

# Studi Eksperimental Performansi Sistem Pendinginan Maisotsenko Udara *Counter Flow* Dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Sekunder

Landi Pratama, Hendra Wijaksana dan I Gede Teddy Prananda Surya  
*Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali*

## Abstrak

Teknologi pendinginan evaporatif telah diterapkan secara luas selama lebih dari satu abad. Pendinginan evaporative menunjukkan potensi besar dalam aplikasi pendinginan yang ramah lingkungan dan efisien. Kekuatan pendorong utama proses pendinginan evaporatif adalah udara kering di luar ruangan dan air. Salah satu sistem pendinginan evaporatif ialah M-IEC yang menawarkan keuntungan dengan menurunkan suhu ke suhu bola basah tanpa meningkatkan kelembapan (konstan) dan membutuhkan daya listrik yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan siklus kompresi uap. M-IEC termasuk dalam pendinginan evaporative tidak langsung serta tergolong dalam pengembangan jenis pendinginan evaporative. Penelitian pada sistem pendinginan maisotsenko-Indirect Evaporative Cooling dilakukan dengan pola udara counter flow dengan memvariasikan laju aliran massa udara sekunder 0,055296 kg/s, 0,041472 kg/s dan 0,027648 kg/s. Pencarian data pada sistem pendinginan maisotsenko ini dilakukan pada temperature udara primer dan temperature udara sekunder. Pada laju aliran massa udara sekunder efektivitas bola basah dan efektivitas titik embun tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara 0,027648 yang masing masing mencapai nilai sebesar 17,9%; dan 14,6%. Sedangkan pada laju aliran massa udara sekunder 0,041472 kg/s kapasitas pendinginan dan ER mencapai nilai tertinggi yang masing-masing sebesar 0,06 Kw dan 0,12%.

Kata kunci: *Evaporative, massa udara, counter flow, temperature udara, penurunan temperature, kapasitas pendinginan, energi ratio.*

## Abstract

Evaporative cooling technology has been widely applied for more than a century. Evaporative cooling shows great potential in environmentally friendly and efficient cooling applications. The main driving forces of the evaporative cooling process are outdoor dry air and water. One evaporative cooling system is M-IEC which offers the advantage of lowering the temperature to wet bulb temperature without increasing humidity (constant) and requires much less electrical power compared to the vapor compression cycle. M-IEC is included in indirect evaporative cooling and is included in the development of evaporative cooling types. Research on the Maisotsenko-Indirect Evaporative Cooling cooling system was carried out with a counter flow air pattern by varying the secondary air mass flow rate of 0.055296 kg/s, 0.041472 kg/s and 0.027648 kg/s. The search for data on the Maisotsenko cooling system was carried out on primary air temperature and secondary air temperature. At the secondary air mass flow rate, the highest wet bulb effectiveness and dew point effectiveness were produced at an air mass flow rate of 0.027648, each of which reached a value of 17.9%; and 14.6%. Meanwhile, at a secondary air mass flow rate of 0.0415 kg/s, the cooling capacity and ER reach the highest values of 0.06 Kw and 0.12% respectively

Keywords: *Evaporative, air mass, counter flow, air temperature, temperature drop, cooling capacity, energy ratio.*

## 1. Pendahuluan

Dunia teknologi mengalami kemajuan yang pesat pada era ini, Sebagian besar banyak energi yang dikonsumsi di seluruh dunia terhubung ke sektor bangunan sehingga total energi yang dikonsumsi oleh bangunan di seluruh dunia adalah 30–40%, hampir sekitar 50% dari energi ini digunakan oleh bangunan dengan tujuan pengkondisian udara untuk memberikan kenyamanan manusia. Penggunaan energi yang dikonsumsi pada pendinginan pada bangunan harus dikurangkan, karena konsumsi energi ini menyebabkan peningkatan pemanasan global di seluruh dunia karena tingginya emisi gas rumah kaca di lingkungan. Dengan penggunaan sistem pendinginan udara yang setiap tahunnya mengalami peningkatan maka diperlukan sistem pendingin udara lebih hemat energi dengan metode pendinginan yang efisien, dan salah satu metodenya ialah pendinginan *evaporative*. Sistem pendingin *evaporative*

mengonsumsi sekitar seperempat energi listrik dibandingkan dengan sistem pendingin udara konvensional. Selain itu, sistem ini juga dapat mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan gas rumah kaca.[1].

