

## PERBANDINGAN KINERJA SISTEM PENDINGIN EVAPORATIF JENIS LANGSUNG DAN TAK LANGSUNG

Nuriyadi, Muhammad<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Politeknik Negeri Bandung  
email: nuriyadi@polban.ac.id

### **Abstract**

*Evaporative cooling is an air conditioning process uses water evaporation to cool the air flow directly or indirectly so the temperature of the cooled air is lower than the one before. In air conditioning systems, evaporative coolers are used in hot and dry areas, both as pre-cooler and humidifier.*

*The purpose of this study is to evaluate the performance of the evaporative system, direct and indirect types. The study was conducted by testing the evaporative equipment which is operated directly and indirectly by varying the debit of air flow.*

*The result show that the average cooling capacity of the direct evaporative system was about 20% higher compared to indirect system operation. This is due to direct evaporative cooling by sensible and latent heat, whereas indirect evaporative systems only absorb sensible heat. This is also shown by the increase in humidity in the direct evaporative system.*

**Keywords:** *Performance, direct evaporative, indirect evaporative.*

### **1. PENDAHULUAN**

Pendinginan evaporatif adalah proses pengkondisian udara yang menggunakan penguapan air cair untuk mendinginkan aliran udara secara langsung atau tidak langsung sehingga suhu bola kering atau bola kering dan basah dari aliran udara yang didinginkan lebih rendah daripada yang sebelum menjalani proses penguapan ASHRAE, 2015[1].

Menurut Shan K. Wang [2], pendinginan evaporatif hemat energi, ramah lingkungan, dan hemat biaya di banyak aplikasi dan semua iklim. Aplikasi berkisar dari pendinginan yang nyaman di bangunan perumahan, pertanian, komersial, dan kelembagaan, hingga aplikasi industri untuk pendinginan di pabrik, pengecoran, pembangkit listrik, dan lingkungan panas lainnya.

Sistem pendingin udara evaporatif terdiri dari pendingin evaporatif, kipas, pompa, filter, perangkat pemulihan panas, penukar panas, kotak pencampur, peredam, kontrol, dan komponen lainnya.

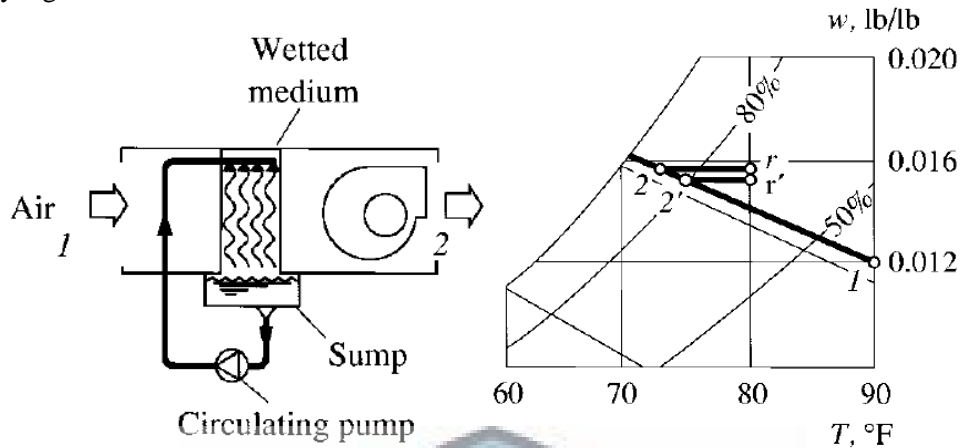
Ada tiga jenis proses pendinginan penguapan: (1) pendinginan penguapan langsung, (2) pendinginan penguapan tidak langsung, dan (3) pendinginan penguapan tidak langsung-langsung. Pada penelitian ini dibandingkan antara kinerja sistem pendingin evaporatif langsung maupun tak langsung.

Evaluasi sistem pendingin evaporatif meliputi evaluasi kapasitas sistem pendingin evaporatif, evaluasi efisiensi Pendingin evaporatif, serta analisis kinerja dari sistem pendingin evaporatif jenis langsung dan tak langsung.

