Tugas Akhir

PENAMBAHAN NANO SILICA OXIDE UNTUK MENINGKATKAN PERFORMA EVAPORATIVE COOLING SYSTEM

Jenis Tugas Akhir:
Penelitian

Disusun Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Ahli Madya (A.Md)

Disusun oleh:
Muhammad Ibnu Mubarok
NIM. 22.0503.0017
Dwi Ramadhani
NIM. 22.0503.0019

Pembimbing:
Bagiyo Condro Purnomo S.T, M.eng
NIDN. 0617017605
Dr. Budi Waluyo S.T, M.T
NIDN. 0627057701

Program Studi Mesin Otomotif
Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Magelang
Tahun 2025

Bab 1 Pendahuluan

1.1 Latar Belakang Masalah

Sejak tahun 1995, permintaan energi global meningkat pesat dari 8,588 miliar ton dan menjadi 13,147 miliar ton. Konsumsi energi global di perkirakan meningkat sebesar 50% antara tahun 2005 dan 2030. Selain itu, negara-negara berkembang seperti Tiongkok dan India diperkirakan akan menjadi konsumen energi yang besar di masa depan (Septa and Hoirul, 2022). Konsumsi energi diperkirakan 80% energi primer berasal dari bahan bakar fosil (Nugroho, 2017). Oleh sebab itu, konsumsi energi mempengaruhi tingkat emisi karbon, dan keamanan energi secara global.

Konsumsi bahan bakar fosil menyebabkan emisi gas rumah kaca dan berkontribusi terhadap pemanasan global. Sistem pendingin konvensional yang masih menggunakan kompresor memberikan kontributor utama terhadap peningkatan penipisan ozon akhir-akhir ini (Aziz *et al.*, 2017). Hal itu karena penggunaan kompresor sebagai penggerak dalam sistem pendingin memerlukan energi yang cukup besar. Sementara itu, pendingin konvensional masih menggunakan refrigran sebagai fluida kerja, sehingga berpengaruh terhadap lingkungan (Jauziyah *et al.*, 2025). Penggunaan refrigran yang merusak ozon seperti R-22, MC-22 dapat berdampak terhadap kerusakan lingkungan (Sabatiana and Putra, 2017).

Untuk mengatasi dua masalah utama tersebut banyak peneliti yang mengkaji peningkatan performa pendingin atau penggunaan refrigeran yang ramah lingkungan. Priangkoso dan kawan-kawan melakukan penelitian dengan membandingan nilai COP pada AC split menggunakan Refrigeran R- 22, R-32 dan R-410A (Priangkoso *et al.*, 2018). Penggunaan MC-22 sebagai refrigeran ramah lingkungan dan mempunyai COP lebih baik dibanding refrigeran R-22 (Sabatiana and Putra, 2017). Optimalisasi penggunaan refrigeran musicool untuk meningkatkan performa sistem refrigerasi kompresi uap dengan variabel katup ekspansi (Purnomo and Waluyo, 2015). Penelitian tentang penggunaan hidrokarbon sebagai refrigeran yang ramah lingkungan dan dicampur dengan CO_2 sebagai inhibitor juga dikemukakan oleh (Purnomo and Setiyo, 2017).

Namun demikian, penelitian sistem refrigerasi diatas masih menggunakan kompresor sebagai penggerak, sehingga masih memerlukan energi yang besar. *System refrigerasi evaporative* (ECS) memberikan potensi energi rendah dan ramah lingkungan

(Mahmudi and Jinan, 2025). ECS menawarkan penggunaan listrik yang lebih rendah, sehingga akan mengurangi kerusakan lingkungan dan memberikan jumlah pendinginan yang cukup (Dinapradipta, 2020). Pendinginan evaporatif baik digunakan untuk daerah yang kering (Sitopu and Yunianto, 2015), dan juga sangat cocok untuk pendinginan buah dan sayur karena udara yang keluar cukup lembab (Prasetyaningrum, 2017)(Syarif *et al.*, 2021).

Penelitian tentang sistem *evaporative cooling* memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan sistem pendinginan (Soewono *et al.*, 2023), akan tetapi ada beberapa tantangan utama ECS yaitu efektivitas sistem sangat tergantung pada kelembapan dan suhu lingkungan (Yunianto and Isnandi, 2017), peneliti perlu mengembangkan sistem yang bisa bekerja secara optimal di berbagai kondisi iklim (Nusa, 2015), media pendingin (pad atau bahan tempat air menguap) berperan penting dalam efisiensi sistem (Aziza, Herwanto and Mainil, 2019), serta menggabungkan *evaporative cooling* dengan sistem pendingin konvensional untuk efisiensi maksimal (Dai *et al.*, 2021). Selain itu, efektifitas ECS dipengaruhi juga oleh distribusikan temperatur dan kecepatan (Sandyawan and Putra, 2020).

Disamping pengaruh distribusikan temperatur dan kecepatan ECS juga dipengaruhi oleh variabel suhu dan kelembapan udara yang masuk. Dengan mengontrol suhu dan kelembaban dapat meningkatkan efektifitas sistem (Sitopu and Yunianto, 2015). Selain itu, ECS dapat digunakan sebagai pendukung sistem yang lain misalkan seperti sistem pendingin kompresi uap (MVC). Penambahan ECS tersebut dapat meningkatkan COP sistem dibanding dengan refrigerasi konvensional mandiri (Chen *et al.*, 2021).

Selain itu, penggunaan *cooling pad* berbahan hidrofilik atau menyerap air sangat berguna tapi memiliki sedikit kekurangan yaitu kurangnya efektifitas pelepasan air, sehingga dibutuhkan *cooling pad* yang dapat menyerap air serta melepaskan air atau hidrofobik sehingga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi *system evaporative cooling*. *Nano silica oxide* merupakan mineral oksida yang banyak di manfaatkan sebagai adsorben untuk mengurangi polutan yang bersifat mudah bereaksi, anti air, bersih, ekonomis, dan ramah lingkungan (Shofiyani *et al.*, 2019). Penambahan *nano silica oxide* juga dapat menambah peningkatan dalam proses penguapan sehingga proses pendinginan dapat lebih meningkat (Kano, Kim and Fujii, 2017). Dalam proses *evaporative cooling* ini di butuhkan penguapan serta proses penyerapan air yang lebih cepat

sehingga dapat meningkatkan efektifitas pendinginan yang lebih maksimal. Oleh karena itu, bahan ini selain mudah di dapat juga memberikan efek yang lebih dalam proses penguapan sehingga proses pendinginan dapat tercapai secara maksimal.

