

Analisis *Wet Bulb* Pada Sistem Pendingin Maisotsenko *Parallel Flow* Dengan Variasi Laju Aliaran Massa Air

Ranu Moha Ray Jainn, Hendra Wijaksana, dan Ketut Astawa
Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Sistem pendinginan udara pada bangunan umumnya menggunakan kompresi uap mekanis yang boros energi dan berdampak negatif terhadap lingkungan. Sebagai alternatif, sistem pendingin Maisotsenko (*Maisotsenko Cycle*) mampu mendinginkan udara hingga mendekati titik embun tanpa meningkatkan kelembaban. Penelitian ini bertujuan menguji pengaruh variasi laju aliran massa air terhadap *wet bulb effectiveness* pada sistem Maisotsenko aliran paralel. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan mengatur jumlah *nozzle* untuk memperoleh variasi laju aliran massa air pada kondisi laju aliran udara konstan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *wet bulb effectiveness* meningkat ketika selisih temperatur bola kering dan bola basah udara masuk semakin kecil. Efektivitas di atas 100% membuktikan bahwa sistem dapat mendinginkan udara keluar hingga di bawah temperatur bola basah udara masuk.

Kata kunci: Sistem pendingin Maisotsenko, *wet bulb effectiveness*, laju aliran massa air, pendinginan evaporatif.

Abstract

*Air cooling systems in buildings generally use mechanical vapor compression, which is energy-intensive and has a negative impact on the environment. As an alternative, Maisotsenko cooling system (*Maisotsenko Cycle*) is capable of cooling air to near dew point without increasing humidity. This study aims to investigate the effect of variations in water mass flow rate on wet bulb effectiveness in a parallel-flow Maisotsenko system. The method used is an experiment involving adjusting the number of nozzles to achieve variations in water mass flow rate under constant airflow conditions. The results show wet bulb effectiveness increases as the difference between the dry bulb and wet bulb temperatures off cool the outlet air to below the inlet wet bulb temperature.*

Keywords: *Maisotsenko cooling system, wet bulb effectiveness, water mass flow rate, evaporative cooling.*

1. Pendahuluan

Sistem pendinginan udara pada bangunan masih didominasi oleh sistem kompresi uap mekanis yang boros energi dan berdampak negatif terhadap lingkungan akibat penggunaan refrigeran. Konsumsi energi sektor bangunan mencapai 20-40% dari total energi, dengan sistem HVAC menyumbang 40-60%. Alternatif yang lebih hemat energi dan ramah lingkungan adalah sistem pendingin evaporatif, seperti *direct evaporative cooling* (DEC) dan *indirect evaporative cooling* (IEC). Namun, DEC meningkatkan kelembaban udara, sedangkan IEC memiliki efisiensi terbatas oleh temperatur bola basah [1].

Maisotsenko-indirect evaporative cooling (M-cycle) mengatasi kelemahan tersebut dengan mampu mendinginkan udara hingga mendekati temperatur titik embun tanpa menambah kelembaban. Kinerjanya dipengaruhi oleh laju aliran udara, material dan ketebalan penukar panas, pola aliran udara dan air, serta laju aliran massa air. Beberapa studi melaporkan efektifitas bola basah M-Cycle mencapai 81-130% dan efektifitas titik embun 50-85%, dengan COP 3-12 [2].

Penelitian mengenai pengaruh laju aliran massa air terhadap performansi pendinginan M-Cycle masih terbatas. Oleh karena itu, studi ini menguji sistem M-Cycle *parallel flow* dengan variasi jumlah

nozzel (2, 4, 6, dan 8) pada saluran basah untuk menghasilkan variasi laju aliran massa air. Peningkatan akan menurunkan temperatur udara produk akibat peningkatan pendinginan udara kerja pada saluran basah, sehingga perpindahan panas dari udara primer ke udara kerja melalui penukar panas menjadi lebih besar [3].