Sistem pendinginan *evaporative* memiliki dua jenis yaitu sistem pendinginan *evaporative* langsung dan sistem pendinginan *evaporative* tidak langsung. Pada pendinginan evaporatif langsung mempunyai keterbatasan termodinamika utama: suhu akhir pada proses adalah suhu bola basah udara sekitar, namun suhu ini tidak mudah dicapai dan aliran udara yang dihasilkan lembab. Oleh karena itu, metode dan teknologi baru diperlukan untuk meningkatkan efisiensi pendingin udara evaporatif, yang mengarah pada pendinginan *evaporative* tidak langsung. Dalam kondisi iklim yang panas dan gersang penggunaan *Direct Evaporative Cooling* (DEC) jauh lebih efisien. Di sisi lain, *Indirect*

*Evaporative Cooling* (IEC) menawarkan keuntungan dengan menurunkan suhu ke suhu bola basah tanpa meningkatkan kelembapan (konstan) dan membutuhkan daya listrik yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan siklus kompresi uap. Efektivitas karena penurunan suhu sistem pendinginan *evaporative* langsung ditemukan 75-95%. Berbeda dengan sistem evaporasi tidak langsung yang memiliki efektivitas pendinginan yang rendah berkisar antara 40 - 60%. [2].

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, perlu peningkatan efektivitas pendinginan agar menghasilkan suhu udara keluar yang jauh lebih rendah merupakan pilihan yang tepat untuk kondisi iklim panas dan lembab. Siklus Maisotsenko merupakan gabungan proses termodinamika pertukaran panas dan pendinginan udara *evaporative* dalam pendinginan *evaporative* tidak langsung sehingga menghasilkan suhu produk yang mendekati "suhu titik embun" udara. Siklus ini menggunakan perbedaan entalpi udara pada suhu titik embun dan udara jenuh pada suhu lebih tinggi untuk membuang panas dari produk. Selain itu, siklus Maisotsenko memungkinkan cairan produk didinginkan hingga titik embun suhu udara masuk idealnya. Udara kemudian didinginkan terlebih dahulu sebelum dialirkan ke aliran pembuangan panas dimana air diuapkan. Siklus Maisotsenko ini diwujudkan dalam satu perangkat dan memungkinkan fluks panas tinggi dan penurunan tekanan rendah [3]. Karena suhu aliran udara saluran sekunder yang lebih rendah, *M-Cycle* terbukti memiliki potensi pendinginan yang tinggi dan batas pendinginan dapat menuju suhu titik embun. Selama beberapa tahun terakhir, banyak pendingin *M-Cycle* yang telah dikembangkan.[4]

Pada penelitian ini sistem pendinginan *M-Cycle* menggunakan tipe *non-ventury* agar udara yang masuk ke dalam *dry channel* mendapatkan kontak yang lebih lama pada dinding *wet channel* karena kecepatan udara masuk tipe *non-ventury* cenderung lebih lambat dibandingkan dengan tipe *ventury*, jika menggunakan *ventury* maka kecepatan udara masuk ke *dry channel* akan meningkat sehingga mengurangi kontak udara panas dari *dry channel* dengan dinding *wet channel* dengan begitu panas udara dari *dry channel* lebih sedikit diserap pada dinding *wet channel* berbeda dengan tipe *non-ventury* panas didalam saluran kering dapat diserap lebih banyak oleh dinding *wet channel*, disamping hal itu terdapat juga 5 jalur lubang yang dimana udara sekunder itu dialirkan ke saluran *wet channel*, diharapkan dengan jumlah 5 jalur lubang dapat menyerap panas lebih banyak di saluran *dry channel* primer karena semakin banyak udara yang masuk ke *wet channel* semakin banyak juga panas yang diserap. Selain itu alirannya aliran yang digunakan yaitu aliran *counter flow*, diharapkan dapat memberikan perpindahan panas yang tinggi antara saluran *dry channel* primer dengan *wet channel*