1.2 Perumusan Masalah

Dengan latar belakang di atas maka perumusan masalah dalam peneliti ini adalah bagaimana performa sistem refrigerasi *evaporative cooling* (ECS) dengan penambahan *nano silika oxide* pada *cooling pad.*

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari peneliti ini adalah untuk mengetahui performa sistem refrigerasi *evaporative cooling* (ECS) dengan penambahan *nano silika oxide* pada *cooling pad.*

1.4 Manfaat

Manfaat dari peneliti ini adalah sebagai berikut:

1. Mengurangi energi yang dibutuhkan dengan penggunaan ECS karena tidak menggunakan kompresor.
2. Mengurangi dampak lingkungan karena tidak menggunakan refrigeran yang berbahaya

Bab 2 Tinjauan Literatur

2.1 Penelitian Relevan

Sistem refrigerasi konvensional seperti sistem kompresi uap menggunakan fluida kerja kurang ramah lingkungan karena masih memiliki nilai GWP *(Global Warming Potential)* ataupun ODP *(Ozon Depletion Potential)* yang tinggi (Yunianto and Isnandi, 2017). Selain itu, sistem konvensional juga memerlukan energi yang cukup besar untuk mensirkulasikan refrigeran dengan menggunakan kompresor. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem refrigerasi yang dapat mengurangi kebutuhan energi dan dampak lingkungan. Teknologi *evaporative cooling* sangat cocok untuk mengatasi masalah tersebut penggunaan energi yang besar dan dampak loingkungan. ECS (*Evaporative Cooling System*) sistem pendingin udara yang bekerja dengan cara menggunakan penguapan air untuk menurunkan suhu udara. Prinsip dasarnya adalah ketika air menguap, ia menyerap panas dari udara sekitarnya, sehingga membuat udara menjadi lebih dingin (Hardanto and Yunianto, 2015).

Sistem *evaporative cooling* memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan sistem pendinginan (Soewono *et al.*, 2023), akan tetapi ada beberapa tantangan utama ECS yaitu efektivitas sistem sangat tergantung pada kelembapan dan suhu lingkungan (Yunianto and Isnandi, 2017), perlu mengembangkan sistem yang bisa bekerja secara optimal di berbagai kondisi iklim (Nusa, 2015), media pendingin (pad atau bahan tempat air menguap) berperan penting dalam efisiensi sistem (Aziza, Herwanto and Mainil, 2019), serta integrasi *evaporative cooling* dengan sistem pendingin konvensional untuk efisiensi maksimal (Dai *et al.*, 2021).

Sementara itu, penggunaan *cooling pad* pada ECS sangat mempengaruhi performa sistem. Pengembangan ECS modern, dengan memanfaatkan berbagai jenis bantalan pendingin seperti serat alami, serat kelapa, dan pelepah pisang, digunakan dalam penelitian bantalan pendingin evaporatif. Bantalan pendingin ini dipilih karena ramah lingkungan, murah, dan mudah ditemukan. Hasil penelitian menunjukan penggunaan serat batang pisang dengan jarak pemasangan 8 mm memiliki kelembaban relatif yang ideal (Mahmudi and Jinan, 2025). Teknologi ini bekerja efisien digunakan di iklim panas-lembab (Gao *et al.*, 2015).

Beberapa jenis cooling pad yang digunakan untuk pengembangan evaporative cooling bersifat hidrofilik diantaranya spon, serabut kelapa, karung goni, pelepah

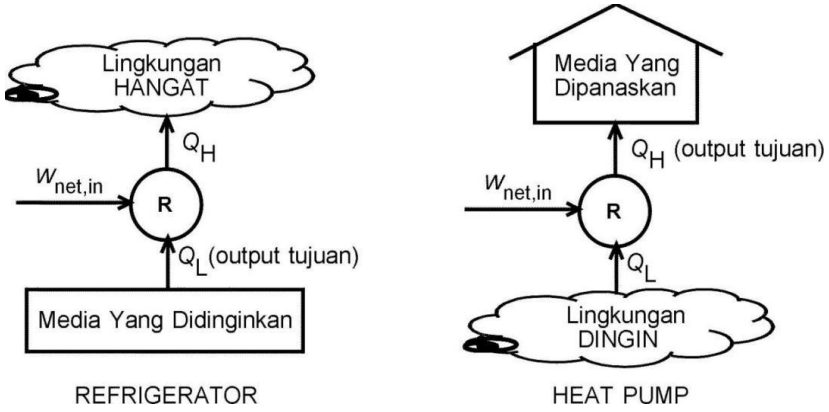
pisang, sumbu kompor, serta bahan berpori seperti zeolit alam. Bahan-bahan tersebut digunakan karena sifat permeabilitas dan porositasnya dapat meningkatkan efek pendinginan secara efektif (Kadek Dwiana *et al.*, 2022) (Sofia and Sonawan, 2024) (Rachman and Yunianto, 2014). Penggunaan *cooling pad* berbahan hidrofilik memiliki efektifitas pelepasan air yang kurang baik. Maka dari itu, sehingga *cooling pad* yang dibutuhkan harus dapat menyerap air serta melepaskan air atau hidrofobik sehingga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi *system evaporative cooling*. Untuk mendapatkan bahan seperti itu digunakan *Nano silica oxide,* sebagai bahan tambahan untuk mendapatkan efek hidrofobik. *Nano silica oxide* merupakan mineral oksida yang banyak di manfaatkan sebagai adsorben untuk anti air (Shofiyani *et al.*, 2019).

Penelitian lain, dengan penambahan *nano silica oxide* dapat meningkatkan penguapan mengakibatkan proses pendinginan meningkat (Kano, Kim and Fujii, 2017). *Cooling pad* yang awalnya berbahan menyerap air (hidrofilik) tapi belum bisa melepaskan air (hidropobik) menyebabkan masalah dalam proses penguapan sehingga penambahan *nano silica oxide* pada *cooling pad* menciptakan *cooling pad yang* dapat menyerap serta melepaskan air secara maksimal sehingga efektifitas sistem evaporasi dapat lebih maksimal. Dalam proses *evaporative cooling* ini di butuhkan penguapan serta proses penyerapan air yang lebih cepat sehingga dapat meningkatkan efektifitas pendinginan yang lebih maksimal (Siregar *et al.*, 2021). Oleh karena itu, bahan ini selain mudah di dapat juga memberikan efek yang lebih dalam proses penguapan sehingga proses dapat tercapai secara maksimal.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Siklus Refrigerasi

Siklus kerja yang disebut "siklus pendinginan" adalah siklus kerja yang menggunakan kerja di luar sistem untuk memindahkan kalor dari media bertemperatur rendah ke media bertemperatur tinggi. Secara prinsip, siklus ini adalah kebalikan dari siklus mesin panas. Alat dengan siklus pengering dibagi menjadi dua berdasarkan tujuannya. Yang pertama adalah pendingin, yang berfungsi untuk mendinginkan media, dan yang kedua adalah pemanas, yang berfungsi untuk memanaskan media. Komponen-komponen ini digambarkan pada gambar di bawah.