2. Dasar Teori

2.1 Sistem Pendingin Evaforative

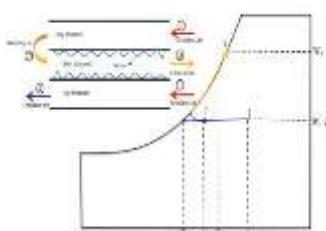
Pendinginan evaporative merupakan salah satu alternatif kompresi uap mekanis untuk aplikasi pengkondisian udara. Sistem ini biasanya hanya membutuhkan seperempat tenaga listrik yang digunakan oleh kompresi uap mekanis untuk pengkondisian udara. Oleh karena itu, sistem tersebut akan membantu mengurangi kebutuhan listrik, dan juga berkontribusi dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Sistem pendingin *evaporative* konvensional dapat menurunkan suhu udara proses secara teoritis mendekati suhu bola basahnya. Pendingin *evaporative* dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Pendingin *evaporative* langsung, di mana fluida kerja (air dan udara) bersentuhan langsung.
2. Pendingin *evaporative* tidak langsung, di mana permukaan/pelat memisahkan antara fluida kerja.
3. Pendingin *Maisotsenko*, pendinginan *evaporative* yang dimodifikasi yang memungkinkan udara didinginkan di bawah batas pendinginan *evaporative*

konvensional (suhu bola basah) dan mendekati titik embun yang relevan [4].

2.2 Siklus Maisotsenko (M-Cycle)

Siklus Maisotsenko (M-Cycle) merupakan pengembangan dari pendinginan *evaporative* tidak langsung, siklus ini pertama kali diperkenalkan oleh Valerij Maisotsenko pada tahun 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. Penukar panas dan massa (HMX) berbasis siklus M-Cycle 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 M-Cycle 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 [5].



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 dialiri 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)

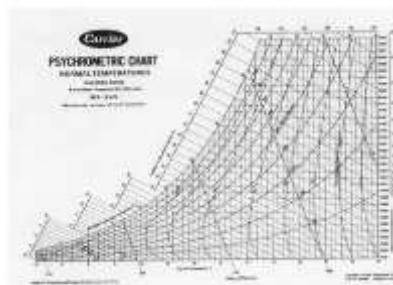
Temperature bola basah adalah rasio perbedaan antara suhu udara masuk dan keluar terhadap perbedaan asupan temperatur udara dan temperatur bola basahnya.

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)

Psikometrik 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 pendingin siklus maisotsenko udara parallel flow dengan variasi laju aliran massa air pada udara tetap.

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

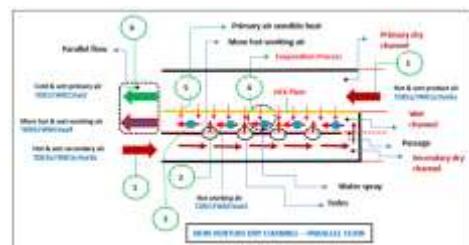
3.2 Alat dan Bahan Penelitian

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 alumunium dan plat tembaga
8. Riped dan paku ripped
9. Gerinda dan Bor
10. Blower Keong
11. Flexible hose
12. Alumunium Foil

13. Glasswool

3.3 Cara Kerja Alat Uji

1. Pengaturan laju aliran massa air dilakukan dengan mengatur jumlah nozzle, sehingga didapatkan variasi laju aliran massa air sebesar $m_{w1} = 0,0079 \text{ kg/s}$, $m_{w2} = 0,0158 \text{ kg/s}$, $m_{w3} = 0,0237 \text{ kg/s}$ dan $m_{w4} = 0,0316 \text{ kg/s}$. Sedangkan variasi laju aliran massa udara didapatkan dengan cara mengatur kecepatan putaran motor blower dengan dimmer yang berfungsi sebagai pengatur besar kecilnya tegangan AC yang dialirkkan ke motor blower. Kecepatan aliran udara diukur menggunakan anemometer yang diletakkan pada saluran keluaran blower.
2. udara sekunder pada *secondary dry channel*, selanjutnya akan masuk pada *wet channel* melalui setiap lubang (terdapat 5 lubang) dan satu arah 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*.
- 7.