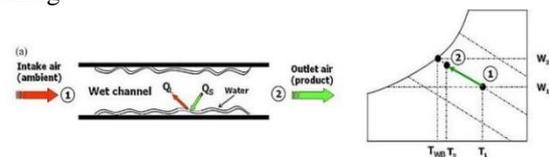
sehingga kapasitas pendinginannya juga dapat meningkat

Berdasarkan hal itu peneliti akan melakukan penelitian secara eksperimen yang berfokus pada performansi sistem pendinginan maisotsenko tipe *counter flow* terhadap variasi laju aliran massa udara sekunder

## 2. Dasar Teori

### 2.1. Pendinginan Evaporatif Langsung

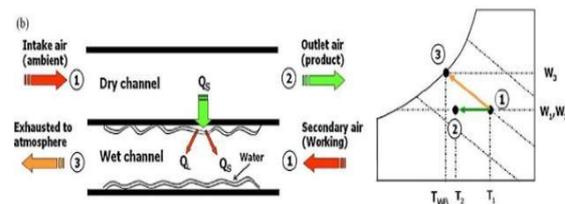
Pendingin *evaporative* langsung (*direct evaporative cooling*) adalah sistem dengan proses pendinginan yang melibatkan kontak langsung antara udara luar dan air yang menguap untuk menurunkan suhu udara akibat penguapan air. Pada proses ini umumnya udara ditarik sehingga melewati media basah dimana air akan menguap dan mendinginkan udara sebelum dialirkan ke dalam ruangan. Proses ini efektif menurunkan suhu udara dan dapat meningkatkan kelembapan udara. Keuntungan dari DEC yaitu efisiensi energi yang tinggi dan biaya operasional yang rendah dan bermanfaat di iklim kering.



Gambar 1 Pendinginan *evaporative* langsung

### 2.2. Pendinginan Evaporative Tidak Langsung

Pendingin *evaporative* tidak langsung (*indirect evaporative cooling*) adalah pendinginan dengan mengurangi panas sensibel udara tanpa mengubah kelembapannya. Skema prinsip kerja IEC adalah udara primer (atau produk) yang hangat mengalir di dalam saluran kering dan memindahkan panas melalui permukaan panas ke saluran basah. Di saluran keluar, terdapat udara primer (atau produk) memiliki suhu yang lebih rendah dari pada di saluran masuk, karena panas yang dipindahkan. Proses jalur aliran 1-2, udara masuk menghilangkan panas sensibel ke sisi basah untuk penguapan air dan udara sekunder didinginkan dengan kontak langsung dengan air sebagai jalur 1-3. mekanisme perpindahan panas antara udara kerja dan air di saluran basah adalah dengan panas laten penguapan air. Jadi efektivitas bola basah dari sistem ini dapat lebih

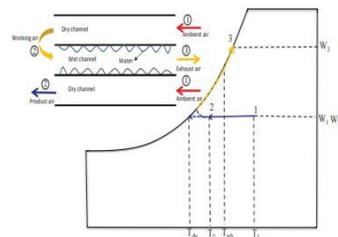


rendah dari sistem DEC.

Gambar 2. Pendinginan *evaporative* Tidak langsung

### 2.3. Siklus Maisotsenko (*M-Cycle*)

Siklus Maisotsenko (*M-Cycle*) dianggap sebagai pengembangan dari teknologi (IEC) yang terkenal dengan aliran udara sekunder pra-pendinginan sebelum memasuki saluran udara sekunder. Karena suhu aliran udara saluran sekunder yang lebih rendah, *M-Cycle* terbukti memiliki potensi pendinginan yang tinggi dan batas pendinginan dapat memperoleh suhu titik embun aliran udara masuk. Prinsip kerja pendinginan evaporatif siklus maisotsenko terdiri dari tiga saluran, dua saluran kering di bagian atas dan bawah, sedangkan satu saluran basah berada di tengah-tengah antara saluran kering. Udara yang didinginkan secara masuk akan melalui saluran kering bawah memindahkan panas ke saluran basah yang berdekatan mengikuti jalur 1-2 dan disuplai ke ruang pengkondisian. Udara yang melewati saluran kering bagian atas dialihkan ke saluran basah sebagai udara kerja mengikuti jalur 2-3, kemudian dibuang ke atmosfer. Jenis pola aliran ini memungkinkannya mendekati suhu titik embun pasokan udara [5]



