

Analisis Dry Bulb Temperature Drop Pada Pendinginan Maisotsenko Udara Counter Dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Dan Air

I Kadek Agus Audina Oktaviana, Hendra Wijaksana, dan Ketut Astawa
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Sistem pendingin evaporatif Maisotsenko (Maisotsenko-Cycle atau M-Cycle) merupakan teknologi pendinginan alternatif yang efisien dan ramah lingkungan karena tidak menggunakan refrigeran dan mengonsumsi energi listrik yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem pendingin konvensional berbasis kompresor. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji performa sistem pendingin Maisotsenko dengan pola aliran udara counter (berlawanan) terhadap variasi rasio laju aliran massa udara dan air. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan alat uji yang telah dirancang khusus, di mana laju aliran massa udara divariasikan pada tiga nilai (0,055 kg/s, 0,041 kg/s dan 0,028 kg/s) serta diuji terhadap tiga laju aliran massa air yang tetap (0,158 kg/s, 0,237 kg/s dan 0,316 kg/s). Parameter performansi yang dianalisis meliputi efektivitas bola basah (wet bulb effectiveness), efektivitas titik embun (dew point effectiveness), kapasitas pendinginan, serta rasio efisiensi energi (EER dan COP). Hasil pengujian diharapkan dapat mengungkap hubungan antara rasio laju aliran massa udara-air terhadap kinerja termal sistem, khususnya dalam upaya menghasilkan udara sejuk dengan efisiensi tinggi dan temperatur mendekati titik embun. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pengembangan sistem pendingin hemat energi dan ramah lingkungan untuk aplikasi bangunan di iklim tropis.

Kata kunci: Maisotsenko Cycle, sistem pendingin evaporatif, rasio aliran massa udara-air, efektivitas titik embun, pendinginan ramah lingkungan.

Abstract

Maisotsenko Cycle (M-Cycle) evaporative cooling system is an alternative cooling technology that offers high energy efficiency and environmental friendliness, as it requires no refrigerants and consumes significantly less electrical energy compared to conventional compressor-based systems. This study aims to experimentally investigate the performance of a counter-flow Maisotsenko cooling system under varying air-to-water mass flow rate ratios. The experiments were conducted using a specially designed test rig, with three variations of air mass flow rates (0.055 kg/s, 0.041 kg/s, and 0.028 kg/s) tested against three constant water mass flow rates (0.158 kg/s, 0.237 kg/s, and 0.316 kg/s). Performance parameters analyzed include wet bulb effectiveness, dew point effectiveness, cooling capacity, and energy efficiency ratios (EER and COP). The results are expected to reveal the relationship between air-to-water mass flow rate ratio and the thermal performance of the system, particularly in achieving low supply air temperatures close to the dew point with high energy efficiency. This study aims to contribute to the development of energy-saving and environmentally friendly cooling systems suitable for tropical climate applications.

Keywords: Maisotsenko Cycle, evaporative cooling system, air-to-water mass flow ratio, dew point effectiveness, environmentally friendly cooling.

1. Pendahuluan

Di zaman modern ini, peningkatan jumlah penduduk dan sektor perumahan telah mendorong kebutuhan akan kenyamanan dalam ruangan. Sekitar 95% dari sistem pendingin yang digunakan adalah berbasis kompresor, yang dikenal sebagai air-conditioner (AC). Hal ini menyebabkan konsumsi energi listrik secara global mencapai 40-60% dari total energi yang tersedia, dengan hampir 50% dari energi tersebut dialokasikan untuk pendinginan.[1] Penggunaan AC juga berkontribusi terhadap pemanasan global melalui emisi gas rumah kaca dan dapat menimbulkan masalah kesehatan seperti alergi dan asma. Oleh karena itu, banyak penelitian dilakukan untuk menciptakan sistem pendingin alternatif, salah satunya adalah sistem pendingin evaporatif, yang lebih efisien dalam penggunaan energi dan ramah lingkungan, hanya memerlukan seperempat dari energi listrik yang dibutuhkan oleh

AC berbasis kompresor dan menggunakan udara serta air sebagai fluida kerjanya.

