

Studi Eksperimental Performansi Sistem Pendinginan Maisotsenko Udara Parallel Flow Dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Primer

Tegar Ramadhan, Hendra Wijaksana, dan I Gede Teddy Prananda Surya
Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

Abstrak

Permintaan energi terus meningkat seiring urbanisasi, ketersediaan sumber energi, dan pertumbuhan populasi. Sekitar 50% energi digunakan untuk pendinginan bangunan. Sistem pendinginan konvensional, seperti kompresi uap, boros energi dan berkontribusi terhadap pemanasan global. Solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan adalah teknik pendingin evaporatif, tapi efektivitas pendingin evaporatif umumnya rendah, yang merupakan kelemahan utama. Namun, ada siklus termodinamika baru yang dikenal sebagai siklus Maisotsenko, dengan ide utamanya adalah untuk mendinginkan udara yang masuk ke saluran basah melalui bagian kering dari saluran basah tersebut. Pada Penelitian ini menggunakan pendingin Maisotsenko aliran udara parallel dengan variasi \dot{m} primer 0,0553 kg/s ; 0,0415 kg/s ; 0,0276 kg/s dan \dot{m} dijaga konstan 0,0691 kg/s. Dan selanjutnya akan dilakukan pengambilan data pada temperatur udara primer, temperatur udara sekunder, dan temperatur udara kerja. Pada \dot{m} udara 0,0276 kg/s penurunan temperatur; efektivitas titik embun basah; dan efektivitas titik embun mencapai nilai tertinggi sebesar 2,1°C; 27,63%; dan 19,81%. Ketika \dot{m} primer 0,0415 kg/s, kapasitas pendinginan meningkat menjadi yang paling tinggi sebesar 58,45 W. Selanjutnya pada \dot{m} primer 0,0276 kg/s EER mencapai 48,6%.

Kata kunci: M-Cycle, Pendingin Evaporatif, Sistem Pendinginan, Penurunan Temperatur

Abstract

Energy demand continues to rise along with urbanization, energy availability, and population growth. About 50% of energy is used for building cooling. Conventional cooling systems, such as vapor compression, are energy-intensive and contribute to global warming. A more efficient and environmentally friendly solution is evaporative cooling techniques, but the effectiveness of evaporative coolers is generally low, which is their main drawback. However, there is a new thermodynamic cycle known as the Maisotsenko cycle, whose purpose is to cool the incoming air into the wet channel through the dry part of the wet channel. In this study, a Maisotsenko cooler with parallel airflow was used with variations in primary air \dot{m} of 0.0553 kg/s, 0.0415 kg/s, and 0.0276 kg/s, while the secondary \dot{m} was kept constant at 0.0691 kg/s. Data collection was conducted on the primary air temperature, secondary air temperature, and working air temperature. At a primary air \dot{m} of 0.0276 kg/s, the temperature drop, wet bulb effectiveness, and dew point effectiveness reached their highest values of 2.1°C, 27.63%, and 19.81%, respectively. When the primary air \dot{m} was 0.0415 kg/s, the cooling capacity increased to the highest value of 58.45 W. Additionally, at a primary air \dot{m} of 0.0276 kg/s, the Energy Efficiency Ratio (EER) reached 48.6%.

Keywords: M-Cycle, Evaporative Cooling, Parallel Flow, Cooling System, Temperature Drop

1. Pendahuluan

Di era modern ini, konsumsi energi menjadi isu yang semakin penting untuk diperhatikan. Permintaan energi terus meningkat seiring dengan urbanisasi, ketersediaan sumber energi konvensional dan terbarukan, serta pertumbuhan populasi yang cepat. Salah satu sektor utama yang mengonsumsi listrik adalah sektor bangunan, yang saat ini menggunakan lebih dari 20% dari total energi primer global. Sekitar 50% dari energi ini digunakan untuk keperluan pendinginan bangunan. Sistem pendinginan konvensional umumnya menggunakan sistem kompresi uap yang sangat boros energi dan berkontribusi terhadap pemanasan global karena penggunaan refrigeran *Chlorofluorocarbon*. Oleh karena itu, Pendekatan yang paling potensial untuk menyelesaikan masalah ini adalah teknik *Evaporative Cooling* (EC) dapat mengurangi konsumsi energi dalam skala besar dan jauh lebih efisien [1]. Sistem pendinginan evaporatif konvensional bekerja dengan cara menurunkan suhu udara proses hingga mendekati

