena lapisan batas (*boundary layer*) di permukaan *cooling pad* menjadi lebih tipis. Akan tetapi, peningkatan kecepatan juga mengurangi waktu kontak udara dengan permukaan basah. Oleh karena itu, keberhasilan proses evaporasi sangat bergantung pada kemampuan kapilaritas media untuk terus menyuplai air ke permukaan. Pada densitas optimum, suplai air melalui gaya kapiler mampu mengimbangi laju evaporasi sehingga peningkatan kecepatan udara masih menghasilkan *cooling effect* dan ΔRH yang tinggi. Sebaliknya, apabila kemampuan kapilaritas terlalu rendah atau permeabilitas media terlalu kecil, peningkatan kecepatan udara justru mempercepat pengeringan permukaan (*surface drying*) sehingga proses evaporasi menjadi kurang efektif.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan kelembaban relatif memiliki hubungan yang erat dengan *cooling effect*. Peningkatan ΔRH mencerminkan semakin banyak air yang menguap ke aliran udara, sedangkan peningkatan *cooling effect* menunjukkan semakin besar kalor sensibel udara yang digunakan sebagai kalor laten penguapan. Densitas cooling pad sebesar $0,0225 \text{ g/cm}^3$ menghasilkan keseimbangan terbaik antara gaya kapiler, retensi air, permeabilitas media, dan waktu kontak udara sehingga mampu mempertahankan permukaan *cooling pad* tetap basah selama pengujian. Kondisi tersebut menghasilkan proses perpindahan panas dan massa yang paling efektif, yang ditunjukkan oleh nilai *cooling effect* tertinggi sekaligus peningkatan kelembaban relatif yang paling stabil.

3.3. Effectiveness Evaporative Cooling



Gambar 3.3 Effectiveness Evaporative Cooling terhadap waktu; A: Cooling Effect untuk densitas Cooling Pad $0,0215 \text{ g/cm}^3$; Gambar B: Cooling Effect untuk densitas Cooling Pad $0,0233 \text{ g/cm}^3$; Gambar C: Cooling Effect untuk densitas Cooling Pad $0,0225 \text{ g/cm}^3$.

Gambar 3.2 menunjukkan perubahan effectiveness evaporative cooling pada tiga variasi densitas cooling pad, yaitu $0,0215 \text{ g/cm}^3$ (**Gambar 3.3-A**), $0,0233 \text{ g/cm}^3$ (**Gambar 3.3-B**), dan $0,0225 \text{ g/cm}^3$ (**Gambar 3.3-C**), dengan variasi kecepatan udara 4 m/s dan 5 m/s. Pada penelitian ini, *effectiveness evaporative cooling* dihitung berdasarkan perbandingan antara energi sensibel yang dilepaskan udara dengan energi laten yang digunakan untuk menguapkan air. Oleh karena itu, parameter ini tidak hanya dipengaruhi oleh penurunan temperatur udara (*cooling effect*), tetapi juga oleh jumlah air yang berhasil diuapkan yang ditunjukkan melalui perubahan kelembaban relatif (ΔRH). Dengan demikian, nilai *effectiveness* merupakan representasi dari keseimbangan antara perpindahan panas dan perpindahan massa yang terjadi selama proses evaporasi.

Pada densitas 0,0215 g/cm³ (Gambar 3.3-A), *effectiveness evaporative cooling* relatif stabil pada kedua variasi kecepatan udara dengan kecenderungan sedikit meningkat pada kecepatan 4 m/s dan sedikit menurun pada kecepatan 5 m/s. Hasil ini sejalan dengan pembahasan sebelumnya, dimana *cooling effect* pada densitas ini mengalami penurunan secara bertahap meskipun ΔRH relatif stabil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa spons berdensitas rendah masih mampu menyuplai air ke permukaan melalui mekanisme kapilaritas, namun kemampuan mempertahankan air relatif terbatas. Ukuran pori yang lebih besar menghasilkan tekanan kapiler yang lebih kecil, sehingga air lebih mudah terlepas dari struktur spons dan permukaan media lebih cepat mengalami pengeringan. Akibatnya, sebagian energi sensibel udara tidak lagi dimanfaatkan secara optimal untuk proses evaporasi karena luas permukaan basah semakin berkurang. Hal ini menyebabkan *effectiveness* cenderung tidak mengalami peningkatan yang signifikan meskipun kelembaban udara masih bertambah.