Sistem pendingin evaporatif dibagi menjadi dua kategori utama: pendinginan evaporatif langsung (DEC) dan tidak langsung (IEC). Pada DEC, terdapat kontak langsung antara udara dan air, di mana panas sensibel dari udara digunakan untuk menguapkan air, sehingga menghasilkan udara yang lebih dingin dengan tambahan uap air. Di sisi lain, pada IEC, udara yang akan didinginkan berada dalam saluran terpisah dari udara yang berfungsi untuk mendinginkannya. Dalam sistem ini, hanya terjadi pendinginan sensibel tanpa adanya kontak langsung dengan air, menggunakan plat penukar panas untuk mentransfer panas. Kelemahan dari kedua sistem ini adalah bahwa proses pendinginan dibatasi oleh temperatur bola basah udara luar, sehingga meskipun memiliki efektivitas yang tinggi, suhu udara yang dihasilkan tidak dapat lebih rendah dari temperatur bola basah tersebut.

Untuk mengatasi kekurangan sistem pendingin evaporatif konvensional, telah dikembangkan sistem pendingin Maisotsenko, atau yang dikenal sebagai *M-cycle*. Siklus ini merupakan inovasi dalam desain dan pengoperasian penukar panas dan massa (HMX) yang mampu mengekstrak energi tambahan dari lingkungan dengan menggunakan penukar panas datar dan aliran silang. Karakteristik utama *M-cycle* adalah pola aliran di saluran basah, di mana udara yang masuk didinginkan terlebih dahulu melalui bagian kering saluran. Sebagian dari udara kering kemudian dialihkan ke sisi basah, di mana udara mengalami proses humidifikasi melalui penguapan dan menyerap panas. Pada akhirnya, udara kerja ini dilepaskan ke atmosfer. *M-cycle* mengintegrasikan proses termodinamika pertukaran panas dan pendinginan udara evaporatif dalam sistem pendingin udara evaporatif tidak langsung. Beberapa studi telah dilakukan untuk mengoptimalkan kinerja *M-cycle* dengan mengeksplorasi berbagai konfigurasi dan ukuran. Penelitian oleh Bakeem et al. (2021) menunjukkan bahwa lubang-lubang di saluran udara kerja kering perlu didistribusikan secara merata untuk memastikan aliran udara yang stabil. Di sisi lain, Caliskan et al. (2021) menemukan bahwa kinerja penukar panas menurun di berbagai kondisi desain dan operasi, yang menunjukkan bahwa efektivitas titik embun dan bola basah serta efisiensi energi sangat dipengaruhi oleh dimensi saluran, kecepatan udara, dan rasio antara udara kerja dan udara masuk.

2. Dasar Teori

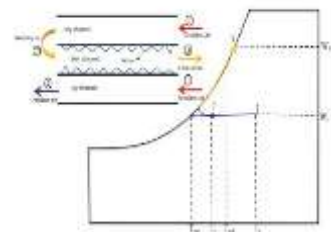
2.1 Pendingin Evaporative

Pendinginan evaporative merupakan sistem pendingin tanpa menggunakan refrigerant, konstruksi dasarnya terdiri dari udara dan semburan air Pendinginan. Pada pendinginan evaporative, air sebagai media pendinginan dan menambah kelembaban pada aliran udara [5]. Oleh karena itu, pendinginan evaporative menyebabkan penurunan suhu udara pasokan yang sebanding dengan penurunan panas sensibel dari udara pasokan dan peningkatan kelembaban udara pasokan yang sebanding dengan perolehan panas laten oleh air [6]. Pendinginan evaporative umumnya membutuhkan seperempat tenaga listrik yang digunakan oleh kompresi uap mekanis untuk pengkondisian udara. Oleh karena itu, sistem ini akan membantu mengurangi penggunaan listrik dan juga mengurangi emisi gas rumah kaca