suhu bola basahnya[2]. Sistem pendingin evaporatif dibagi menjadi dua, yaitu Pendingin evaporatif langsung dan Pendingin evaporatif tidak langsung [3]. Secara umum, IEC dapat mendinginkan udara hingga suhu lebih rendah dan menghindari penambahan kelembaban ke udara dibandingkan dengan DEC. Oleh karena itu, IEC memiliki rentang aplikasi yang lebih luas [4]. Efektivitas IEC umumnya rendah, sekitar 0,40 hingga 0,60, yang merupakan kelemahan utama. Namun, ada siklus termodinamika baru yang dikenal sebagai siklus Maisotsenko, yang dianggap sebagai terobosan teknologi dan dapat mengatasi kelemahan tersebut. Siklus Maisotsenko menggabungkan proses termodinamika pertukaran panas dan pendinginan udara evaporatif dalam pendingin udara evaporatif tidak langsung [5].

Pada Penelitian ini menggunakan sistem pendingin *M-Cycle evaporative cooling* dengan udara *parallel flow*. Rumusan masalah, yaitu bagaimana performansi sistem pendinginan maisotsenko udara *parallel flow* dengan variasi laju aliran massa udara

primer. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi eksperimental terhadap performansi sistem pendinginan Maisotsenko dengan konfigurasi aliran udara *parallel flow* dan berfokus mengevaluasi efek dari variasi laju aliran massa udara primer terhadap efisiensi pendinginan dan performa keseluruhan sistem.

Penelitian ini dibatasi oleh hal-hal berikut:

1. Sistem dianggap terisolasi sempurna.
2. Suhu udara lingkungan atau ruangan tempat pengujian dianggap konstan.
3. Suhu air dianggap konstan.
4. Densitas udara dianggap konstan ($\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$)
5. Laju aliran massa udara sekunder diatur konstan

2. Dasar Teori

2.1. Pendinginan Evaporatif Langsung

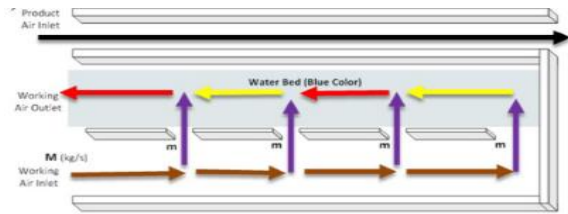
Dalam pendinginan evaporatif langsung, udara panas dan kering mengalir melalui bahan berpori yang permukaannya dijaga tetap basah secara merata. Bahan berpori ini dianggap terisolasi dari lingkungan, sehingga pertukaran panas hanya terjadi antara udara dan air: selama udara melewati bahan berpori tersebut, udara menjadi lebih lembap (menggunakan panas laten) dan didinginkan (menggunakan panas sensible). Secara teoritis, selama suhu air sama dengan suhu bola basah udara, pertukaran ini bersifat isenthalpik dan panas laten dalam nilai absolut sama dengan panas sensible. [6]

2.2. Pendinginan Evaporatif Tidak Langsung

Pada IEC, terdapat dua saluran terpisah untuk udara primer dan sekunder. Udara primer dalam saluran kering didinginkan oleh udara kerja, yang didinginkan oleh penguapan air dalam saluran basah. Prinsip kerja saluran basah mirip dengan DEC di mana udara kerja berkontak langsung dengan air. Batas teoritis pendinginan udara primer adalah suhu bola basah udara ambient masuk tetapi umumnya hanya dapat mencapai efektivitas bola basah 50–80%. [3]

2.3. Siklus Maisotsenko (*M-Cycle*)

M-Cycle bekerja berdasarkan prinsip pendinginan evaporatif tidak langsung, namun dengan pola aliran yang berbeda. Ditunjukkan pada Gambar 1, siklus ini menggunakan dua saluran; saluran produk dan saluran basah. Bagian yang membedakan *M-cycle* adalah pola aliran di saluran basah. Ide utamanya adalah untuk mendinginkan udara yang masuk ke saluran basah melalui bagian kering dari saluran basah tersebut. Setelah bercampur, udara di sisi basah menjadi lembap melalui proses evaporasi dan menyerap panas dari sisi produk/pasokan. Akhirnya, udara kerja ini akan dilepaskan ke atmosfer. Secara teoritis, suhu udara pasokan dapat turun hingga di bawah suhu bola basah dan mencapai suhu titik embun dari udara masuk yang datang. [7]