Gambar 3. Siklus Pendinginan maisotsenko

### 2.4. Dry Bulb Temperature Drop (Bola Kering)

Suhu bola kering adalah suhu udara yang paling umum digunakan. Pengukuran bola kering pada dasarnya mengacu pada suhu udara atau media di sekitarnya. Disebut Bola Kering karena kelembaban tidak mempengaruhi suhu udara yang dibaca oleh *thermometer*. [6]

### 2.5. Temperature Dry 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.:

### 2.8. Laju Aliran Massa

Efektivitas titik embun dapat meningkat atau menurun dengan peningkatan laju aliran massa udara tergantung pada suhu saluran masuk udara. Peningkatan laju aliran udara mengurangi efektivitas titik embun dari pendingin *evaporative*. Efek pendinginan berkurang karena laju aliran yang meningkat mengurangi waktu interaksi pertukaran

panas dan massa.

### 2.7. Kapasitas Pendinginan

Didefinisikan sebagai perbedaan entalpi antara udara suplai dan udara produk [7].

## 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 sekunder 0,055296 kg/s, 0,041472 kg/s dan 0,027648 kg/s terhadap laju aliran massa udara primer yang konstan pada laju aliran massa udara 0,06912 kg/s. Adapun tahapan-tahapan penelitiannya sebagai berikut.

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 sekunder
4. Pencatatan data
5. Penganalisisan data, pembahasan, pembuatan grafik dan Kesimpulan

### 3.2. Alat dan Bahan

1. UNI-T UT333 *Thermometer Hygrometer Humidity*
2. HT-9815 *Thermocouple 4 Channel HTI* HT9815 Probe *Termometer Termocouple*
3. *Digital wind anemometer* - dengan range 0 – 30 m/s
4. Pompa pengabut
5. *Nozzel*
6. Dimer
7. *Stopwatch*
8. Plat aluminium dan plat tembaga
9. Riped dan paku riped
10. Gerinda dan Bor
11. Blower Keong
12. *Flexible hose*
13. *Aluminium Foil*
14. *Glasswool*

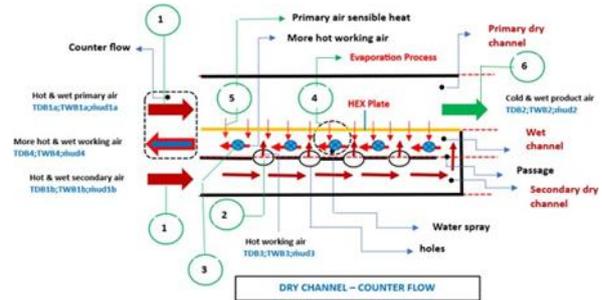
### 3.3. Cara Kerja Alat Uji

1. udara lingkungan akan masuk melalui *inlet primary dry channel* dan *inlet secondary dry channel* dengan variasi laju aliran massa udara *skunder:primer*. Maka dengan variasi laju aliran massa, udara sekundernya diatur masing-masing secara berurutan dengan kecepatan aliran udara sekunder 1, 2 dan 3 sebesar 7,2m/s, 5,4m/s, dan 3,6m/s, sedangkan kecepatan aliran udara primer, baik untuk kecepatan

- aliran udara sekunder 1, 2, dan 3 akan dijaga konstan sebesar 9m/s
- 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.
  - 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.
  - Kontak langsung antara udara dengan kabut air akan mengakibatkan 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.
  - 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.
  - 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*.