2.2 Siklus Maisotsenko (*M-Cycle*)

Siklus Maisotsenko (*M-Cycle*) merupakan evolusi pendinginan evaporative tidak langsung, siklus ini pertama kali diperkenalkan oleh Valerij Maisotsenko yang pertama kali diperkenalkan pada 1976. Siklus ini dianggap sangat inovatif karena kemampuannya untuk mencapai efisiensi tinggi dengan konsumsi energi yang rendah. Siklus *M-Cycle* juga merupakan pendinginan evaporative titik embun (DPEC) yang mana bagian dari udara yang

didinginkan secara tidak langsung disirkulasikan di saluran basah HMX sehingga dapat meningkatkan efektivitas pertukaran panas secara keseluruhan [7]. Penukar panas dan massa (HMX) berbasis siklus *MCycle* juga dapat dengan mudah diintegrasikan dalam sistem pendingin konvensional. Dalam kondisi iklim sedang, udara sekitar tidak memerlukan kelembaban lagi sebelum dikirim ke ruangan yang dikondisikan. Sedangkan tenaga surya dapat dimanfaatkan untuk tujuan pemanasan sehingga menjadikan keseluruhan sistem ramah lingkungan. HMX berbasis siklus *MCycle* dalam kondisi seperti ini dapat memberikan keuntungan dibandingkan dengan metode konvensional karena dapat bekerja dengan baik bahkan pada kelembaban yang kurang efektif. Sehingga memungkinkan penerapan teknologi pengering yang lebih luas di area dimana sistem ini diperkirakan kurang berguna [8]



Gambar 1. Siklus Pendinginan Maisotsenko

2.3 Laju Aliran Massa

Laju Aliran Massa Laju aliran massa adalah massa dari suatu aliran yang mengalir tiap detiknya yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran, jenis aliran dan besar kecilnya penampang yang dilalui fluida. Cara untuk meningkatkan efisiensi pendinginan pada siklus maisotsenko adalah dengan mengurangi rasio aliran massa produk terhadap kerja. Namun, metode ini menyebabkan peningkatan konsumsi air yang signifikan

2.4 Temperature Dry Bulb (Bola Kering)

Suhu bola kering merupakan suhu termodinamika yang sebenarnya yang pengukurannya dapat dilakukan secara langsung. Oleh karena itu, suhu bola kering memberikan gambaran tentang sejauh mana suhu udara yang diukur tersebut.

2.5 Temperature Wet Bulb (Bola Basah)

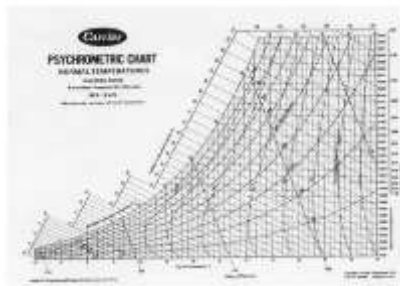
Temperature bola basah adalah rasio perbedaan antara suhu udara masuk dan keluar terhadap perbedaan asupan temperature udara dan temperature bola basahnya.

2.6 Temperature Dew Point (Suhu Titik Embun)

Titik embun adalah rasio perbedaan suhu bola kering inlet dan outlet dengan perbedaan suhu antara bola kering inlet dan suhu titik embun yang sesuai. Adanya perubahan pada Suhu titik embun menunjukkan adanya perubahan panas laten atau adanya perubahan kandungan uap air di udara

2.7 Diagram Psikometrik (Psychometric Chart)

Psikrometrik merupakan studi tentang campuran udara dan air serta merupakan dasar penting untuk memahami cara mengubah kondisi udara dari satu keadaan ke keadaan lain.



Gambar 2. Diagram psikometrik chart

3. Metode Penelitian

3.1 Konsep Penelitian

Penelitian akan dilakukan secara eksperimental pada alat pendinginan siklus maisotsenko udara counter flow dengan variasi laju aliran massa udara dan air. Dengan memvariasikan laju udara dan air sehingga mendapatkan sembilan laju aliran massa udara dan air.