Proses Pendinginan Evaporatif Langsung

Dalam proses pendinginan evaporatif langsung, aliran udara yang akan didinginkan bersentuhan langsung dengan medium basah atau semprotan air. Pendingin penguapan langsung dimana proses pendinginan penguapan langsung diperlihatkan pada Gambar 2. Udara memasuki pendingin evaporatif langsung pada titik 1 dan pergi pada titik 2. Pelepasan panas laten penguapan dari aliran udara yang langsung didinginkan

menurunkan suhu aliran udara; rasio kelembaban aliran udara meningkat karena uap air yang ditambahkan.

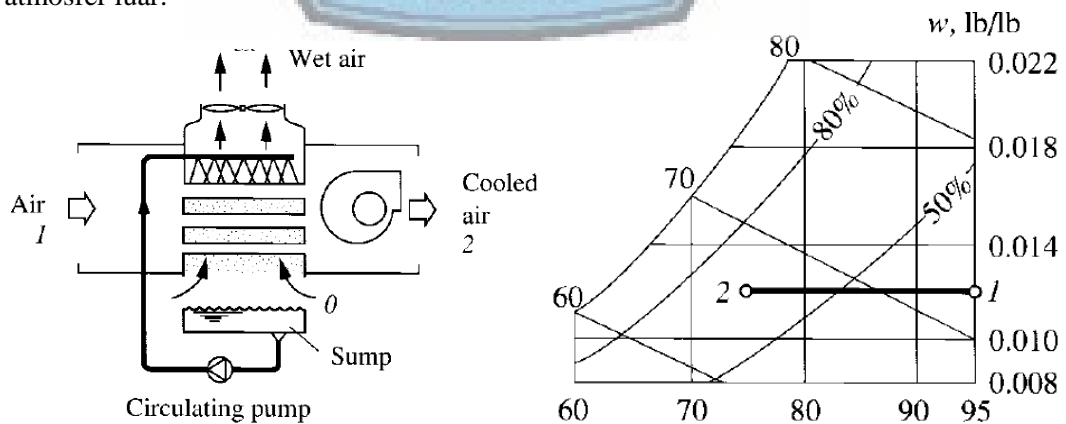


Gambar 2. Sistem pendingin evaporatif langsung

#### Pendinginan Evaporatif Tidak Langsung

Dalam proses pendinginan evaporatif tidak langsung, aliran udara utama yang akan didinginkan dipisahkan dari permukaan yang dibasahi oleh pelat datar atau dinding tabung, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Udara dingin tidak secara langsung menghubungi cairan penguapan. Aliran udara sekunder mengalir di atas permukaan yang dibasahi sehingga air cair akan menguap dan mengekstraksi panas dari aliran udara primer melalui pelat datar atau dinding tabung. Aliran udara sekunder basah ini dikenal sebagai udara basah. Tujuan dari aliran udara sekunder adalah untuk mendinginkan permukaan yang dibasahi, menguapkan mendekati suhu bola basah, dan untuk menyerap uap air yang diuapkan.

Dalam proses penguapan tidak langsung, rasio kelembaban aliran udara yang didinginkan tetap konstan karena udara yang akan didinginkan tidak menyentuh cairan penguapan. Semakin tinggi kecepatan udara basah, semakin besar koefisien perpindahan panas permukaan basah, semakin besar perbedaan entalpi, antara film udara jenuh pada permukaan basah dan aliran udara basah, dan semakin tinggi penurunan tekanan aliran udara basah. Udara basah kemudian dipaksa melalui kipas buang dan dibuang ke atmosfer luar.