Pada densitas 0,0233 g/cm³ (Gambar 3.3-B), *effectiveness evaporative cooling* menunjukkan kecenderungan menurun pada kedua variasi kecepatan udara. Pola tersebut konsisten dengan hasil *cooling effect* dan ΔRH yang juga mengalami penurunan pada densitas yang sama. Fenomena ini mengindikasikan bahwa peningkatan densitas spons memang meningkatkan gaya kapiler sehingga air dapat dipertahankan lebih lama di dalam media, tetapi ukuran pori yang semakin kecil menyebabkan permeabilitas media menurun. Hambatan aliran udara (*pressure drop*) menjadi lebih besar sehingga distribusi udara di dalam *cooling pad* tidak lagi merata. Selain itu, pada kecepatan udara 5 m/s waktu kontak antara udara dan permukaan basah menjadi lebih singkat sehingga proses perpindahan panas dan massa tidak berlangsung secara optimal. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan jumlah air yang mampu diuapkan, sehingga baik *cooling effect*, ΔRH , maupun *effectiveness evaporative cooling* mengalami penurunan secara bersamaan. Hasil ini menunjukkan bahwa gaya kapiler yang tinggi tidak selalu menghasilkan performa pendinginan yang lebih baik apabila diikuti dengan peningkatan hambatan aliran udara.

Berbeda dengan kedua variasi tersebut, densitas 0,0225 g/cm³ (Gambar 3.3-C) menghasilkan *effectiveness evaporative cooling* yang meningkat selama pengujian dan memberikan nilai tertinggi dibandingkan densitas lainnya. Hasil ini konsisten dengan pembahasan sebelumnya, dimana densitas 0,0225 g/cm³ juga menghasilkan *cooling effect* tertinggi serta peningkatan ΔRH yang paling stabil. Kesesuaian ketiga parameter tersebut menunjukkan bahwa energi sensibel yang dilepaskan udara dapat dimanfaatkan secara efektif untuk proses evaporasi. Densitas ini diduga menghasilkan struktur pori yang optimum sehingga tekanan kapiler cukup besar untuk mempertahankan suplai air secara kontinu dari reservoir menuju permukaan spons, tetapi masih memiliki permeabilitas yang baik sehingga aliran udara tidak mengalami hambatan yang berlebihan. Kondisi tersebut memungkinkan permukaan *cooling pad* tetap berada dalam keadaan basah (*fully wetted surface*) sepanjang pengujian sehingga luas area evaporasi dapat dipertahankan. Akibatnya, perpindahan panas sensibel dari udara ke air berlangsung secara kontinu dan menghasilkan peningkatan *effectiveness evaporative cooling*.

Pengaruh kecepatan udara juga terlihat pada seluruh variasi densitas. Secara teoritis, peningkatan kecepatan udara akan meningkatkan koefisien perpindahan panas dan perpindahan massa karena ketebalan lapisan batas (*boundary layer*) di permukaan media menjadi lebih tipis. Akan tetapi, peningkatan kecepatan udara juga mengurangi waktu kontak udara dengan *cooling pad*. Oleh

karena itu, keberhasilan proses evaporasi tidak hanya ditentukan oleh besarnya kecepatan udara, tetapi juga oleh kemampuan media mempertahankan suplai air melalui mekanisme kapilaritas. Pada densitas optimum, mekanisme kapilaritas mampu menjaga kontinuitas lapisan air pada permukaan spons sehingga peningkatan kecepatan udara masih dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan laju evaporasi. Sebaliknya, pada densitas yang terlalu rendah atau terlalu tinggi, peningkatan kecepatan udara justru mempercepat pengeringan permukaan (*surface drying*) atau memperbesar *pressure drop*, sehingga *effectiveness evaporative cooling* menurun.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan yang erat antara *cooling effect*, perubahan kelembaban relatif, dan *effectiveness evaporative cooling*. Densitas *cooling pad* sebesar 0,0225 g/cm³ menghasilkan kombinasi performa terbaik, yaitu *cooling effect* tertinggi, peningkatan ΔRH yang stabil, dan *effectiveness evaporative cooling* terbesar. Hal ini menunjukkan bahwa densitas tersebut memberikan keseimbangan optimum antara gaya kapiler, tegangan permukaan, retensi air, permeabilitas media, dan waktu kontak udara, sehingga proses perpindahan panas dan massa berlangsung secara paling efektif. Sebaliknya, densitas yang terlalu rendah menyebabkan retensi air menurun, sedangkan densitas yang terlalu tinggi meningkatkan hambatan aliran udara. Dengan demikian, optimasi densitas *cooling pad* menjadi faktor kunci dalam meningkatkan performa sistem *evaporative cooling* berbasis spons yang memanfaatkan mekanisme pembasahan secara kapiler tanpa bantuan pompa.

4. Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh densitas *cooling pad* berbahan spons dan kecepatan udara yang bekerja melalui mekanisme pembasahan secara kapilaritas tanpa pompa terhadap performa sistem *evaporative cooling*. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- a) Densitas *cooling pad* berpengaruh signifikan terhadap performa sistem *evaporative cooling*. Perubahan densitas memengaruhi karakteristik kapilaritas spons, kemampuan retensi air, permeabilitas media, serta hambatan aliran udara (*pressure drop*), sehingga berdampak langsung pada proses perpindahan panas dan massa selama evaporasi.
- b) *Cooling pad* dengan densitas 0,0225 g/cm³ menghasilkan performa terbaik dibandingkan densitas 0,0215 g/cm³ dan 0,0233 g/cm³. Densitas tersebut menghasilkan *cooling effect* tertinggi, peningkatan kelembaban relatif yang lebih stabil, serta nilai *effectiveness evaporative cooling* yang paling baik pada kedua variasi kecepatan udara. Hal ini menunjukkan bahwa densitas 0,0225 g/cm³ mampu memberikan keseimbangan antara kemampuan menyerap dan mempertahankan air melalui mekanisme kapilaritas dengan kelancaran aliran udara melewati media.
- c) Densitas 0,0215 g/cm³ menunjukkan kecenderungan penurunan *cooling effect* selama pengujian, meskipun perubahan kelembaban relatif relatif stabil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa media dengan densitas rendah memiliki kemampuan retensi air yang lebih kecil sehingga laju penguapan lebih cepat dibandingkan kemampuan suplai air melalui mekanisme kapilaritas. Akibatnya, sebagian

permukaan *cooling pad* mengalami pengeringan yang menyebabkan penurunan kemampuan pendinginan.

- d) Densitas $0,0233 \text{ g/cm}^3$ memiliki kemampuan mempertahankan air yang lebih baik, namun menghasilkan hambatan aliran udara yang lebih besar akibat struktur pori yang lebih rapat. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan efektivitas perpindahan panas dan massa, terutama pada kecepatan udara 5 m/s , sehingga *cooling effect*, perubahan kelembaban relatif, dan *effectiveness evaporative cooling* cenderung menurun selama pengujian.
- e) Kecepatan udara memengaruhi performa *evaporative cooling* melalui interaksi antara perpindahan panas, perpindahan massa, dan mekanisme kapilaritas. Peningkatan kecepatan udara meningkatkan koefisien perpindahan panas dan massa, namun juga mengurangi waktu kontak udara dengan permukaan *cooling pad*. Oleh karena itu, pengaruh kecepatan udara sangat bergantung pada kemampuan media mempertahankan distribusi air secara kontinu melalui gaya kapiler.
- f) Penelitian ini membuktikan bahwa mekanisme pembasahan pasif berbasis kapilaritas pada *cooling pad* spons dapat digunakan sebagai alternatif sistem distribusi air tanpa pompa pada *evaporative cooling*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan densitas spons yang tepat menjadi faktor kunci dalam mengoptimalkan keseimbangan antara tekanan kapiler, retensi air, permeabilitas media, dan karakteristik aliran udara. Temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan sistem *evaporative cooling* yang lebih sederhana, hemat energi, dan berpotensi diterapkan pada aplikasi pendinginan berdaya rendah di wilayah beriklim tropis.

5. Ucapan Terima Kasih

Para penulis berterima kasih kepada Dekan Fakultas Teknik, Kaprodi Mesin Otomotif, Kalab. Mesin Otomotif Universitas Muhammadiyah Magelang yang sudah memberikan bantuan dan suportnya berupa penggunaan laboratorium sehingga penelitian ini berlangsung dengan baik.

Nomenclature

T_{db-out}	: Temperatur bola kering (<i>dry-bulb temperature</i>) udara keluar <i>cooling pad</i>
T_{db-in}	: Temperatur bola kering (<i>dry-bulb temperature</i>) udara masuk <i>cooling pad</i>
RH_{in}	: Kelembaban relatif udara masuk <i>cooling pad</i>
RH_{out}	: Kelembaban relatif udara keluar <i>cooling pad</i>
$\dot{m}_{air}$	: Laju aliran massa udara yang melewati <i>cooling pad</i>
V_{udara}	: Kecepatan aliran udara yang melewati <i>cooling pad</i>
ΔRH	: Perubahan kelembaban relatif udara
$\dot{m}_u$	: Laju aliran massa udara
ε	: <i>Effectiveness</i>

$\dot{m}_a$	: Laju aliran massa air yang menguap selama proses evaporasi
C_p	: Kalor jenis udara pada tekanan konstan
ΔT	: Penurunan temperatur udara setelah melewati <i>cooling pad</i>
h_{fg}	: Kalor laten penguapan air