Gambar 1. Skematik sistem pendingin *M-cycle*

2.4. Dry Bulb Temperature Drop

Perbedaan suhu di sepanjang saluran kering diukur dengan mengambil selisih antara temperatur udara keluar dan temperatur udara masuk [1]. Dapat dinyatakan sebagai:

$$\Delta T = T_{ain} - T_{ao} \quad (1)$$

ΔT = Temperature Drop ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ain} = suhu udara masuk ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ao} = suhu udara keluar ($^{\circ}\text{C}$)

2.5. Efektivitas Bola Basah

Rasio perbedaan antara suhu udara masuk dan keluar terhadap perbedaan antara asupan temperatur udara dan temperatur bola basahnya [2]. Dapat dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon_{wb} = \frac{t_{db\ in} - t_{db\ out}}{t_{db\ in} - t_{wb\ in}} \quad (2)$$

$t_{db\ out}$ = suhu udara bola kering keluar ($^{\circ}\text{C}$)
 $t_{db\ in}$ = suhu udara bola kering masuk ($^{\circ}\text{C}$)
 ε_{wb} = Efektivitas bola basah ($^{\circ}\text{C}$)
 $t_{wb\ in}$ = Suhu bola basah masuk ($^{\circ}\text{C}$)

2.6. Efektivitas Titik Embun

Rasio perbedaan antara suhu udara masuk dan keluar terhadap perbedaan antara suhu udara masuk dan suhu titik embunnya [4]. Efektivitas titik embun didefinisikan sebagai:

$$\varepsilon_{dew} = \frac{t_{db\ in} - t_{db\ out}}{t_{db\ in} - t_{dew}} \quad (3)$$

$t_{db\ out}$ = suhu bola kering keluar ($^{\circ}\text{C}$)
 $t_{db\ in}$ = suhu bola kering masuk ($^{\circ}\text{C}$)
 $\varepsilon_{dew\ in}$ = Efektivitas titik embun
 t_{dew} = Suhu titik embun ($^{\circ}\text{C}$)

2.7. Kapasitas Pendinginan

Kapasitas pendinginan (CC) menunjukkan kemampuan sistem untuk menangani beban pendinginan. Kapasitas ini merupakan hasil kali dari perbedaan suhu di seluruh sistem dan laju aliran massa udara [1]. Dapat dinyatakan sebagai:

$$CC = \dot{m} C_p (T_{ain} - T_{ao}) \quad (4)$$

C_p = Specific heat of air (kJ/kgK)

- \dot{m} = Laju Aliran Massa udara produk (kg/s)
- $T_{a_{in}}$ = suhu udara masuk ($^{\circ}C$)
- T_{a_o} = suhu udara keluar ($^{\circ}C$)
- CC = kapasitas pendinginan (W)

2.8. EER (Energy Efficiency Ratio)

EER dihitung untuk setiap uji eksperimen menggunakan persamaan [8] :

$$EER = \frac{QC}{W} \quad (5)$$

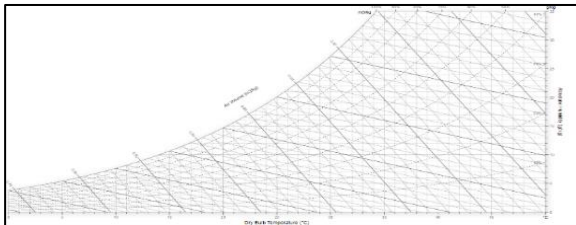
EER = Energy efficiency ratio

QC = Kapasitas pendinginan (Kw)

W = Input daya blower dan Pompa (Watt)

2.9. Diagram Psikrometrik

Diagram psikrometrik dibuat untuk secara grafis menggambarkan semua sifat udara lembab yang diperlukan dalam perhitungan pendingin udara. Nilai-nilai tersebut didasarkan pada pengukuran aktual yang telah diverifikasi untuk konsistensi termodinamis. [9]

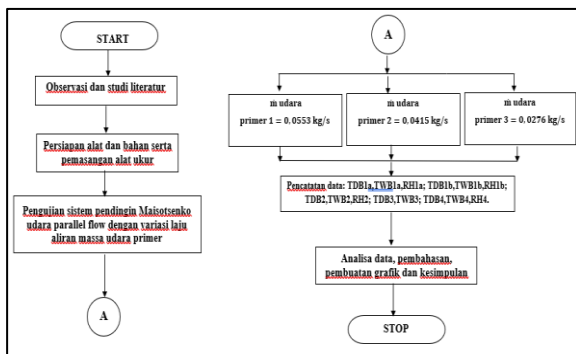


Gambar 2. Diagram Psikrometrik

3. Metode Penelitian

3.1. Diagram Alir Penelitian

Diagram memuat proses penelitian, ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