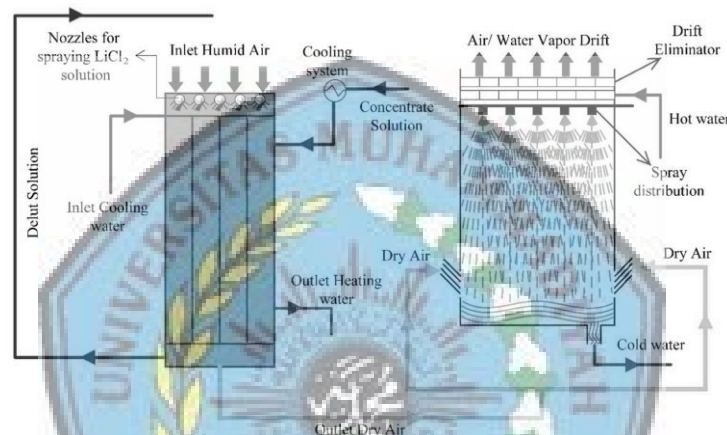


Gambar 3. Sistem pendingin evaporative tak langsung

## 2. KAJIAN LITERATUR

Pada 1995, Givoni dan Al Hemiddi [4] memperkenalkan *shower evaporative cooler* dan menggunakan sistem ini untuk mendinginkan udara di tempat yang panas. Sistem ini

berisi nozel semprotan air di bagian atas menara dan basin di bagian bawah. Mereka memeriksa efisiensi sistem ini di Arab Saudi. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa udara masuk  $45^{\circ}\text{C}$  setelah melewati pendingin evaporatif mencapai  $29^{\circ}\text{C}$ . Setelah satu tahun, Satoshi dan Givoni [5] mempelajari efisiensi *evaporative cooler* dan pengaruh berbagai parameter terhadap efisiensinya di Jepang. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa suhu udara *outlet* tergantung pada parameter seperti ketinggian menara, laju aliran massa udara masuk dan air, kondisi lingkungan dan tingkat difusi tetesan air. Givoni [6] dalam penelitian lain meneliti efisiensi *evaporative cooler* di tiga zona cuaca yang berbeda (Los Angeles, Riyadh, dan Yokohama). Dia meneliti efek ketinggian menara pada suhu udara outlet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meningkatkan ketinggian menara dari 0,5 m menjadi 1,0 m secara signifikan mengurangi suhu udara, tetapi meningkatkan ketinggian dari 2,0 m menjadi 3,0 m tidak memiliki banyak pengaruh pada penurunan suhu udara outlet.



Gambar 1. Diagram skematik sistem pendingin evaporatif (Neda Gilani, 2019)

Mohiuddin dan Kant [7] mempelajari desain pendingin evaporatif basah mengikuti kondisi lingkungan dan operasional yang berbeda. Kemudian, dalam penelitian lain, mereka mengevaluasi koefisien transfer di pendingin evaporatif [8]. Goshayshi et al. [9] memperoleh laju transfer massa dan penurunan tekanan di pendingin evaporatif bed diisi, termasuk pengisi plastik yang terbuat dari PVC.

Mereka menunjukkan bahwa koefisien perpindahan massa dan penurunan tekanan lebih tinggi dalam hal penerapan pengisi bergaris dan tidak rata dibandingkan dengan pengisi datar. Alrahman-khan dan Zubair [10] mengevaluasi efisiensi pendingin evaporatif basah dengan pola aliran berlawanan dengan menyediakan model komputer. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa sekitar 62,5% dan 90% dari keseluruhan tingkat perpindahan panas di bagian atas dan bawah menara terkait dengan perpindahan panas laten. Xiaoni et al. telah menjadi peneliti dan pelopor dalam bidang desain pendingin evaporatif basah. Dalam studi pertama mereka [11], mereka meninjau karakteristik *evaporative cooler*. Karena garam dan zat terlarut tersimpan di menara dan menyebabkan penyumbatan, mereka menyimpulkan bahwa menara tersebut tidak praktis dan efektif. Dalam model yang mereka usulkan, bagian dalam menara itu kosong, dan nozel menyemprotkan tetesan air yang sangat kecil ke aliran udara. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa modal utama yang dibutuhkan untuk membeli peralatan, dan energi di *evaporative cooler* lebih rendah dibandingkan dengan menara yang diisi. Juga, mereka mempresentasikan model satu dimensi menggunakan prosedur yang mengatur hubungan panas dan perpindahan massa. Untuk memprediksi kecepatan tetesan air dan proses pendinginan evaporatif, skema beda hingga diterapkan untuk menyelesaikan hubungan pemerintahan. Mereka [12] meluncurkan simulasi numerik *evaporative cooler* menggunakan pendekatan