1. Observasi dan studi literatur
2. Persiapan alat dan bahan serta pemasangan alat ukur
3. Pengujian sistem pendinginan Maisotsenko udara counter flow dengan variasi laju aliran massa udara primer
4. Pencatatan data
5. Penganalisisan data, pembahasan, pembuatan grafik dan Kesimpulan.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

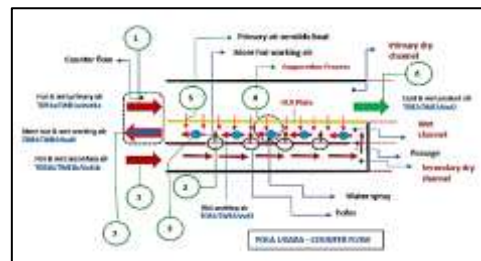
1. UNI-T UT333 Thermometer Hygrometer Humidity
2. Digital wind anemometer - dengan range 0 – 30 m/s
3. Pompa pengabut
4. Nozzel
5. Dimer
6. Stopwatch
7. Plat aluminium dan plat tembaga
8. Riped dan paku riped
9. Gerinda dan Bor
10. Blower Keong
11. Flexible hose
12. Aluminium Foil
13. Glasswool

3.3 Cara Kerja Alat Uji

1. Pengaturan laju aliran massa udara dilakukan dengan mengatur kecepatan aliran udara blower pada kecepatan masing-masing 7.2 m/s, 5.4 m/s dan 3.6 m/s, sehingga didapat variasi laju aliran massa udara masing-masing secara berurutan disebut sebagai $\dot{m}_{u1}=0.055$ kg/s, $\dot{m}_{u2}=0.041$ kg/s dan $\dot{m}_{u3}=0.028$ kg/s. Sedangkan variasi laju

aliran massa air didapat dengan mengatur penggunaan jumlah *nozzle* masing-masing 3, 5, dan 7 *nozzle*, yang menghasilkan variasi laju aliran massa air masing-masing secara berurutan disebut sebagai $\dot{m}_{a1}=0.158$ kg/s, $\dot{m}_{a2}=0.237$ kg/s dan $\dot{m}_{a3}=0.316$ kg/s.

2. udara sekunder pada secondary dry channel, selanjutnya akan masuk pada *wet channel* melalui setiap lubang (terdapat 5 lubang) dan satu laluan pada dinding wet channel yang selanjutnya akan disebut sebagai udara kerja
3. Udara kerja pada wet channel ini, selanjutnya akan mengalami kontak langsung (secara *cross flow*) dengan kabut air yang disemprotkan oleh water sprayer dan akan terjadi proses direct evaporative cooling, dimana terjadi kontak langsung antara udara kerja dan kabut air.
4. Kontak langsung antara udara dengan kabut air akan mengakibatkan terjadinya proses evaporasi, dimana panas udara kerja akan diserap oleh kabut air sehingga air akan menguap. Dengan diserapnya panas udara kerja oleh kabut air, maka udara kerja akan mengalami penurunan suhu atau udara kerja akan menjadi lebih dingin.
5. Setelah ditransfer secara konveksi lalu konduksi melalui dinding heat exchanger plate (HEX plate) pada sisi udara primer menuju dinding HEX plate pada sisi wet channel. dimana terjadi pendinginan indirect evaporative udara primer oleh udara kerja.
6. Proses indirect evaporative cooling udara primer oleh udara kerja pada wet channel melalui HEX plate akan menghasilkan udara primer yang lebih rendah temperaturnya dengan kelembaban absolut yang konstan, yang keluar melalui outlet primary dry channel sebagai udara produk. Karena proses pendinginan indirect evaporative, maka kelembaban absolut udara produk akan tetap konstan sama dengan kelembabannya pada inlet primary dry channel