Referensi

- Abdullah, S., Zubir, M. N. B. M., Muhamad, M. R. Bin, Newaz, K. M. S., Öztop, H. F., Alam, M. S., & Shaikh, K. (2023). Technological development of evaporative cooling systems and its integration with air dehumidification processes: A review. *Energy and Buildings*, 283, 112805. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112805>
- Akimoto, K., Sano, F., Oda, J., Kanaboshi, H., & Nakano, Y. (2021). Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO2 capture and utilization and direct air capture. *Energy and Climate Change*, 2(August), 100057. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100057>
- Alani, W. K., Zheng, J., Fayad, M. A., & Lei, L. (2022). Enhancing the fuel saving and emissions reduction of light-duty vehicle by a new design of air conditioning worked by solar energy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 30(January), 101798. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101798>
- Chen, Q., Kum Ja, M., Burhan, M., Akhtar, F. H., Shahzad, M. W., Ybyraiymkul, D., & Ng, K. C. (2021). A hybrid indirect evaporative cooling-mechanical vapor compression process for energy-efficient air conditioning. *Energy Conversion and Management*, 248(September), 114798. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114798>
- EPA. (2021). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2022. In *U.S. Environmental Protection Agency*. EPA 430-R-24-004.
- Guo, Y., Bigazzi, A. Y., & Chen, X. (2025). Potential greenhouse gas emission reduction from active transportation: Comparing travel behavior patterns. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 145(May), 104835. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104835>
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. In *Fundamentals of Heat Transfer* (sixth). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-0957-5>
- Kurniawan, A. Y. W., Setiawan, A. A., & Budiman, A. (2020). The Impact of Electric Vehicle on Road Transportation in Indonesia: Energy Demand and CO2 Emission. *JPSE (Journal of Physical Science and Engineering)*, 5(2), 36–45. <https://doi.org/10.17977/um024v5i22020p036>
- Mebarki, B., Draoui, B., Allaoua, B., & Draoui, A. (2020). Road Transportation Industry Facing the Energy and Climate Challenges. *Renewable Energy - Resources, Challenges and Applications*, 1–26. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.92299>
- Meng, Z., Zhang, H., Lei, M., Qin, Y., & Qiu, J. (2018). Performance of low GWP R1234yf / R134a

- mixture as a replacement for R134a in automotive air conditioning systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 362–370.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.049>
- Obando Vega, F. A., Montoya Rios, A. P., Osorio Saraz, J. A., Damasceno, F. A., & Barbari, M. (2022). Comparative Analysis of the Cooling Efficiency in Tropical Climate of Three Alternative Materials for Evaporative Cooling Pads. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(1).
<https://doi.org/10.3390/app12010077>
- Purnomo, B. C., Setiawan, I. C., & Nugroho, H. A. (2020). Study on Cooling System for Parked Cars using Mini Air Cooler and Exhaust Fan. *Automotive Experiences*, 2(2), 41–46.
- Rahman, M. S., MacPherson, S., & Lefsrud, M. (2023). Experimental investigation of a novel evaporative cooling pad made of cement-free porous concrete. *Building and Environment*, 228(August 2022), 109867. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109867>
- Salih, S. J., Weli, R. B., & Lafta, H. D. (2023). Effect of a Parked Car Orientation on a Temperature Distribution and Cooling Load Calculation: Experimental Study. *Journal of Engineering*, 29(3), 98–116. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2023.03.07>
- Sampath, S. S., Kumar, S., & Kota Reddy, S. V. (2020). Influence of Different Desiccants, Flow Type and Packings on the Liquid Desiccant Dehumidification System: A Review. *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 28(1). <https://doi.org/10.1142/S2010132520300025>
- Sun, X., & Dong, J. (2022). Stress Response and Safe Driving Time of Bus Drivers in Hot Weather. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15).
<https://doi.org/10.3390/ijerph19159662>
- Tan, K. Y., Kek, H. Y., Tan, H., Othman, M. H. D., Wong, S. J., Woon, K. S., Tangamchit, P., Anityasari, M., Chiong, M. C., & Wong, K. Y. (2025). Optimising human thermal comfort in recreational vehicles for ASEAN climates through mechanical ventilation strategies. *Thermal Science and Engineering Progress*, 66(August), 104035. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2025.104035>
- Tejero-González, A., & Franco-Salas, A. (2021). Optimal operation of evaporative cooling pads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151(September).
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111632>
- Tong, Z., & Liu, H. (2020). Modeling in-vehicle VOCs distribution from cabin interior surfaces under solar radiation. *Sustainability (Switzerland)*, 12(14). <https://doi.org/10.3390/su12145526>
- Zahari, T. N., & McLellan, B. C. (2024). Sustainability of Indonesia's transportation sector energy and resources demand under the low carbon transition strategies. *Energy*, 311(October), 133385.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133385>
-