3.2. Variabel Penelitian

- Variabel Bebas
 - \dot{m} udara primer 1 = 0,0553 kg/s
 - \dot{m} udara primer 2 = 0,0415 kg/s
 - \dot{m} udara primer 3 = 0,0276 kg/s
- Variabel Terikat : *dry bulb temperature drop; wet bulb effectiveness; dew point*

effectiveness; cooling capacity; energy efficiency ratio.

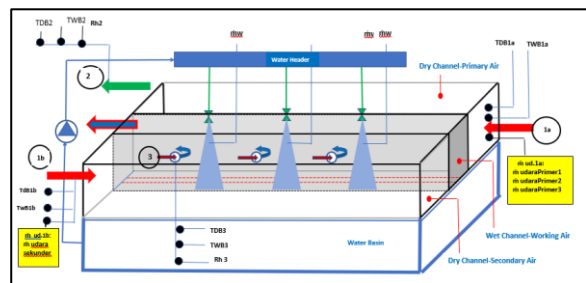
- Variabel Kontrol
 - laju aliran massa air (\dot{m} air)
 - \dot{m} udara sekunder = 0.0276 kg/s

3.3. Alat dan Bahan

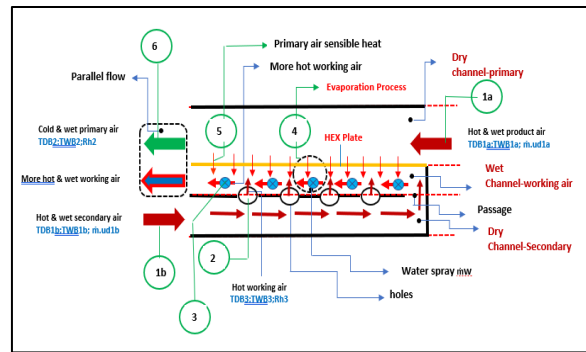
UNI-T UT333 *Thermometer Hygrometer Humidity, Digital wind anemometer* - dengan range 0 – 30 m/s, Pompa pengabut, *Nozzel, Dimer, Stopwatch*, Plat alumunium dan plat tembaga, *Riped* dan paku *riped*, Gerinda dan Bor, Blower Keong, *Flexible hose, Alumunium Foil, Glasswool*

3.4. Pelaksanaan pengujian

Udara *parallel flow* terjadi antara udara primer outlet pada *dry channel* dengan udara kerja outlet pada *wet channel* seperti tampak pada Gambar 4, dan gambar 5.



Gambar 4. Titik Pengukuran sistem Maisotsenko udara *parallel flow* dengan \dot{m} primer



Gambar 5. Prinsip Kerja Alat Uji Maisotsenko Udara *Pararel Flow*

Berdasarkan skematik diagram pada Gambar 5 dapat dijelaskan cara kerja alat uji sebagai berikut (1) udara lingkungan akan masuk melalui *inlet primary dry channel* dan *inlet secondary dry channel*, Selanjutnya udara yang masuk pada *primary dry channel* akan disebut sebagai udara primer, sedangkan udara lingkungan yang masuk pada *secondary dry channel* akan disebut sebagai udara sekunder (2) udara sekunder pada *secondary dry channel*, selanjutnya akan masuk pada *wet channel* melalui setiap lubang (terdapat 4 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*. (4) Kontak langsung antara udara kerja dengan kabut air akan mengakibatkan terjadinya proses evaporasi, dimana panas udara kerja akan diserap oleh kabut air sehingga air akan menguap. (5) Semakin besar panas sensibel yang diserap oleh kabut air dari udara kerja, semakin rendah suhu udara kerja. Dengan semakin rendahnya suhu udara kerja, maka semakin banyak panas sensibel udara primer yang dapat diserap oleh udara kerja, 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*. Sebagai akibatnya suhu dan kelembaban udara kerja akan meningkat, akibat proses evaporasi tidak langsung oleh panas sensibel udara primer di *wet channel*, dimana udara kerja pada outlet *wet channel* akan menjadi lebih panas dan lebih basah dibandingkan dengan udara sekunder pada *inlet wet channel*. (6) Proses *indirect evaporative cooling* udara primer oleh udara kerja pada *wet channel* melalui HEX plate akan menghasilkan udara primer yang lebih rendah temperturnya dengan kelembaban absolut yang konstan, yang keluar melalui *outlet primary dry channel* sebagai udara produk. Proses ini akan menghasilkan udara produk pada sisi *primary dry channel* yang berpotensi mencapai suhu dibawah temperatur bola basah *inlet* nya dan juga hampir mendekati temperatur pengembunannya. Sementara itu, udara kerja akan keluar pada sisi *outlet wet channel* sebagai udara yang lebih panas dan lebih basah dan dalam kondisi uap jenuh atau kelembaban relatifnya 100%.