### 3.4. Prosedur Pengujian

Pertama pemasangan alat uji sistem Maisotsenko dilakukan di Lab. Keahlian. Kedua alat pengukuran temperatur bola kering serta kecepatan aliran udara dipasang pada sisi *inlet* udara primer, sisi *inlet* udara sekunder, sisi *outlet* udara produk, dan sisi *outlet* udara kerja pada saluran basah dan saluran kering. Ketiga blower dihidupkan dan kecepatan aliran udara



**Gambar 4. Prinsip kerja sistem pendinginan maisotsenko aliran counter flow**

primer dan sekunder, dengan  $\dot{m}$  udara sekunder sebesar 0,0553 kg/s dan udara primer sebesar 0,0691 kg/s. Keempat pompa pengabut air juga dihidupkan. Kelima setelah semua sistem aktif, sistem dibiarkan stabil sebelum pengujian dilakukan dengan pencatatan data setiap 5 menit selama 30 menit. Keenam setelah 30 menit, blower dan pompa dimatikan, dan sistem didiamkan selama 30 menit hingga suhu udara pada saluran basah dan kering kembali ke temperatur awal. Ketujuh langkah-langkah ini diulang untuk rasio kecepatan aliran udara sekunder 0,6 ( $V_{ud.sekunder2.primera} = 5,4 \text{ m/s} : 9,0 \text{ m/s}$ ) dan rasio 0,4 ( $V_{ud.sekunder3.primera} = 3,6 \text{ m/s} : 9,0 \text{ m/s}$ ), di mana  $\dot{m}$  udara sekunder 2 dan sekunder 3 berturut-turut adalah 0,0553 kg/s, 0,0415 kg/s, dan 0,0276 kg/s, dengan  $\dot{m}$  udara primer tetap pada 0,0691 kg/s. (8) Pengujian selesai.

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1. Data Hasil Penelitian

Pengujian eksperimental dilakukan pada sistem 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 masing-masing secara berurutan pada Tabel 1, Tabel 3 dan Tabel 5. Untuk data hasil perhitungan menggunakan diagram psikometrik *chart* dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 4 dan Tabel 6.

**Tabel 1. Data hasil pengujian eksperimental pada laju aliran massa sekunder 0,055296 kg/s**

Waktu (Menit)	Data Primer (Data Eksperimental) Temperature Dry Bulb (TDB) dan Outlet RH					
	Tdb1a (°c)	Tdb 1b (°c)	Tdb 2(°c)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°c)	Rh 3(%)
5	32,1	32,4	31,4	66	24,2	91,6
10	32,4	32,9	31,6	63,3	25,8	91,7
15	32,1	32,5	31,3	62,4	25,5	91,8
20	32,5	33	31,6	63,3	25,3	91,8
25	32,3	32,8	31,3	62,8	25,1	91,9
30	32,4	33,2	31,4	62,6	25,1	91,9
$\bar{x}$	32,3	32,9	31,4	63,9	25,4	91,8

**Tabel 2. Data hasil perhitungan dengan diagram psikometrik chart laju aliran massa udara sekunder 0.055296 kg/s**

Waktu (Menit)	Data Sekunder (Perhitungan Pada Diagram Psikometrik Chart) Temperature Wet Bulb (TWB), Inlet Relative Humidity (RH), Temperature Dew Point (TDP), Absolute Ratio							
	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	T dew 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio g/kg (d.a)
5	25.7	63.4	24.3	25.7	62.4	25.5	24.2	19.2
10	25.9	63.4	24.5	26	61.6	25.7	24	19.5
15	25	59.6	23.3	25.1	58.3	24.8	23.9	18.1
20	25.4	60.2	23.8	25.6	58.5	25.2	23.7	18.6
25	25.1	59	23.3	25.2	57.4	24.8	23.5	18.1
30	25.2	59.2	23.4	25.3	56.6	24.9	23.5	18.2
$\bar{x}$	25.4	60.8	23.8	25.5	59.1	25.2	23.8	18.6

**Tabel 3. Data hasil pengujian eksperimental pada laju aliran massa sekunder 0.041472 kg/s**

Waktu (Menit)	Data Primer (Data Eksperimental) Temperature Dry Bulb (TDB) dan Outlet RH					
	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32.5	33.4	31.6	61.8	25.5	89.8
10	34.1	32.8	32.7	60.9	25.2	91.2
15	34.3	32.6	32.9	59.2	25.5	91.5
20	34.6	32.5	33	57.5	25.7	91.6
25	34.8	33	33.1	56.2	25.9	91.6
30	34.9	33.2	33.2	53.7	25.5	91.4
$\bar{x}$	34.2	32.9	32.8	58.2	25.5	91.1