Gambar 3. Prinsip kerja sistim pendingin Maisotsenko aliran counter flow

4. Hasil dan Pembahasan

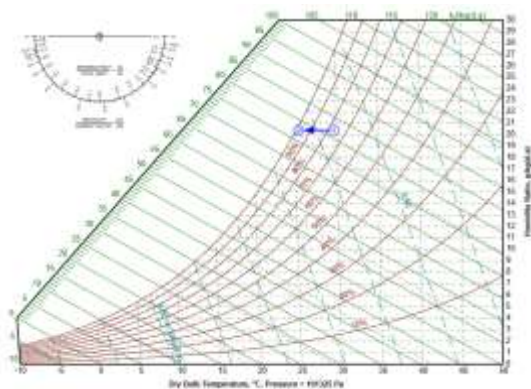
4.1. Data Hasil Penelitian

Pengujian eksperimental dilakukan pada sistim pendinginan *Maisotsenko-Indirect Evaporative Cooling*. Pengambilan data pada penelitian dilakukan

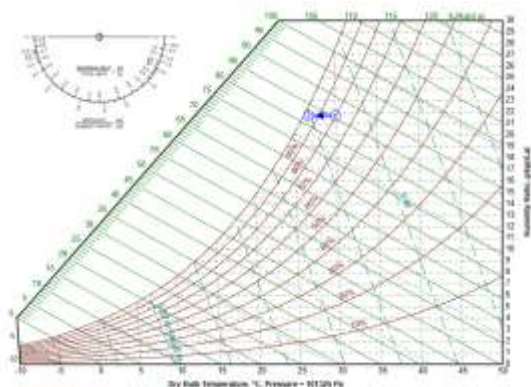
melalui hasil dari eksperimental dan hasil dari perhitungan pada diagram psikometrik chart. Adapun hasil data distribusi temperature dapat dilihat masingmasing secara berurutan pada

Tabel 4. 1 Hasil Data Pengujian

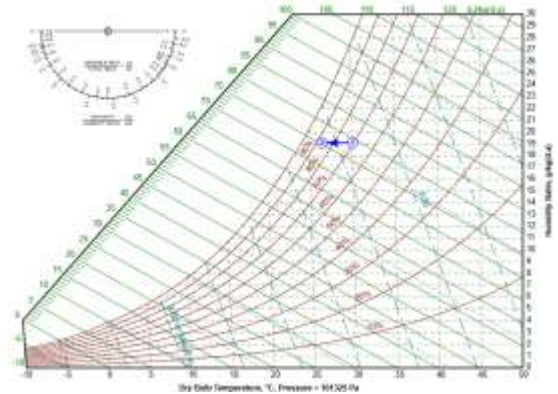
| Rasio m _u /m _w | T _{db} 1a (°C) | T _{db} 1b (°C) | R _h 1a (%) | T des. 1a (°C) | T _{db} 1b (°C) | T _{db} 1b (°C) | R _h 1b (%) | T _{db} 2 (°C) | T _{db} 2 (°C) | R _h 2 (%) | Absolute ratio g/kg(d.a) |
|---|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| rc1.1 = 0.34 | 30 | 27.1 | 80.3 | 26.2 | 29.9 | 25.4 | 75.7 | 26.8 | 25.4 | 91.5 | 21.7 |
| rc1.2 = 0.26 | 29.9 | 26.1 | 74.8 | 24.9 | 29.5 | 24.1 | 65.0 | 25.2 | 24.1 | 91.6 | 20.1 |
| rc1.3 = 0.18 | 30.7 | 26.5 | 72.5 | 25.2 | 30.3 | 24.5 | 62.5 | 25.6 | 24.5 | 91.6 | 20.4 |
| Rasio m _u /m _w | T _{db} 1a (°C) | T _{db} 1a (°C) | R _h 1a (%) | T des. 1a (°C) | T _{db} 1b (°C) | T _{db} 1b (°C) | R _h 1b (%) | T _{db} 2 (°C) | T _{db} 2 (°C) | R _h 2 (%) | Absolute ratio g/kg(d.a) |
| rc2.1 = 0.23 | 30 | 27.1 | 80.3 | 26.2 | 29.9 | 25.4 | 75.7 | 26.8 | 25.4 | 91.5 | 21.7 |
| rc2.2 = 0.17 | 30.2 | 27.1 | 79.7 | 26.2 | 30.4 | 25.3 | 66.2 | 26.3 | 25.2 | 91.9 | 21.7 |
| rc2.3 = 0.12 | 30 | 27.1 | 80.2 | 26.2 | 30.3 | 25.1 | 66.1 | 26.8 | 25.7 | 92.0 | 21.7 |
| Rasio m _u /m _w | T _{db} 1a (°C) | T _{db} 1a (°C) | R _h 1a (%) | T des. 1a (°C) | T _{db} 1b (°C) | T _{db} 1b (°C) | R _h 1b (%) | T _{db} 2 (°C) | T _{db} 2 (°C) | R _h 2 (%) | Absolute ratio g/kg(d.a) |
| rc3.1 = 0.17 | 31.7 | 26.3 | 66.1 | 24.5 | 30.9 | 28.4 | 83.8 | 28.4 | 26.9 | 91.2 | 19.6 |
| rc3.2 = 0.13 | 31.3 | 25.9 | 66.3 | 24.2 | 30.5 | 28 | 83.3 | 27.4 | 26.2 | 91.7 | 19.2 |
| rc3.3 = 0.09 | 30.1 | 25.7 | 70.5 | 24.1 | 29.8 | 27.7 | 85.5 | 27.7 | 26.5 | 91.8 | 19.1 |