3.5. Prosedur Pengujian

(1) Pemasangan alat uji sistem Maisotsenko dilakukan di Lab. Keahlian. (2) 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. (3) *Blower* dihidupkan dan kecepatan aliran udara primer dan sekunder, dengan \dot{m} udara primer sebesar 0,0553 kg/s dan udara sekunder sebesar 0,0691 kg/s. (4) Pompa pengabut air juga dihidupkan. (5) Setelah semua sistem aktif, sistem dibiarkan stabil sebelum pengujian dilakukan dengan pencatatan data setiap 5 menit selama 30 menit. (6) Setelah 30 menit, blower dan pompa dimatikan, dan sistem dидiamkan selama 30 menit hingga suhu udara pada saluran basah dan kering kembali ke temperatur awal. (7) Langkah-langkah ini diulang untuk rasio kecepatan aliran udara primer 0,6 ($V_{ud.primer2.sekunder2} = 5,4 \text{ m/s} : 9,0 \text{ m/s}$) dan rasio 0,4 ($V_{ud.primer3.sekunder3} = 3,6 \text{ m/s} : 9,0 \text{ m/s}$), di mana \dot{m} udara primer 2 dan primer 3 berturut-turut adalah 0,0553 kg/s, 0,0415 kg/s, dan 0,0276 kg/s, dengan \dot{m} udara sekunder tetap pada 0,0691 kg/s. (8) Pengujian selesai.

4. Hasil dan Pembahasan

Data temperatur dapat dilihat secara berurutan pada Tabel 1, Tabel 3, dan Tabel 5. Untuk data hasil perhitungan menggunakan diagram psikrometrik dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 4, dan Tabel 6

Tabel 1. Data Hasil Pengamatan untuk \dot{m} primer = 0.0553 kg/s

Waktu (Menit)	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32,7	35,4	31,9	62,0	29,2	89,7
10	32,5	35,4	31,7	61,0	29,2	89,8
15	32,4	33,3	31,4	62,2	28,9	89,9
20	32,4	33,0	31,3	61,8	28,8	89,9
25	32,3	33,0	31,2	61,8	28,8	90,0
30	32,7	34,0	31,5	61,2	29,0	90,0
\bar{x}	32,5	34,0	31,5	61,7	29,0	89,9

Tabel 2. Data Hasil Perhitungan menggunakan diagram psikrometrik \dot{m} udara primer = 0.0553 kg/s

Waktu (Menit)	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	Tdex 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio (g/kg)
5	26,2	59,2	24,0	26,9	50,5	26,0	27,8	18,9
10	25,9	58,3	23,6	26,1	55,6	25,7	27,8	18,4
15	25,9	58,7	23,6	26,1	55,6	25,6	28,9	18,4
20	25,8	58,0	23,4	25,9	56,0	25,5	27,5	18,2
25	25,7	58,0	23,3	25,8	55,7	25,4	27,5	18,1
30	25,8	57,0	23,4	26,2	52,8	25,5	27,7	18,2
\bar{x}	25,8	58,0	23,5	26,2	53,1	25,6	27,7	18,3

Tabel 3. Data Hasil Pengamatan untuk \dot{m} udara primer = 0.0415 kg/s

Waktu (Menit)	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32,6	33,2	31,3	62,5	28,6	88,1
10	33,1	33,9	31,6	60,3	28,9	89,8
15	33,2	33,7	31,6	59,4	28,8	90,1
20	33,1	34,0	31,6	57,2	28,8	90,3
25	32,9	33,8	31,6	60,6	28,7	90,4
30	33,1	33,9	31,6	60,1	28,7	90,5
\bar{x}	33,0	33,8	31,6	60,0	28,8	89,9