Gambar 2. 1 Siklus Refrigerasi

Siklus refrigerasi dapat diklasifikasikan sebagai berikut,

1. Siklus kompresi uap (*vapor compression refrigeration cycle*) dimana refrigeran mengalami proses penguapan dan kondensasi, dan dikompresi dalam fasa uap.
2. Siklus gas (*gas refrigeration cycle*), dimana refrigeran tetap dalam kondisi gas.
3. Siklus bertingkat (*cascade refrigeration cycle*), dimana merupakan gabungan lebih dari satu siklus refrigerasi.
4. Siklus absorpsi (*absorption refrigeration cylce*), dimana refrigeran dilarutkan dalam sebuah cairan sebelum dikompresi.
5. Siklus termoelektrik (*thermoelectric refrigeration cycle*), dimana proses refrigerasi dihasilkan dari mengalirkan arus listrik melalui 2 buah material yang berbeda.

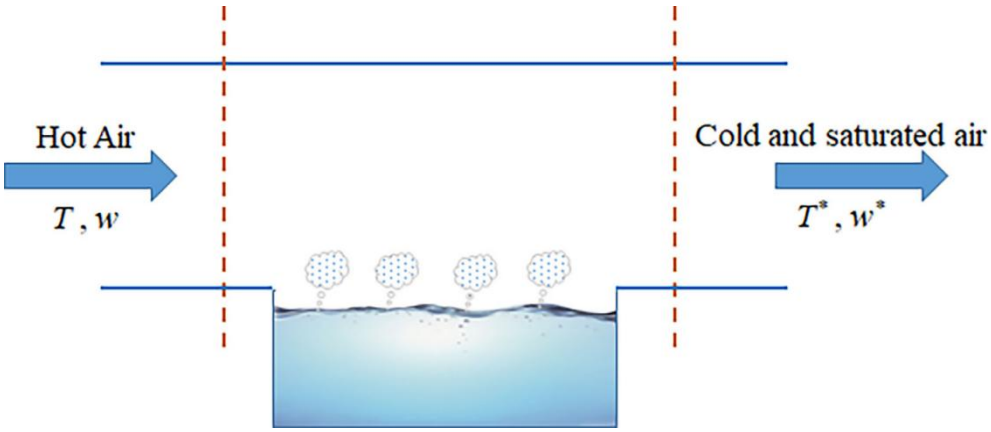
Kinerja suatu *refrigerator* dan *heat pump* dinilai dari besarnya koefisien kinerja (*coefficient of performance* COP) yang didefinisikan sebagai berikut,

$$\mathrm{COP_R} = \frac{\text{output tujuan}}{\text{kerja yang dibutuhkan}} = \frac{\text{efek pendinginan}}{\text{input kerja}} = \frac{Q_L}{W_{net,in}}$$
$$\mathrm{COP_{HP}} = \frac{\text{output tujuan}}{\text{kerja yang dibutuhkan}} = \frac{\text{efek pemanasan}}{\text{input kerja}} = \frac{Q_H}{W_{net,in}} \qquad (2.\ 1)$$

Harga $\mathrm{COP_R}$ dan $\mathrm{COP_{HP}}$ umumnya lebih besar dari satu dimana $\mathrm{COP_{HP}} = \mathrm{COP_R} + 1$ untuk suatu rentang tekanan kerja yang sama.

2.2.2 Evaporative Cooling

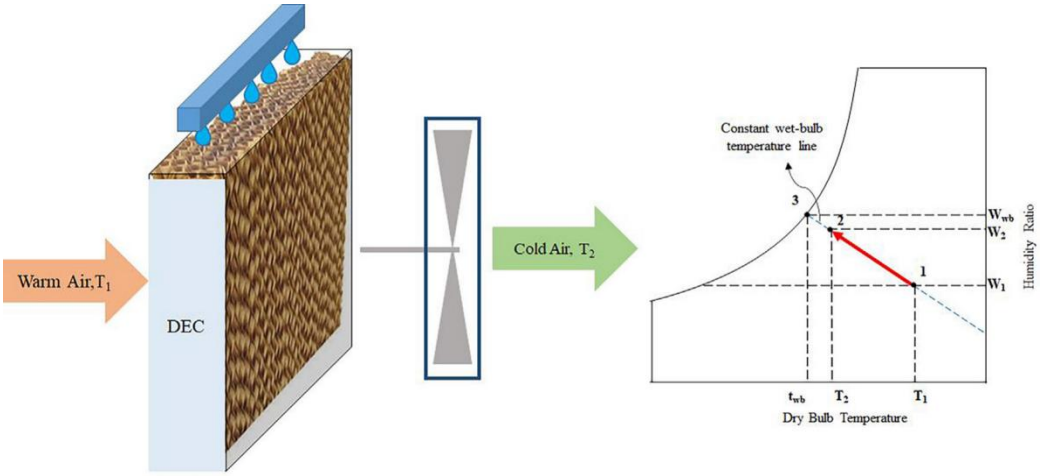
Proses *Evaporative cooling* adalah proses pendinginan menggunakan penguapan air untuk menurunkan suhu udara dengan ramah lingkungan dan energi yang lebih sedikit dengan menggunakan media pendingin. Dalam proses pendinginan, ECS sangat berpengaruh terhadap penggunaan efisiensi energi dibanding refrigerasi konversi uap. Berikut merupakan gambar konsep adiabatik dalam *evaporative cooling.*



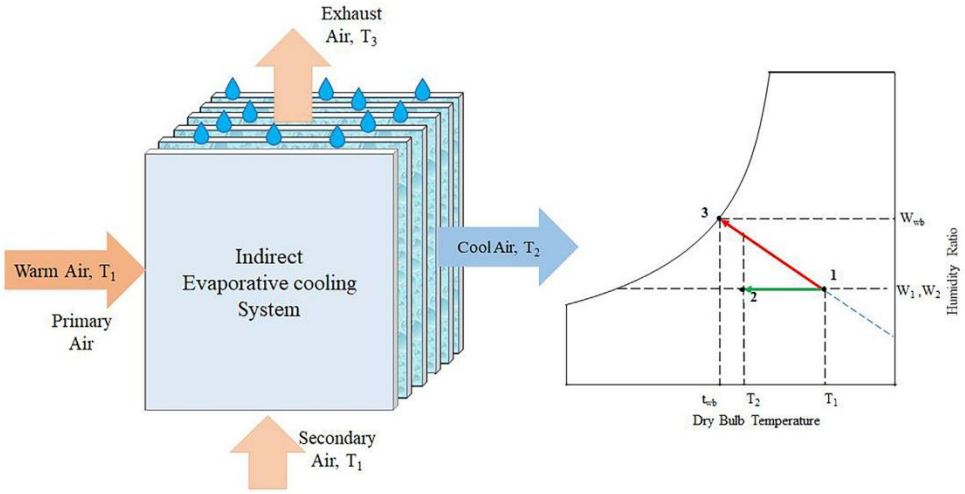
Gambar 2. 2 Proses adiabatik pada sistem evaporative cooling

Dari gambar tersebut proses penguapan terjadi ketika udara berinteraksi dengan air saat bersentuhan dengan permukaan air. Panas dari udara sekitar dipindahkan ke antarmuka air, menghasilkan panas laten yang diperlukan agar penguapan terwujud. Hal ini akan mengakibatkan penurunan suhu udara saat mendekati kondisi jenuh. Dalam sistem pendinginan evaporatif yang umum, udara panas luar ruangan dan air melewati perangkat pendingin evaporatif secara bersamaan untuk mendinginkan udara melalui proses perpindahan panas dan massa.