jaringan saraf dan menyediakan program cerdas untuk merancang menara ini. Insinyur yang menggunakan program ini bisa mendapatkan suhu outlet air dari menara dengan memasukkan sekumpulan informasi laboratorium ke dalam perangkat lunak. Kesalahan rata-rata dari perangkat lunak yang diusulkan diperoleh 1,31% dibandingkan dengan hasil empiris saat menggunakan model berbasis persamaan yang mengatur untuk perpindahan panas dan prosedur perpindahan massa, nilai absolut kesalahan rata-rata adalah 9,42%. Xiaoni dan Zhenyan [13] dalam penelitian lain pada tahun yang sama, untuk mengembangkan model dan mengurangi kesalahannya, mengabaikan asumsi udara jenuh dalam kontak dengan air, koefisien Luis menjadi satu dan konstan mengingat laju aliran massa dari air (terlepas dari penguapan air). Kemudian, mereka membandingkan hasil model baru dengan hasil empiris dan menyatakan bahwa model baru memprediksi hasil eksperimen dengan presisi tinggi. Selain itu, Xiaoni et al. [14] menyarankan metode baru yang disebut proyeksi pengejaran regresi (PPR) untuk simulasi *evaporative cooler* yang cepat, mudah, dan hemat biaya. Temuan menunjukkan bahwa model PPR memiliki akurasi yang lebih tinggi daripada model perpindahan panas dan perpindahan massa. Wang dan Li [15] meneliti efisiensi termal dari pendingin evaporatif basah dengan pola aliran berlawanan dan perubahan eksergi di dalamnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi eksergi selalu di bawah 25%. Juga, nilai transfer eksergi di menara dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Picardo dan Variyar [16] mempresentasikan metode baru untuk menghitung tinggi pengisi dalam pola aliran berlawanan pendingin evaporatif dengan merevisi persamaan Merkel.

Temuan metode ini menunjukkan bahwa ketinggian yang tepat di bagian pengisian tidak dipengaruhi oleh laju aliran air dan diameter menara, dan hanya tergantung pada laju aliran massa aliran udara. Shauny et al. [17] mempresentasikan model matematika baru untuk memprediksi efisiensi *evaporative cooler*. Model ini diterapkan untuk memprediksi perubahan suhu dan eksergi di seluruh menara. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dengan meningkatnya ketinggian menara, eksergi air berkurang. Juga, distribusi kehilangan eksergi di bagian bawah menara tinggi dan berkurang saat bergerak ke arah atas menara. Juga, dengan mengurangi diameter tetesan air, waktu dan permukaan perpindahan massa akan meningkat. Jiang et al. [18] mempelajari pendingin evaporatif basah numerik dan eksperimental dengan pola lintas aliran. Dalam studi ini, pendingin evaporatif basah terdiri dari penukar panas sirip-pelat, dan kinerjanya dipelajari dalam kondisi yang berbeda. Koefisien perpindahan panas dan perpindahan massa diperoleh dengan solusi numerik dari model matematika dua dimensi dan juga hubungan empiris. Kesalahan antara hasil resolusi numerik dan hasil laboratorium kurang dari 8%.