Tabel 4. Data Hasil Perhitungan menggunakan diagram psikrometrik \dot{m} udara primer = 0.0415 kg/s

Waktu (Menit)	Twb 1a (°C)	Rh 1a (%)	Tdex 1a (°C)	Twb 1b (°C)	Rh 1b (%)	Twb 2 (°C)	Twb 3 (°C)	Absolute ratio (g/kg)
5	25,9	58,0	23,6	26,0	55,9	25,6	27,0	18,4
10	25,8	55,1	23,2	26,0	52,5	25,5	27,5	18,0
15	25,7	54,1	23,1	25,9	52,6	25,3	27,5	17,8
20	25,2	52,0	22,3	25,5	49,3	24,9	27,5	17,0
25	25,8	56,0	23,3	26,1	53,1	25,5	27,4	18,1
30	25,8	55,1	23,2	26,0	52,5	25,4	27,4	18,0
\bar{x}	25,7	55,1	23,2	25,9	52,5	25,4	27,5	17,9

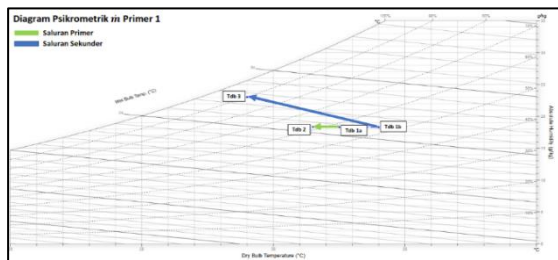
Tabel 5. Data Hasil Pengamatan untuk \dot{m} udara primer = 0.0276 kg/s

Waktu (Menit)	Tdb 1a (°C)	Tdb 1b (°C)	Tdb 2 (°C)	Rh 2 (%)	Tdb 3 (°C)	Rh 3 (%)
5	32,7	33,4	30,4	63,9	28,4	88,9
10	33,2	33,1	30,5	57,9	28,2	90,0
15	33,4	33,5	30,8	56,8	28,4	90,3
20	32,2	32,8	30,3	65,7	28,2	90,5
25	32,1	33,3	30,6	66,1	28,2	90,6
30	32,0	33,2	30,5	66,6	28,1	90,7
\bar{x}	32,6	33,2	30,5	62,8	28,3	90,2

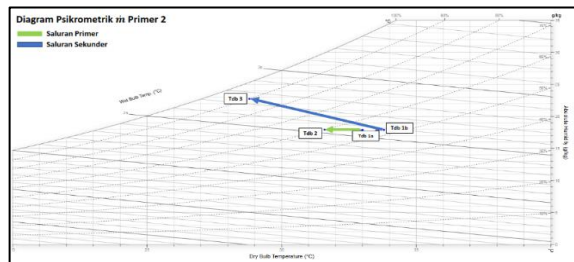
Tabel 6. Data Hasil Perhitungan menggunakan diagram psikrometrik \dot{m} udara primer = 0.276 kg/s

Waktu (Menit)	$T_{wb,1a}$ (°C)	Rh 1a (%)	$T_{dew,1a}$ (°C)	$T_{wb,1b}$ (°C)	Rh 1b (%)	$T_{wb,2}$ (°C)	$T_{wb,3}$ (°C)	Absolute ratio (g/kg)
5	25,6	55,7	23,1	25,8	53,5	25,0	26,9	17,8
10	24,5	52,3	21,6	24,7	49,6	24,1	26,9	16,2
15	24,8	48,7	21,6	24,84	48,4	24,1	27,1	16,2
20	25,7	68,7	23,4	25,9	56,7	25,2	27,0	18,2
25	25,9	60,4	23,8	26,2	56,2	25,6	27,0	18,6
30	26,0	61,0	23,9	26,3	56,9	25,5	26,9	18,7
\bar{x}	25,0	53,2	22,2	25,2	51,4	24,3	27,0	16,9

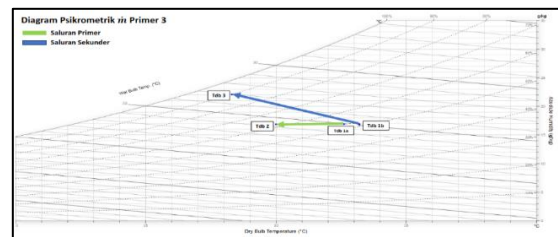
Digram Psikrometrik disajikan pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8



Gambar 6. Digram Psikrometrik rata-rata distribusi temperatur \dot{m} udara primer = 0.0553 kg/s