Berdasarkan desain interaksi aliran udara dan air, sistem pendinginan evaporatif telah dikategorikan sebagai Pendinginan Evaporatif Langsung (DEC), Pendinginan Evaporatif Tidak Langsung (IEC), gabungan DEC/IEC, dan Pendinginan Evaporatif Titik Embun (DPEC). Konfigurasi pendinginan evaporatif ini sebagian besar bergantung pada pengaturan saluran penukar panas seperti yang dijelaskan dalam gambar berikut.



Gambar 2. 3 Sistem direct evaporation



Gambar 2. 4 Sistem indirect evaporative

Penggunaan *Cooling pad* pada kedua sistem sangat berpengaruh terhadap kedua proses tersebut. Banyak penelitian tentang *cooling pad* yang menjelaskan bahwa kebanyakan *cooling pad* bersifat hidrofilik (menyerap air), jika *cooling pad* menyerap air maka proses evaporatif tidak berjalan secara efisien maka perlu *cooling pad* berbahan hidrofobik (menolak air). Oleh karena itu, *cooling pad* digunakan untuk mendinginkan udara sehingga proses pendinginan diharapkan dapat tercapai lebih cepat dan tingkat kelembapan udara yang lebih tinggi dengan penambahan *nano silica oxide*. Dengan menggunakan *nano silica oxide* diharapkan dapat mengatasi masalah energi serta masalah lingkungan yang akan menjadi fokus utama dalam pembahasan ini, dengan penguapan yang lebih cepat maka proses ini dapat berjalan secara maksimal.

2.2.3 Nano Silica Oxide

Nano silica oxide adalah material berbasis silikon dioksida (SiO_2) yang memiliki ukuran partikel sangat kecil (nano) dan permukaan yang sangat luas, sehingga memiliki sifat fisik dan kimia yang unik dibandingkan bentuk silika biasa. Nano silica oxide memiliki karakteristik fisik dan kimia unik dibandingkan silika dalam ukuran mikro atau bulk. Nano silica oxide memiliki luas permukaan yang besar, ketahanan panas yang baik, dan bersifat melepas air (Ningrum, 2018) (Nursari *et al.*, 2025). Silika adalah senyawa kimia dengan rumus molekul SiO_2 *(silicon dioxside)*, yang dapat diperoleh dari silika mineral, nabati, dan sintetis (Ningrum, 2018). Berikut ini beberapa sifat fisika dari silika dapat dilihat Table 1 pada.

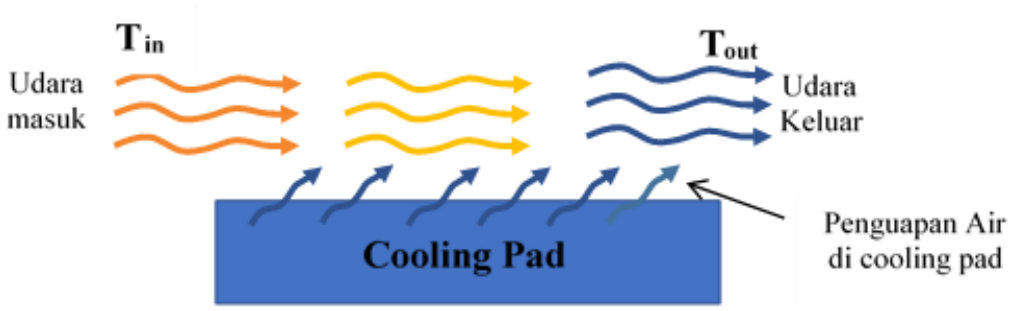
Table 1 Sifat fisika nano silika oxide

Nama IUPAC	**Nano Silikon Dioksida**
Rumus Molekul	SiO_2
Ukuran	1-100 nm(typical nanopartikel)
Warna	Putih (bubuk)
Titik leleh (°C)	1723°C
Titik didih (°C)	2230°C
Luas Permukaan Spesifik	150-289 m^2/g
Kekasaran	Sekitar 4.5(sekala Mohs)
pH	5-7
Kandungan	99,99%
Konduktivitas termal	Sekitar 4 W/(m.K)
Sifat Kimia-Fisika	Luas permukaan besar, ketahanan panas baik, bersifat hidropobik
Entropi molar standar(S^0)	42 $J.mol^{-1}.K^{-1}$
Entalpi pembentukan standar($\Delta_f H^0$)	-911 $KJ.mol^{-1}$

Nano silica oxide memiliki ukuran partikel sekitar 1-100 nm, sering berbentuk sferis, namun cenderung membentuk aglomerat (penggumpalan partikel kecil menjadi kelompok lebih besar) dengan ukuran aglomerat bisa mencapai mikrometer (Ningrum, 2018). Sifat yang dimiliki nano silica oxide memiliki luas permukaan besar, porositas tinggi, dan stabilitas termal yang baik (Nursari *et al.*, 2025). Sehingga dengan penambahan nano silica oxide pada cooling pad di harapkan dapat meningkatkan efektifitas sistem evaporative cooling.

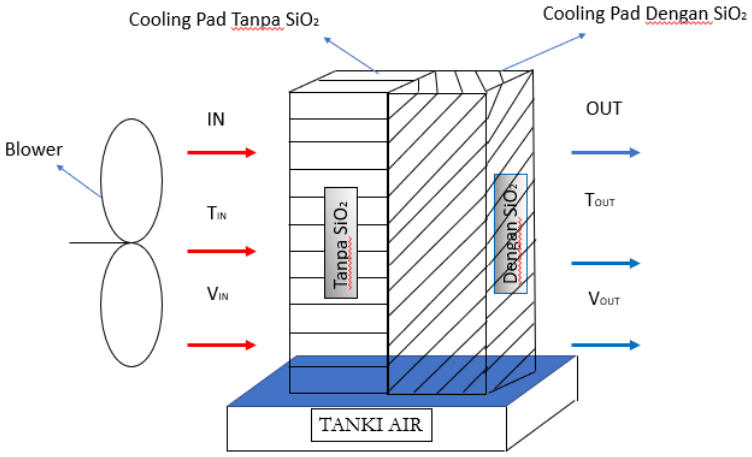
2.3 Kerangka Konsep

Gambar 2.5 menjelaskan tentang ECS, yaitu proses penurunan suhu udara yang dilewatkan media basah melalui penguapan air. Energi dibutuhkan untuk proses penguapan air pada permukaan basah (*cooling pad*) dengan mengambil energi dari udara yang dihembuskan pada *cooling pad*, sehingga suhu udara akan menurunkan.