Gambar 3. Prinsip kerja sistem pendingin Maisotsenko aliran *parallel flow*

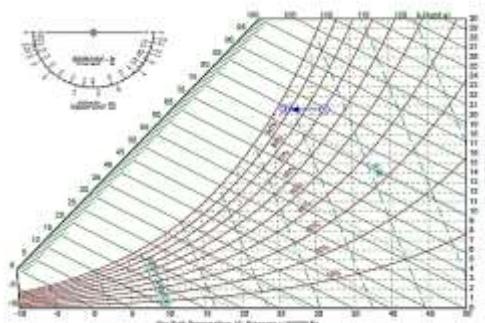
4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Data Hasil Penelitian

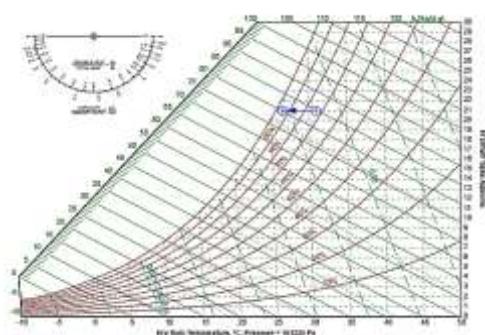
Pengujian eksperimental dilakukan pada sistem pendingin Maisotsenko-*Indirect Evaporative Cooling*. Pengambilan data pada penelitian dilakukan melalui hasil dari eksperimental dan hasil dari perhitungan pada diagram psikometrik chart. Adapun hasil data distribusi temperature dapat dilihat masing-masing secara berurutan pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data Hasil Penelitian

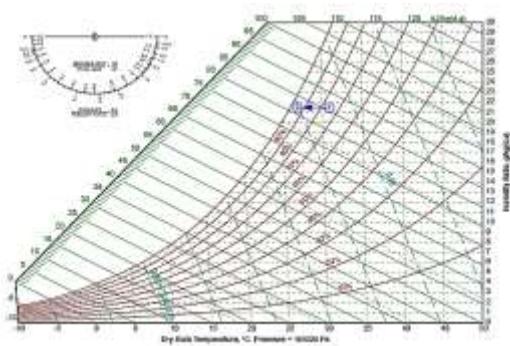
#	T _{db} 1a (°C)	T _{tw} 1a (°C)	Rh 1a (%)	T _{db} 1b (°C)	T _{tw} 1b (°C)	Rh 1b (%)	T _{db} 2 (°C)	T _{tw} 2 (°C)	Rh 2 (%)	Absolute ratio g/kg(d.a)
m _{w1}	31.6	26.9	69.4	25.3	31.5	26.3	69.4	26.3	24.4	20.6
m _{w2}	30.9	26.9	73.6	25.7	30.9	26.8	73.3	26.5	25.7	21.0
m _{w3}	30.8	27.2	75.3	25.9	26.3	27.6	89.6	26.6	25.7	21.0
m _{w4}	31.4	26.6	69.0	25.1	31.4	26.3	89.0	26.1	24.7	20.1



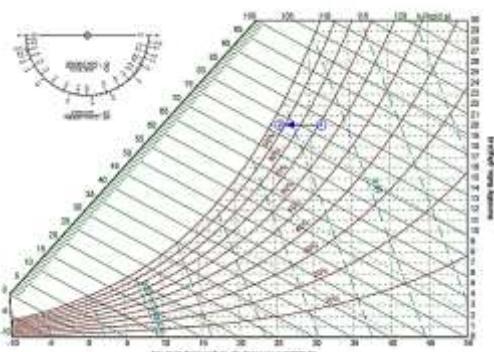
Gambar 4. 1 Diagram psikometrik chart pada laju aliran massa air 0,0079 kg/s.



Gambar 4. 2 Diagram psikometrik chart pada laju aliran massa air 0,0158 kg/s.



Gambar 4.3 Diagram psikometrik chart pada laju aliran massa air 0,0237 kg/s.



Gambar 4.4 Diagram psikometrik chart pada laju aliran massa air 0,0316 kg/s.