Gambar 7. Digram Psikrometrik rata-rata distribusi temperatur \dot{m} udara primer = 0.0415 kg/s



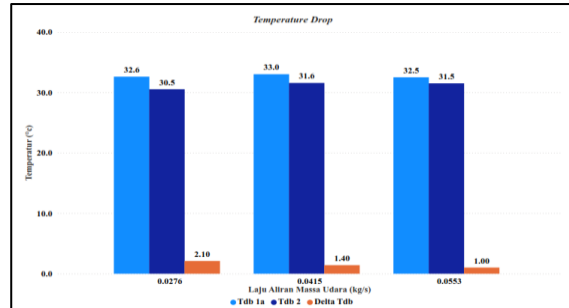
Gambar 8. Digram Psikrometrik rata-rata distribusi temperatur \dot{m} udara primer = 0.0276 kg/s

4.1. Analisis Temperature Drop

Hasil perhitungan ΔT_{dB} (Temperature Drop) disajikan pada tabel 7.

Tabel 7. Temperature Drop

Laju Aliran Massa Udara (kg/s)	$T_{db,1a}$ (°C)	$T_{db,2}$ (°C)	ΔT_{dB} (°C)
0.0553	32,5	31,5	1,0
0.0415	33,0	31,6	1,4
0.0276	32,6	30,5	2,1



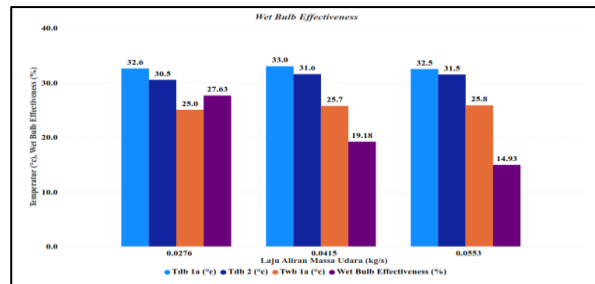
Gambar 9. Grafik Temperature drop Tdb

4.2. Analisis Wet bulb effectiveness

Hasil perhitungan WBE disajikan pada tabel 8

Tabel 8. Wet bulb effectiveness

Laju Aliran Massa Udara (kg/s)	$T_{db,1a}$ (°C)	$T_{wb,1a}$ (°C)	$T_{db,2}$ (°C)	Wet bulb effectiveness (%)
0.0553	32,5	25,8	31,5	14,93
0.0415	33,0	25,7	31,6	19,18
0.0276	32,6	25,0	30,5	27,63



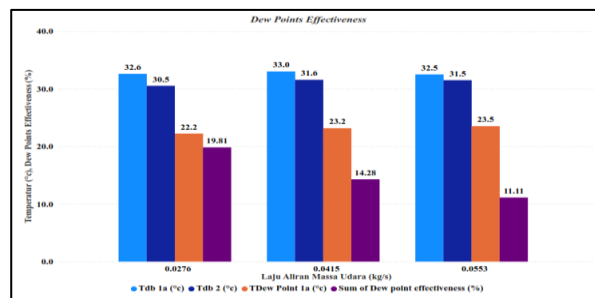
Gambar 10. Grafik Wet bulb effectiveness

4.3. Analisis Dew point effectiveness

Hasil perhitungan DPE disajikan pada tabel 9.

Tabel 9. Dew point effectiveness

Laju Aliran Massa Udara (kg/s)	$T_{db,1a}$ (°C)	$T_{Dew,1a}$ (°C)	$T_{db,2}$ (°C)	Dew point effectiveness (%)
0.0553	32,5	23,5	31,5	11,11
0.0415	33,0	23,2	31,6	14,28
0.0276	32,6	22,2	30,5	19,81



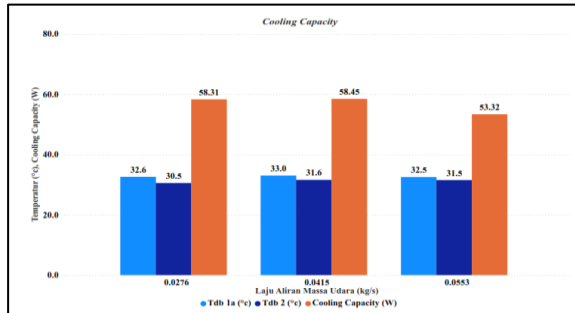
Gambar 11. Grafik Dew point effectiveness

4.4. Analisis Cooling Capacity

Hasil perhitungan CC disajikan pada tabel 10.