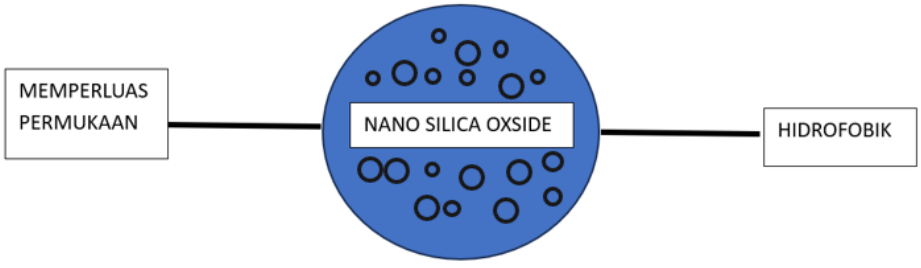
Gambar 2. 5 Konsep Evaporative Cooling

Pada teknologi *evaporative cooling*, keberhasilan sistem sangat dipengaruhi oleh *cooling pad* sebagai media utama tempat berlangsungnya proses evaporasi. *Cooling pad* dalam penelitian ini terbuat dari bahan serat kayu berupa kertas yang memiliki daya serap air tinggi namun kemampuan untuk menguapkan kurang besar. Untuk meningkatkan kinerja pendinginan tersebut, dilakukan modifikasi cooling pad dengan *nano silica oxide*. Konsep modifikasi *cooling pad* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Konsep Dasar *Evaporative Cooling*

Penambahan *nano silica oxide* berperan penting dalam memperbesar luas area aktif sekaligus meningkatkan sifat hidrofilik material serta luas permukaan yang besar. Dengan sifat ini, air dapat terserap dan terdistribusi lebih merata di dalam pori-pori *cooling pad*, sehingga proses penguapan berlangsung lebih optimal. Konsep perubahan sifat cooling pad dari hidrofilik menjadi hidrofobik dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 *Nano silica oxide* bersifat hidrofobik

Penambahan *nano silica oxide* dapat meningkatkan luas permukaan pada *cooling pad* serta mengkombinasikan sifat pad yang awalnya hanya menyerap air kini juga dapat melepas air secara signifikan karena sifat dari nano silica yaitu hidrofobik atau melepas air.

Bab 3 Metode Penelitian

3.1 Jenis Penelitian

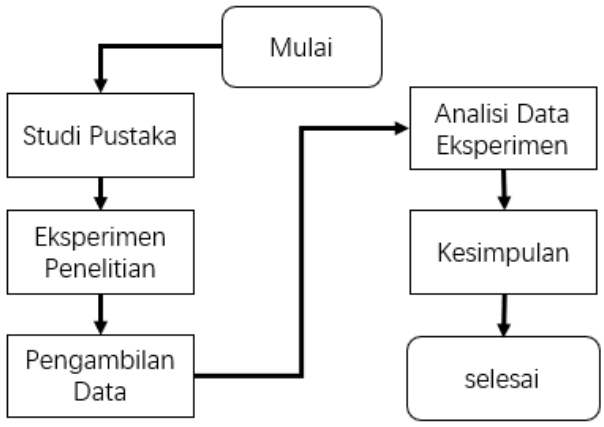
Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimen, yaitu penelitian ilmiah di mana variabel tertentu dikendalikan dan diubah untuk melihat bagaimana variabel lain berpengaruh. Dalam eksperimen ini menguji performa ECS dengan memvariasikan jarak antar *cooling pad* dan sudutnya serta penggunaan *nano silica oxide*, untuk mengetahui performanya.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian direncanakan akan dilakukan selama 6 bulan, mulai Maret hingga Agustus 2025. Penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Magelang karena memiliki fasilitas dan peralatan yang cukup untuk mendukung penelitian eksperimen.

3.3 Flowchart Penelitian

Flowchart penelitian yang digunakan kegiatan ini berfungsi untuk menggambarkan tahap awal proses penelitian sampai akhir penelitian yang disajikan pada gambar berikut.



Gambar 3. 1 Flowchart penelitian

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini, penggunaan alat-alat pengukuran yang akurat adalah hal terpenting untuk mengumpulkan data yang valid. Oleh karena itu dalam penelitian ini harus menggunakan alat-alat khusus yang berperan penting dalam pengukuran seperti suhu, kelembapan, dan kecepatan aliran udara. Berikut disajikan detail dan spesifikasi

alat tersebut untuk memberikan pemahaman yang lebih detail dalam proses pengumpulan data.

Table 2 Alat dan Bahan Penelitian

No	Alat dan Bahan	Deskripsi	Spesifikasi
1.	*Thermocouple*	Untuk mengukur suhu	Rentang suhu: -10°C hingga 50°C, Akurasi ≠0.5°C(Pt100)
2.	Anemometer	Alat untuk mrngukur kecepatan aliran udara	Rentang kecepatan: 0,1 m/s hingga 30 m/s, Akurasi : ≠0.3 m/s
3.	*Hygrometer*	Digunakan untuk mengukur kelembapan udara.	Rentang kelembapan: 0% hingga 100% RH, Akurasi: ±2% RH
4.	*Blower*	Menghasilkan aliran udara dengan kecepatan yang dapat diatur.	Kecepatan udara yang dapat diatur, Daya: 200 watt, Kapasitas: 500 CFM
5.	*Power Suplay*	Perangkat atau sistem yang menyediakan energi Listrik ke perangkat elektronik	12V DC 20A
6.	*Stopwatch*	Digunakan untuk mengukur waktu eksperimen	Akurasi: ±0.01 detik, Fitur: Tampilan digital, fungsi split time
7.	Water	Media pendingin dalam sistem	Air sumur
8.	*Cooling pad*	Pad pendingin berbahan serat alami	Cooling pad punos Uk. 150×60×15
9.	*Nano Silica oxide*	Penambahan bahan untuk mempercepat proses penguapan	Berbahan hidrofobik yang dapat mempercepat penguapan
10.	Timbangan digital	Untuk mengukur berat dengan satuan (kg)	Memberikan data yang lebih valid dibanding timbangan manual

3.5 Proses Pengaplikasian Nano Silica Oxide

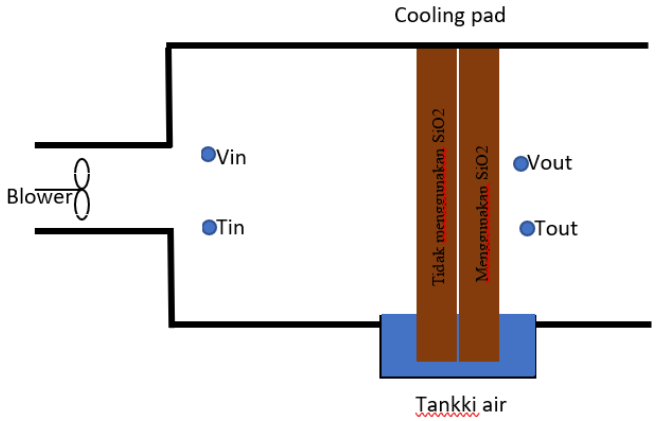
Proses penambahan *nano silica oxide* pada *cooling pad* yang digunakan meningkatkan proses penguapan serta dengan silica berukuran nano juga dapat memperbesar luas permukaan *cooling pad*. Berikut merupakan langkah-langkah pengaplikasian *nano silica oxide* diantaranya sebagai berikut:

1. Siapkan *cooling pad* berbahan selulosa
2. Siapkan air aquades 500 ml
3. Siapkan *nano silica* 20 gram
4. Siapkan hairdrayer
5. Siapkan wadah untuk merendam

6. Masukkan air aquades kedalam wadah dan campurkan nano silica oxide
7. Rendam *cooling pad* ke dalam wadah berisi air aquades yang sudah dicampur *nano silica* oxide selama 10 menit
8. Rendam bagian separuh bagian *cooling pad*
9. Angkat *cooling pad* setelah 10 menit
10. Keringkan *cooling pad* menggunakan hairdrayer
11. *Cooling pad* siap untuk di uji

3.6 Set Up penelitian

Set up penelitian dalam tugas akhir ini dapat di lihat pada gambar tersebut.



Gambar 3. 2 Set up penelitian

Proses pengambilan data pada penelitian ini membutuhkan beberapa aspek variabel bebasnya diantaranya waktu pengambilan data (15 menit, 30 menit, dan 45 menit), modifikasi *cooling pad* (tanpa *nano silica oxide* dan dengan *nano silica oxide*), dan kecepatan udara (1,87 m/s, 2,20 m/s, dan 2,50 m/s). Variabel tidak bebas dari penelitian ini adalah temperatue udara masuk dan keluar sistem serta jumlah air yang menguap. Dengan variabel-variabel tersebut digunakan untuk menganalisa effisiensi system, COP, dan kapasitas pendinginan spesifik.

Bab 5 Penutup

5.1 Kesimpulan

Secara empiris, peningkatan kinerja sistem pendingin evaporatif akibat penambahan nano silica oxide pada *cooling pad* terbukti paling efektif pada kondisi kecepatan aliran udara menengah hingga tinggi, yaitu pada kecepatan ≥ 2,20 m/s. Pada rentang kecepatan ini, energi kinetik partikel udara mencukupi untuk mengoptimalkan proses pelepasan molekul air dari permukaan *cooling pad* yang telah dimodifikasi menjadi *hidrofobik*. Sebaliknya, pada kecepatan rendah seperti 1,87 m/s, efek positif dari *nano silica oxide* tidak signifikan karena energi kinetik udara yang terbatas tidak mampu mendorong evaporasi secara optimal, serta karakter hidrofobik parsial pada *cooling pad* justru menghambat penyerapan air lebih lanjut. Efisiensi sistem yang dihitung dari perbandingan kapasitas pendinginan sensibel dan laju perpindahan panas laten menunjukkan peningkatan nyata pada kecepatan lebih tinggi dan durasi yang mencukupi, menggambarkan kontribusi penting modifikasi material dalam mengoptimalkan perpindahan panas dan massa yang menjadi inti mekanisme pendinginan evaporatif.

Lebih lanjut, koefisien performa (*Coefficient of Performance* atau COP) juga meningkat secara signifikan dengan adanya *nano silica oxide*, menunjukkan efisiensi energi yang lebih tinggi di mana sistem dapat memindahkan energi panas dengan konsumsi listrik yang lebih rendah. Peningkatan COP sangat terasa pada kecepatan aliran udara yang lebih besar karena proses pelepasan energi ikat antar molekul air dipercepat, sehingga laju evaporasi meningkat. Di samping itu, kapasitas pendinginan spesifik, yang merupakan indikator kemampuan pendinginan per unit massa *cooling pad*, juga mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan kecepatan udara yang melewati media pendingin. Hal ini menunjukkan adanya sinergi antara energi kinetik udara dan modifikasi permukaan *cooling pad* oleh *nano silica oxide* dalam memperbesar laju penguapan dan kemampuan menyerap panas secara efektif. Keseluruhan hasil ini memberikan bukti kuat bahwa integrasi *nano silica oxide* menjadi strategi yang sangat efektif dalam peningkatan performa sistem *evaporative cooling*, khususnya pada kondisi operasional dengan kecepatan aliran menengah hingga tinggi, serta membuka peluang pengembangan teknologi pendinginan yang lebih hemat energi, efektif, dan ramah lingkungan sesuai dengan tuntutan teknologi masa kini yang berkelanjutan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar penerapan nano silica oxide pada cooling pad dioptimalkan terutama pada kecepatan aliran udara menengah hingga tinggi (≥ 2,20 m/s), karena pada rentang ini terjadi peningkatan signifikan efisiensi sistem, koefisien performa (COP), dan kapasitas pendinginan spesifik akibat energi kinetik udara yang cukup untuk memfasilitasi pelepasan molekul air secara optimal dari permukaan yang telah termodifikasi menjadi hidrofobik. Penggunaan air berkualitas tinggi seperti air aquades sangat dianjurkan untuk menjaga kemurnian dan kestabilan proses penguapan tanpa gangguan mineral, serta pemeliharaan rutin berupa pembersihan dan pengeringan diperlukan untuk mempertahankan sifat hidrofobik dan mencegah penurunan performa. Optimalisasi parameter operasional, khususnya kecepatan aliran udara, sangat penting karena kecepatan rendah mengurangi efektivitas modifikasi nano silica akibat keterbatasan energi kinetik udara yang tidak mendukung evaporasi maksimal. Untuk pengembangan lebih lanjut, studi mengenai variasi dosis nano silica oxide dan kombinasi dengan nano-material lain yang memiliki sifat permukaan terkontrol perlu dilakukan guna mencapai keseimbangan optimal antara kapasitas pendinginan dan efisiensi energi. Pendekatan multidisipliner yang melibatkan aspek material, dinamika fluida, dan optimasi proses penting untuk meningkatkan performa sistem secara menyeluruh, sehingga integrasi nano silica oxide tidak hanya meningkatkan kinerja teknis tetapi juga mendukung pengembangan teknologi pendinginan yang ramah lingkungan dan hemat energi sebagai solusi berkelanjutan dalam industri pendinginan.