**Tabel 4. Data hasil perhitungan dengan diagram psikometrik chart laju aliran massa udara sekunder 0.041472 kg/s**

Waktu (Menit)	Data Sekunder (Perhitungan Pada Diagram Psikometrik Chart) Temperature Wet Bulb (TWB), Inlet Relative Humidity (RH), Temperature Dew Point (TDP), Absolute Ratio							
	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	T dew 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio g/kg (d.a)
5	25.2	58.7	23.4	25.4	55.8	25	23.6	18.1
10	26	56.3	24.2	25.7	60.5	25.7	23.5	19.1
15	25.9	54.7	23.9	25.5	60.2	25.6	23.9	18.7
20	25.7	52.6	23.5	25.3	59.1	25.4	24.1	18.3
25	25.6	51.1	23.2	25.2	56.5	25.2	24.3	18.1
30	25.2	48.9	22.6	24.8	53.7	24.8	23.9	17.2
$\bar{x}$	25.6	53.7	23.4	25.3	57.6	25.2	23.8	18.3

**Tabel 5. Data hasil pengujian eksperimental pada laju aliran massa sekunder 0.027648 kg/s**

Waktu (Menit)	Data Primer (Data Eksperimental) Temperature Dry Bulb (TDB) dan Outlet RH					
	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32.8	34	31.7	65.6	25.8	90.5
10	32.5	34.8	31.7	63.7	26.2	91
15	34.2	34.8	32.9	62.2	26.6	91.2
20	34.9	34.5	33.3	61.1	26.4	91.4
25	34.8	33.9	33.3	60	26.3	91.6
30	34.6	33.6	33.1	58.8	26.5	91.6
$\bar{x}$	34	34.2	32.6	61.9	26.3	91.2

**Tabel 6. Data hasil perhitungan dengan diagram psikometrik chart laju aliran massa udara sekunder 0.027648 kg/s**

Waktu (Menit)	Data Sekunder (Perhitungan Pada Diagram Psikometrik Chart) Temperature Wet Bulb (TWB), Inlet Relative Humidity (RH), Temperature Dew Point (TDP), Absolute Ratio							
	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	T dew 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio g/kg (d.a)
5	26	61.8	24.5	26	57.8	25.7	24	19.5
10	25.6	60.9	24	26.1	53.5	25.4	24.5	18.8
15	26.5	57.6	24.8	26.6	56.3	26.2	24.9	19.8
20	26.7	55.9	24.8	26.6	57.1	26.3	24.7	19.8
25	26.4	55.2	24.5	26.2	58	26.1	24	19.4
30	26	54.1	24	25.8	57.2	25.7	24.8	18.8
$\bar{x}$	26.2	57.5	24.4	26.2	56.6	25.9	24.4	19.4

**4.2. Selisih Penurunan Temperature 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.

$$\Delta T_{db} = T_{dbin} - T_{dbout} = T_{db1a} - T_{db2} \quad (1)$$

**Tabel 7. Selisih penurunan TDB**

m.sekunder(kg/s)	Tdb1a (°C)	Tdb2 (°C)	ΔTdb (°C)
0,055296	32,3	31,4	0,9
0,041472	34,2	32,8	1,4
0,027648	34	32,6	1,4

Pada Tabel 7. dapat dilihat bahwa selisih penurunan temperatur bola kering tertinggi didapat pada laju aliran massa udara sekunder 0,027648 kg/s dan 0,041472 kg/s.