Gambar 4. 1 Diagram psikometrik chart pada rc=1.1



Gambar 4. 2 Diagram psikometrik chart pada rc = 1.2



Gambar 4. 3 Diagram psikometrik chart pada rc = 1.3

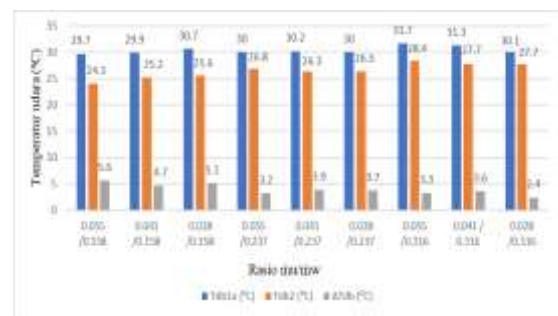
4.2 Selisih Penurunan Temperatur Bola Kering (Temperature Drop)

Selisih penurunan temperature bola kering (*temperature drop*) merupakan selisih temperatur bola kering *inlet* dan *outlet* pada saluran udara primer sistim pendinginan Maisotsenko dan dapat ditentukan menggunakan persamaan dibawah.

$$\Delta T_{db} = T_{dbin} - T_{dbout} = T_{db1a} - T_{db2}$$

Tabel 4. 2 Selisih penurunan temprature bola kering (dry bulb temperature drop)

| Rasio m _u /m _w | m udara (kg/s) | m air (kg/s) | T _{db} in (°C) | T _{db} out (°C) | ΔT _{db} (°C) |
|---|----------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| rc1.1 = 0.34 | 0.055 | 0.158 | 29.7 | 25.5 | 4.2 |
| rc2.1 = 0.26 | 0.041 | 0.158 | 29.8 | 25.2 | 4.6 |
| rc3.1 = 0.18 | 0.028 | 0.158 | 30.7 | 25.6 | 5.1 |
| rc1.2 = 0.23 | 0.055 | 0.237 | 30 | 26.8 | 3.2 |
| rc2.2 = 0.17 | 0.041 | 0.237 | 30.2 | 26.3 | 3.9 |
| rc3.2 = 0.12 | 0.028 | 0.237 | 29.9 | 26.8 | 3.1 |
| rc1.3 = 0.17 | 0.055 | 0.316 | 31.7 | 28.4 | 3.3 |
| rc2.3 = 0.13 | 0.041 | 0.316 | 31.3 | 27.4 | 3.9 |
| rc3.3 = 0.09 | 0.028 | 0.316 | 30.1 | 27.7 | 2.4 |