5.3 Keterbatasan

Berdasarkan hasil penelitian terkait pengaruh penambahan *nano silica oxide* pada *cooling pad* dalam sistem pendingin evaporatif, terdapat beberapa keterbatasan penting yang perlu diperhatikan. Pertama, efektivitas *nano silica oxide* sangat bergantung pada kecepatan aliran udara, dengan peningkatan performa signifikan hanya terlihat pada kecepatan menengah hingga tinggi (≥ 2,20 m/s), sementara pada kecepatan rendah (sekitar 1,87 m/s) efeknya kurang optimal. Hal ini menandakan bahwa variasi kecepatan udara yang lebih luas perlu diuji untuk aplikasi nyata. Kedua, modifikasi terbatas hanya pada separo permukaan selulosa *cooling pad*, sehingga distribusi nano silica secara menyeluruh belum dieksplorasi dan berpotensi mempengaruhi performa keseluruhan. Selain itu, penggunaan air aquades sebagai media aplikasi *nano silica*

berbeda dengan kondisi nyata di mana kualitas air bervariasi dan dapat mengandung mineral atau zat pengotor yang mungkin memengaruhi proses penguapan dan kestabilan sifat *hidrofobik* media pendingin, sehingga performa terhadap air non-murni masih perlu dikaji. Durasi pengujian yang singkat (15 hingga 45 menit) juga membatasi penilaian terhadap ketahanan jangka panjang dan kemungkinan degradasi material akibat faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu ekstrem, dan siklus basah-kering, yang penting untuk aplikasi praktis. Penelitian ini juga fokus pada aspek fisik dan termodinamika tanpa mendalami dinamika fluida kompleks dan interaksi mikrostruktur pori cooling pad yang memengaruhi distribusi kelembapan serta perilaku aliran udara, sehingga variabilitas tersebut belum termodelkan secara penuh. Terakhir, meskipun *nano silica oxide* menunjukkan potensi peningkatan performa, aspek konsistensi kualitas nano-material, biaya produksi, serta dampak lingkungan dan kesehatan akibat partikel nano selama operasi belum dibahas, padahal hal ini penting untuk pengembangan teknologi yang aman dan berkelanjutan. Oleh karena itu, keterbatasan-keterbatasan ini perlu menjadi fokus kajian lanjutan dengan memperluas kondisi operasi, memperpanjang durasi pengujian, dan mengevaluasi dampak lingkungan dan keselamatan material nano guna memperkuat validitas, keamanan, dan aplikasi praktis teknologi pendinginan evaporatif berbasis nano silica oxide di masa depan.

Referensi

Abdullah, S. *et al.* (2023) 'Technological development of evaporative cooling systems and its integration with air dehumidification processes: A review', *Energy and Buildings*, 283, p. 112805. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112805.

Aji, W.B. (2019) 'Pengembangan Material Komposit Limbah Kertas Untuk Cooling-Pad Pada Sistem', p. 2.

Aziz, R. *et al.* (2017) 'Sistem Kontrol Suhu Penyimpan Buah-Sayur Pada Mesin Pendingin Termoelektrik', *JTT (Jurnal Teknologi Terapan)*, 3(2), pp. 32–36. Available at: https://doi.org/10.31884/jtt.v3i2.59.

Aziza, A., Herwanto, B. and Mainil, R.I. (2019) 'Efek Penggunaan Water Mist Terhadap Tekanan, Temperatur dan Kinerja Sistem Mesin Pengkondisian Udara Tipe Terpisah', *METAL: Jurnal Sistem Mekanik dan Termal*, 3(2), pp. 101–108.

Chen, Q. *et al.* (2021) 'A hybrid indirect evaporative cooling-mechanical vapor compression process for energy-efficient air conditioning', *Energy Conversion and Management*, 248. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114798.

Dai, Y.J. *et al.* (2021) 'Use of liquid desiccant cooling to improve the performance of vapor compression air conditioning', *Applied Thermal Engineering*, 21(12), pp. 1185–1202. Available at: https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00002-3.

Dinapradipta, A. (2020) 'Peningkatan Kenyamanan Termal dan Pencahayaan Alam Gedung Sekolah Dasar di Kawasan Padat Hunian di Surabaya', *Arsitektura*, 18(1), p. 63. Available at: https://doi.org/10.20961/arst.v18i1.36146.

Gao, Z. *et al.* (2015) 'Energy performance analysis of a dual pre-cooled indirect evaporative-cooling hybrid air conditioning system for transformer and distribution rooms', 2, p. 549.

Hardanto, C. and Yunianto, B. (2015) 'Uji Prestasi Pendinginan Evaporasi Kontak Tidak Langsung Dengan Variasi Temperatur Media Pendingin Air', *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 3(3), pp. 239–244.

Jauziyah, I. Al *et al.* (2025) 'PENGEMBANGAN REFRIGERANT NANO FLUIDA UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PERPINDAHAN PANAS SISTEM PENDINGIN', *Jurnal Ilmiah Sain dan Teknologi*, 3(3), pp. 121–135.

Kadarisman and Nurhasanah, I. (2020) 'Analisis Permukaan Nanopartikel Ferit Seng Berdasarkan Adsorpsi Isoterm Gas Nitrogen', *Berkala Fisika*, 23(3), pp. 78–82.

Kadek Dwiana, I. *et al.* (2022) 'Pengaruh sistem distribusi air pada cooling pad terhadap performansi evaporative cooling', *Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology*, 3, pp. 87–91. Available at: https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH.

Kano, S., Kim, K. and Fujii, M. (2017) 'Fast-Response and Flexible Nanocrystal-Based Humidity Sensor for Monitoring Human Respiration and Water Evaporation on Skin', *ACS Sensors*, 2(6), pp. 828–833. Available at: https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00199.

Kusbandono, W. (2022) 'The Effect of the Number of Cooling Pads on the Output Air Condition and Effectiveness of Air Cooler', *International Journal of Applied Sciences and Smart Technologies*, 4(2), pp. 255–266. Available at: https://doi.org/10.24071/ijasst.v4i2.5313.