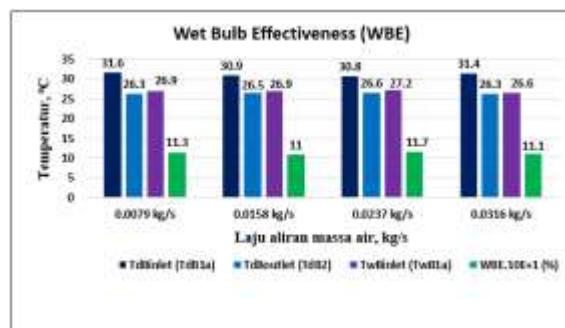
4.2 Selisih Penurunan Temperature Bola Basah (Wet Bulb)

Selisih penurunan temperature bola basah (*wet bulb temperature drop*) merupakan selisih temperatur bola basah inlet dan outlet pada saluran udara konstan sistem pendinginan Maisotsenko dan dapat ditentukan menggunakan persamaan dibawah.

$$\varepsilon_{wb} = \frac{t_{db\ 1a} - t_{db\ 2}}{t_{db\ 1a} - t_{wb\ 1a}}$$

Tabel 4.2 Selisih penurunan temprature bola basah (*wet bulb temperature drop*)

Laju aliran massa air, (kg/s)	TdB1a (°C)	TdB2 (°C)	TwB1a (°C)	WBE
0,0079	31,6	26,3	26,9	1,13
0,0158	30,9	26,5	26,9	1,10
0,0237	30,8	26,6	27,2	1,17
0,0316	31,4	26,3	26,6	1,11



Gambar 4.4 Grafik Selisih Penurunan Bola Basah (Wet Bulb)

Berdasarkan hasil pengolahan data tabel 4.2, dibuatkan grafik pada gambar 4.4. terlihat bahwa nilai wet bulb effectiveness tertinggi sebesar 117% sedangkan nilai terendah sebesar 110% terjadi pada laju aliran massa air 0,0158 kg/s. Kondisi wet bulb effectiveness tertinggi ini muncul saat udara masuk melalui saluran udara primer, dimana temperatur bola basah inlet mencapai 27,2 °C dan temperatur bola kering inlet berada pada nilai terendah yaitu 30,8 °C. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil selisih antara temperatur bola kering dan bola basah pada udara masuk, semakin tinggi wet bulb effectiveness yang dihasilkan. Dengan demikian, kinerja wet bulb effectiveness sangat dipengaruhi oleh kondisi udara masuk pada saluran udara primer sistem pendingin udara Maisotsenko. Nilai wet bulb effectiveness yang melebihi 100% pada pengujian ini menandakan bahwa temperatur bola basah udara inlet, yang berarti udara masuk dapat diinginkan hingga dibawah temperatur bola basah.

5. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa wet bulb effectiveness pada sistem Maisotsenko aliran parallel meningkat ketika selisih antara temperatur bola kering dan bola basah udara masuk semakin kecil. Efektivitas diatas 100% mengindikasikan bahwa udara keluaran dapat diinginkan hingga berada dibawah temperatur bola basah udara masuk, melampaui batas pendinginan evaporatif konvensional.

Daftar Pustaka

- [1] Amer, O., Boukhanouf, R., & Ibrahim, H. G. (2015). A review of evaporative cooling technologies. *International journal of environmental science and development*, 6(2), 111.
- [2] Dizaji, H. S., Hu, E. J., & Chen, L. (2018). A comprehensive review of the Maisotsenko-cycle based air conditioning systems. *Energy*, 156, 725-749.
- [3] Porumb, B., Bălan, M., & Porumb, R. (2016). Potential of indirect evaporative cooling to

reduce the energy consumption in fresh air conditioning applications. *Energy Procedia*, 85, 433-441.

- [4] Kashyap, S., Sarkar, J., & Kumar, A. (2020). Comparative performance analysis of different novel regenerative evaporative cooling device topologies. *Applied Thermal Engineering*, 176, 115474.
- [5] Gillan L. (2008). *Maisotsenko cycle for cooling processes*. Clean Air 2008;9:1-18



Ranu Moha Ray Jaijn menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Bali Dari tahun 2019 sampai 2025 ia menyelesaikan program sarjana dengan topik penelitian studi eksperimental performansi sistem pendinginan *maisotsenko parallel flow* dengan variasi laju aliran massa air

Bidang penelitian yang diminati yaitu Konversi Energi