**4.3. Efektifitas Bola Basah (Wet Bulb Effectiveness)**

Efektifitas Bola Basah merupakan ukuran kemampuan sistem pendingin Maisotsenko untuk mendinginkan udara hingga dibawah temperatur bola basah udara inlet (TWb). Performansi pendinginan ini dapat ditentukan berdasarkan persamaan:

$$\epsilon_{wb} = \frac{T_{dbin} - T_{dbout}}{T_{dbin} - T_{wb_{in}}} \times 100\% \quad (2)$$

**Tabel 8. Efektifitas bola basah**

m.sekunder(kg/s)	Tdb1a (°C)	Tdb2 (°C)	Twb1a (°C)	WB.Eff (%)
0,055296	32,3	31,4	25,4	13,1
0,041472	34,2	32,8	25,6	16,3
0,027648	33	32,6	26,2	17,9

Tabel 8. memperlihatkan hasil wet bulb effectiveness (WBE) yang mana hasil tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara sekunder 0,027648 kg/s. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya WBE sangat tergantung pada kondisi udara primer inlet termasuk didalamnya TBK dan TBB udara primer inlet, serta juga tergantung pada laju aliran massa udaranya.

**4.4. Efektifitas Titik Embun (Dew Point Effectiveness)**

Dew point effectiveness (DPE) merupakan ukuran kemampuan sistim pendingin Maisotsenko untuk mendinginkan udara hingga mendekati temperatur pengembunannya (dew point temperature). Besarnya DPE dapat ditentukan menggunakan persamaan seperti dibawah.

$$\epsilon_{dp} = \frac{T_{dbin} - T_{dbout}}{T_{dbin} - T_{dpin}} \times 100\% \quad (3)$$

**Tabel 9. Efektifitas suhu titik embun**

m.sekunder(kg/s)	Tdb1a (°C)	Tdb2 (°C)	Tdew1a (°C)	WB.Eff (%)
0,055296	32,3	31,4	23,8	10,6
0,041472	34,2	32,8	23,4	13
0,027648	34	32,6	24,4	14,6

Berdasarkan pada Tabel 9. dapat dilihat bahwa *dew point effectiveness* (DPE) tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara sekunder 0,027648 kg/s. Hal ini didapatkan karena dengan kapasitas panas udara yang lebih besar yang dialirkan, maka akan lebih banyak panas sensibel udara terserap oleh plat penukar panas secara konveksi sehingga menghasilkan selisih temperatur bola kering.

#### 4.5. Kapasitas Pendinginan (*Cooling Capacity*)

Kapasitas pendinginan merupakan ukuran kemampuan sistim pendingin untuk memindahkan sejumlah panas dari udara yang akan didinginkan per-satu satuan waktu. Besarnya kapasitas pendinginan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$QC = \dot{m}. C_p. \Delta T \quad (4)$$

**Tabel 10. Kapasitas Pendinginan**

$\dot{m}$ .udara (kg/s)	$C_p$ (kJ/kg.K)	$\Delta TDB(^{\circ}C)$	$Q_c$ (Kw)
0,055296	1,005	0,9	0,05
0,041472	1,005	1,4	0,06
0,027648	1,005	1,4	0,04

Pada Tabel 10. dapat dilihat bahwa kapasitas pendinginan tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara sekunder 0,041472 kg/s

#### 4.6. Energy Ratio (ER)

*Energy ratio* (ER) merupakan perbandingan antara kapasitas pendinginan yang dihasilkan dan energi input yang digunakan. Pada pengujian ini digunakan 2 buah blower masing- masing untuk saluran udara primer dan saluran udara kering dengan daya listrik sebesar 250 W dan 260 W. Besarnya ER ini dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut.

$$ER = \frac{Q_c}{P} \quad (5)$$

**Tabel 11. Energy Ratio**

$\dot{m}$ (kg/s)	$Q_c$ (kW)	P (kW)	ER
0,055296	0,05	0,51	0,10
0,041472	0,06	0,51	0,12
0,027648	0,04	0,51	0,08

Berdasarkan pada Tabel 11. dapat diperlihatkan bahwa *energy ratio* (ER) tertinggi dihasilkan pada laju aliran massa udara sekunder 0,041472 kg/s. Dari hasil pengujian tersebut, dapat dikatakan bahwa pada besarnya daya input yang sama, besarnya ER sangat tergantung pada kapasitas pendinginan yang dihasilkan.