Gambar 4. 4 Grafik Selisih Penurunan Bola kering

Kapasitas pendinginan sangat dipengaruhi oleh rasio antara laju aliran massa udara dan air. Kapasitas tertinggi (0.23 kw) terjadi saat aliran udara tinggi dan aliran air rendah, karena udara primer dapat membawa lebih banyak panas dan udara sekunder cukup dingin untuk menyerap panas tersebut. Sebaliknya, kapasitas terendah (0.07 kw) terjadi saat aliran udara rendah dan aliran air tinggi, karena kontak

antara udara dan air kurang efektif. Semakin tinggi aliran air, waktu kontak dengan udara menjadi lebih singkat, sehingga penyerapan panas menurun dan kapasitas pendinginan ikut berkurang.

5. Kesimpulan

Kapasitas pendinginan sistem Maisotsenko sangat dipengaruhi oleh laju aliran massa udara dan air. Kapasitas tertinggi tercapai saat aliran udara tinggi dan aliran air rendah, sedangkan kapasitas terendah terjadi pada aliran udara rendah dan air tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan antara aliran udara dan air sangat penting untuk efisiensi pendinginan, karena memengaruhi efektivitas pertukaran panas dalam sistem

Daftar Pustaka

- [1] Naphon, P. and Wongwises, S. (2005) A Study of the Heat Transfer Characteristics of a Compact Spiral Coil Heat Exchanger under Wet-Surface Conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 29, 511-521. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.07.002>
- [2] B. Rianguilaikul, A Liquid Desiccant Dehumidifier Assisted Dew Point Evaporative Cooling System, Unpublished Research Study, Energy Field of Study, Asian Institute of Technology, Thailand 2009
- [3] Khalid, O. *et al.* (2016) 'Experimental analysis of an improved Maisotsenko cycle design under low velocity conditions', *Applied Thermal Engineering*, 95, pp. 288–295. Available at <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.030>.
- [4] Baakeem, S. S., Orfi, J., Mohamad, A., & Bawazeer, S. (2019). The possibility of using a novel dew point air cooling system (M-Cycle) for A/C application in Arab Gulf Countries. *Building and Environment*, 148, 185–197. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.11.002>
- [5] Kalsia, M., Sharma, A., Kaushik, R., & Dondapati, R. S. (2023). Evaporative Cooling Technologies: Conceptual Review Study. *Evergreen*, 10(1), 421–429. <https://doi.org/10.5109/6781102>
- [6] Borasiya, M. D., Atodariya, V. H., Kher, P.N., Devankumar, M., & Patel, S. (2017). A Review on Potential of Indirect Evaporative Cooling System. In *IJSTE-International Journal of Science Technology &*

Engineering(Vol.3).www.ijste.org

- [7] Muscio, A., Cossu, M., Morselli, N., Puglia, M., Pedrazzi, S., & Allesina, G. (2023). A modified ε -NTU analytical model for the investigation of counter-flow Maisotsenko based cooling systems. *Applied Thermal Engineering*, 231.
- [8] Ali, M., Sheikh, N. A., Khalid, O., Manzoor, S., & Ali, H. M. (2018). Parametric investigation of a counter-flow heat and mass exchanger based on Maisotsenko cycle. *Thermal Science*, 22(6), 3099–3106. <https://doi.org/10.2298/TSCI160808296A>

| | |
|---|---|
|  | I Kadek Agus Audina Oktaviana Menyelesaikan Studi program sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana dari tahun 2021 sampai 2025 |
| Bidang penelitian yang diminati yaitu Konversi Energi | |