Mahmudi, M. and Jinan, M.M. Al (2025) 'RANCANG ALAT PENINGKATAN EFISIENSI PENDINGIN DIRECT EVAPORATIVE DENGAN

ANYAMAN SERAT ALAM BATANG PISANG', *Rekayasa Sistem Engineering dan Manufaktur*, 3(1), pp. 140–147.
Mehrabi, M., Goudarzi, K. and Farahani, S.D. (2023) 'Experimental study of the influence of pad angle on the thermal performance of a direct evaporative cooling system', *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, 31(1). Available at: https://doi.org/10.1007/s44189-023-00041-9.
Mulya, W., Dani Gustaman Syarif, H. and Nuklir Nasional Bandung, T. (2018) 'Nanopartikel , Hasil Green Synthesis Dan Aplikasinya Di Mesin Pendingin Nanoparticle, a Green Synthesis Product and Its Application on Cooling Machines', *Maret*, 5(1), p. 894.
Ningrum, Y.P. (2018) 'Sintesis dan Karakteristik Nanopartikel Silika (SiO2) dari Limbah Geothermal sebagai Fluorescent Fingerprint Powder', *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp. 1689–1699.
Nugroho, H. (2017) 'Coal As the National Energy Supplier Forward : What are Policies to be Prepared ? 1 Batu Bara Sebagai Pemasok Energi Nasional ke Depan : Apa yang Perlu Disiapkan ?', 1(1), pp. 1–13.
Nursari, E. *et al.* (2025) 'REVIEW : SINTESIS NANOPARTIKEL SILIKA DARI BEBERAPA MATERIAL DENGAN METODE SOL-GEL', 14, pp. 115–123.
Nusa, M.I. (2015) 'Teknologi Pendingin Evaporasi (Evaporative Cooling) Untuk Memperpanjang Umur Simpan Buah dan Sayuran Segar', *Agrium*, 19(3), pp. 281–288.
Pandi, S.D., Santosa, H. and Mulyono, J. (2017) 'Pembuatan, Modifikasi dan Pemanfaatan Material Nano-Pori', *Ilmiah widya teknik*, 16(1), pp. 54–57.
Prasetyaningrum, A. (2017) 'Prototype Penyimpanan Buah Dan Sayur Menggunakan Ozon Dan Metode Evaporative Cooling Sebagai Sistem Pendingin', *Jurnal Aplikasi Teknologi Pangan*, 6(1), pp. 31–35. Available at: https://doi.org/10.17728/jatp.213.
Pratama, E.P. and Suryadimal (2023) 'Pengaruh Laju Aliran Airmenyilang Dievaporator Terhadap Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh Pada Mesin Pendingin Miniwater Chiller', *Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta* [Preprint].
Priangkoso, T. *et al.* (2018) 'PENGARUH JENIS REFRIGERANT DAN DIAMETER PIPA KAPILER TERHADAP KINERJA AC SPLIT', *Momentum*, 14(2), pp. 1–23.
Priyono, S.A.P. (2024) 'Perkembangan Nanosains dan Nanoteknologi : Fenomena dari Sifat Fisika dan Kimia', *Berkala Fisika*, 27(2), pp. 49–57.
Purnomo, B.C. and Setiyo, M. (2017) 'Karakteristik Sistem Refrigerasi Kompresi Uap Dengan Refrigerant Campuran Musicool 134 - Co2', *Jurnal Teknologi*, 9(2), p. 57. Available at: https://doi.org/10.24853/jurtek.9.2.57-64.
Purnomo, B.C. and Waluyo, B. (2015) 'Optimalisasi penggunaan refrigeran musicool untuk meningkatkan performa sistem refrigerasi kompresi uap dengan variabel katup ekspansi', *Semnastek Universitas Muhammadiyah Jakarta*, (November), pp. 1–7.
Rachman, R.P. and Yunianto, B. (2014) 'Pengaruh Jenis Sprayer Terhadap Efektivitas Direct Evaporative Cooling Dengan Cooling Pad Serabut Kelapa', *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 2(2), pp. 78–82.
Sabatiana, A.C. and Putra, A.B.K. (2017) 'Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Perubahan Refrigeran-22 Dengan Musicool-22 Pada Sistem Pengkondisian Udara Dengan Pre-cooling', *Jurnal Teknik ITS*, 5(2), pp. 290–293. Available at: https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.20348.

Sandyawan, A. and Putra, A.B.K. (2020) 'Studi Numerik Pengaruh Peletakan Cooling Pad Terhadap Distribusi Temperatur dan Pola Aliran Udara Ventilasi Kandang Ayam Broiler Close House Tipe Ventilasi Lorong', *Jurnal Teknik ITS*, 8(2), p. 7. Available at: https://doi.org/10.12962/j23373539.v8i2.46591.

Septa, S. and Hoirul, H. (2022) 'Peran Big Data pada Sektor Industri Perdagangan: Tinjauan Literatur pada Perusahaan Bidang Perkantoran', *Journal of Office Administration : Education and Practice*, 2(3), pp. 198–210. Available at: https://doi.org/10.26740/joaep.v2n3.p198-210.

Shofiyani, A. *et al.* (2019) 'Synthesis of Nanosilica from Padas Stone to Reduce The Total Organic Carbon of Palm Oil Waste', *Jurnal ILMU DASAR*, 20(1), p. 39. Available at: https://doi.org/10.19184/jid.v20i1.8679.

Silalahi, B.S.T., Ajiwiguna, T.A. and Kirom, R. (2018) 'Studi Pendingin Evaporatif Untuk Pendinginan air', *e-Proceeding of Engineering*, 5(3), pp. 5919–5924.

Siregar, M.H.A. *et al.* (2021) 'Studi Eksperimental Laju Perpindahan Panas dan Laju Aliran Massa Fluida Pada Karbon Aktif Bambu Betung Dengan Temperatur 600 ° C Holding Time 60 Menit', 10(3), pp. 1446–1451.

Sitopu, F.L.M. and Yunianto, B. (2015) 'Pengujian Direct Evaporative Cooling Dengan Aliran Searah', *Jurnal Teknik Mesin S-1*, 3(3), pp. 345–351.

Soewono, A.D. *et al.* (2023) 'Rancang Bangun Sistem Pendingin Evaporatif Berbasis Penyemprotan Air Untuk Meningkatkan Performa Air Conditioner', *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(3), pp. 995–1004. Available at: https://doi.org/10.33379/gtech.v7i3.2673.

Sofia, E. and Sonawan, H. (2024) 'Performance Test of Commercial Air Coolers with Cooling Pads Made from Banana Midrib Fiber and Honeycomb Uji Performansi Air Cooler Komersial Menggunakan Cooling Pad Dari Serat Pelepah Pisang dan Honeycomb', *MESTRO: Jurnal Ilmiah*, 6(1), pp. 12–17.

Suryana, I.N., Suarnadwipa, I.N. and Wijaksana, H. (2014) 'Studi Eksperimental Performansi Pendingin Evaporative Portable Dengan Pad Berbahan Spon Dengan Ketebalan Berbeda', *Jurnal Ilmiah TEKNIK DESAIN MEKANIKA*, 1(1), pp. 65–70.

Susila, I.P.P., Wijaksana, H. and Suarnadwipa, I.N. (2019) 'Studi Laju Evaporasi Pada Direct Evaporative Cooling Berbahan Pad Jerami Padi dan Tapis Kelapa', *Iptekma*, 8(4), p. 25. Available at: https://doi.org/10.24843/iptekma.2019.v08.i01.p04.

Syarif, H. *et al.* (2021) *Digital Receipt*.

Xu, B. and Zhang, Q. (2021) 'Preparation and Properties of Hydrophobically Modified Nano-SiO2with Hexadecyltrimethoxysilane', *ACS Omega*, 6(14), pp. 9764–9770. Available at: https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00381.

Yunianto, B. and Isnandi, N.E. (2017) 'Pengaruh Jenis Sprayer Terhadap Efektivitas Pendinginan Evaporasi Kontak Langsung', *Rotasi*, 19(3), p. 110. Available at: https://doi.org/10.14710/rotasi.19.3.110-116.