### 5. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian pada sistem pendinginan maisotsenko pola *counter flow* dengan variasi laju aliran massa udara sekunder, didapatkan data dan hasil performansi sistem pendinginannya dengan kesimpulan sebagai berikut:

- Selisih penurunan temperatur bola kering ( $\Delta TDB$ ) tertinggi didapatkan pada variasi laju aliran massa udara sekunder 0,041472 kg/s dengan penurunan temperatur bola kering sebesar 1,4 $^{\circ}C$ , sedangkan penurunan temperatur bola kering terendah ada pada variasi laju aliran massa udara sekunder 0,055296 kg/s dengan penurunan temperatur bola kering sebesar 0,9  $^{\circ}C$ .
- Hasil Efektivitas bola basah ( $\epsilon_{wb}$ ) dan efektivitas titik embun ( $\epsilon_{dp}$ ) tertinggi dan terendah terjadi pada laju aliran massa udara sekunder yang sama. Dengan ( $\epsilon_{wb}$ ) dan ( $\epsilon_{dp}$ ) tertinggi terjadi pada laju aliran massa udara sekunder 0,027648 kg/s sedangkan ( $\epsilon_{wb}$ ) dan ( $\epsilon_{dp}$ ) terendah terjadi pada laju aliran massa udara sekunder 0,055296 kg/s. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa dengan laju aliran massa udara primer *inlet* yang rendah, diikuti juga dengan TBK udara primer *inlet* yang rendah, akan menghasilkan ( $\epsilon_{wb}$ ) dan ( $\epsilon_{dp}$ ) yang lebih tinggi.
- Kapasitas pendinginan ( $Q_c$ ) tertinggi terjadi pada laju aliran massa udara sekunder 0,041472 kg/s, sedangkan kapasitas pendinginan terendah terjadi pada laju aliran massa udara sekunder 0,027648 kg/s. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa semakin tinggi laju aliran massa udaranya, akan menghasilkan kapasitas pendinginan yang lebih besar.
- Energy ratio* (ER) tertinggi terjadi pada laju aliran massa udara sekunder 0,041472 kg/s dengan *energi ratio* sebesar 0,12 sedangkan *energi ratio* terendah. terjadi pada laju aliran massa udara sekunder 0,027648 kg/s dengan nilai *energi ratio* sebesar 0,08. Maka dengan besaran daya input yang sama, besarnya ER sangat tergantung pada kapasitas pendinginan yang dihasilkan, dimana kapasitas pendinginan juga akan meningkat dengan meningkatnya laju aliran massa udara sekunder yang lebih besar.

### Daftar Pustaka

- [1] Anisimov, S., Pandelidis, D., & Danielewicz, J. (2014). *Numerical analysis of selected evaporative exchangers with the Maisotsenko cycle*. Energy Conversion and Management, 88, 426–441.
- [2] Khalid, O., Ali, M., Sheikh, N. A., Ali, H. M., & Shehryar, M. (2016). *Experimental analysis of an improved Maisotsenko cycle design under low velocity conditions*. Applied Thermal Engineering, 95, 288–295.

- [3] Caliskan, H., Hepbasli, A., Dincer, I., & Maisotsenko, (2011). *Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle*. International Journal of Refrigeration, 34(4), 980–990.
- [4] Pandelidis, D., Cichoń, A., Pacak, A., Drag, P., Drag, M., Worek, W., & Cetin, S. (2020). *Performance study of the cross-flow Maisotsenko cycle in humid climate conditions*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 115, 104581.
- [5] Kashif Shahzad, M., Ali, M., Ahmed Sheikh, N., Qadar Chaudhary, G., Shahid Khalil, M., & Rashid, T. U. (2018). *Experimental evaluation of a solid desiccant system integrated with cross flow Maisotsenko cycle evaporative cooler*. Applied Thermal Engineering, 128, 14761487.
- [6] Sadighi Dizaji, H., Hu, E. J., & Chen, L. (2018). *A comprehensive review of the Maisotsenko-cycle based air conditioning systems*. Energy, 156, 725–749.
- [7] Lin, J., Thu, K., Karthik, S., Shahzad, M. W., Wang, R., & Chua, K. J. (2021). *Understanding the transient behavior of the dew point evaporative cooler from the first and second law of thermodynamics*. Energy Conversion and Management, 244, 114471