Tabel 10. Cooling Capacity

Laju Aliran Massa Udara (kg/s)	Tdb 1a (°C)	Tdb 2 (°C)	Cp J/(kgK)	Cooling Capacity (W)
0,0553	32,5	31,5	1006	53,318
0,0415	33,0	31,6	1006	58,45
0,0276	32,6	30,5	1006	58,308



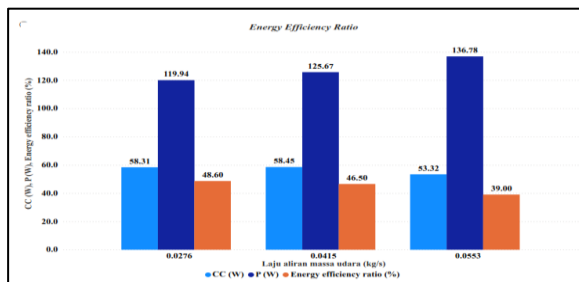
Gambar 12. Grafik Cooling Capacity

4.5. Analisis Energy Efficiency Ratio

Hasil perhitungan EER disajikan pada tabel 11.

Tabel 11. Energy Efficiency Ratio

Laju aliran massa udara (kg/s)	Cooling Capacity (W)	Daya input total (w)	EER (%)
0,0553	53,318	136,78	39
0,0415	58,45	125,67	46,5
0,0276	58,308	119,94	48,6



Gambar 13. Grafik Energy Efficiency Ratio

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, didapat ΔT_{db} terendah 1,0°C. Pada \dot{m} udara primer 0,0276 kg/s, didapat ΔT_{db} tertinggi 2,1°C.
2. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, efektivitas wet bulb berada pada nilai terendah 14,93%. Pada \dot{m} 0,0276 kg/s, efektivitas wet bulb mencapai nilai tertinggi 27,63%.
3. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, efektivitas titik embun berada pada nilai terendah 11,11%. Pada \dot{m} primer 0,0276 kg/s, efektivitas titik embun mencapai nilai tertinggi 19,81%.
4. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, kapasitas pendinginan berada pada nilai terendah 53,318 W. Pada \dot{m} udara primer 0,0415 kg/s, kapasitas pendinginan mencapai nilai tertinggi 58,45 W.

5. Pada \dot{m} udara primer 0,0553 kg/s, didapat nilai EER terendah 39%. Pada \dot{m} udara primer 0,0276 kg/s, EER mencapai nilai tertinggi 48,6%.

Daftar Pustaka

- [1] Ali, M. et al., 2021, *Performance enhancement of a cross flow dew point indirect evaporative cooler with circular finned channel geometry*, Journal of Building Engineering, 35, p. 101980.
- [2] Anisimov, S. et al., 2014, *Performance investigation of a M (Maisotsenko) -cycle cross-flow heat exchanger used for indirect evaporative cooling*, Energy, pp. 1–14.
- [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.
- [4] Lin, J. et al., 2021, *Understanding the transient behavior of the dew point evaporative cooler from the first and second law of thermodynamics*, Energy Conversion and Management [Preprint].
- [5] Rajput, R.K., 2007., *Engineering Thermodynamics Third Edit*, LAXMI PUBLICATIONS (P) LTD.
- [6] Riangvilaikul, B. and Kumar, S., 2010, *An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system*, Energy and Buildings, 42(5), pp. 637–644.
- [7] Rogdakis, E.D., Koronak, I.P. and Tertipis, D.N., 2013, *Experimental and computational evaluation of a Maisotsenko evaporative cooler at Greek climate*, Energy & Buildings.
- [8] Romero-lara, M.J. et al., 2023, *Seasonal energy efficiency ratio of regenerative indirect evaporative coolers — Simplified calculation method*, Applied Thermal Engineering, 220(November 2022), p. 119710.
- [9] Sajjad, U. et al., 2021, *A review of recent advances in indirect evaporative cooling technology*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 122(January), p. 105140.

	<p>Tegar Ramadhan menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin Universitas Udayana, dari tahun 2020 hingga 2024, dengan fokus utama pada bidang konversi energi.</p>
<p>Judul Tugas Akhir Studi Eksperimental Performansi Sistem Pendinginan Maisotsenko Udara Parallel Flow Dengan Variasi Laju Aliran Massa Udara Primer</p>	