Asvapoositkul dan Kuansathan [19] melakukan perbandingan antara efisiensi pendingin evaporatif hybrid (basah / kering). Dalam penelitian ini, teknik numerik digunakan untuk memprediksi perilaku sistem. Mereka mempresentasikan bahwa hasil penyelesaian persamaan yang diperoleh sepenuhnya oleh data empiris. Muangnoi et al. [20] secara eksperimental dan numerik mempelajari kinerja pendingin evaporatif water-jet. Juga, pengaruh parameter ketinggian daerah semprot, aliran air terhadap rasio udara, diameter, dan kecepatan tetesan air dan kecepatan udara pada kinerja sistem diselidiki. Xiaoni et al. [21] mempelajari secara numerik efisiensi *evaporative cooler* yang menggunakan aliran air laut. Mereka membandingkan suhu yang sesuai dengan air keluaran pendingin evaporatif dalam dua mode menggunakan air tawar dan air laut. Hasil menunjukkan bahwa kinerja pendingin evaporatif dalam mengurangi suhu yang sesuai dengan air outlet dalam penggunaan air tawar lebih baik dibandingkan dengan penggunaan air laut dalam kondisi yang sama. Selain itu, dengan meningkatkan diameter tetesan air dan tingkat garam di air laut, efisiensi pendingin evaporatif berkurang. Zunaid et al. [22] mempresentasikan model numerik-matematika 2D untuk *evaporative cooler*. Dalam

model yang diusulkan, persamaan massa, energi, eksergi, gerakan dan tetesan air diselesaikan untuk menghitung suhu yang sesuai dengan keluaran udara, dan validasi hasil kemudian dilakukan dengan menggunakan data empiris. Ditemukan bahwa suhu yang sesuai dengan tetesan inlet menunjukkan dampak yang cukup besar pada suhu udara keluar dan air, kinerja menara dan eksergi sistem. Selain itu, mereka menunjukkan bahwa kinerja maksimum *evaporative cooler* pada suhu air masuk 36 ° C adalah 55,28%.

### 3. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan beberapa langkah, yakni:

1. Pengujian Sistem pendingin evaporative langsung
2. Pengujian Sistem pendingin evaporative tak langsung
3. Analisis perbandingan kinerja system Pendingin evaporative

Kinerja Sistem Pendingin Evaporatif

Kinerja sistem pendingin evaporatif dievaluasi dengan persamaan berikut:

1. Efisiensi saturasi ( $\epsilon_{sat}$ ) menggambarkan seberapa efektif system pendinginan, dirumuskan sebagai:

$$\epsilon_{sat} = \frac{T_{ae} - T_{al}}{T_{ae} - T_{ae}^*} \quad (1)$$

dengan:

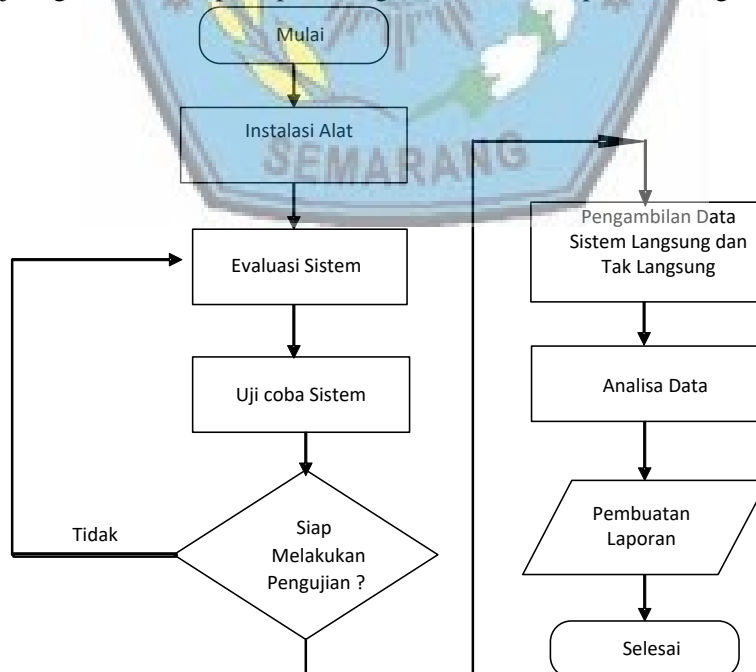
$T_{ae}$  = suhu tabung kering udara masuk (°C)

$T_{al}$  =

$T_{ae}^*$  =

2. Efek pendinginan:  $Q_{ev,c} = 60v_a A_a \rho_a c_{pa} (T_{ae} - T_{al}) \quad (2)$

Alur kerja digambarkan seperti pada diagram alir metode penelitian (gambar 4).



Gambar 4. Metodologi penelitian



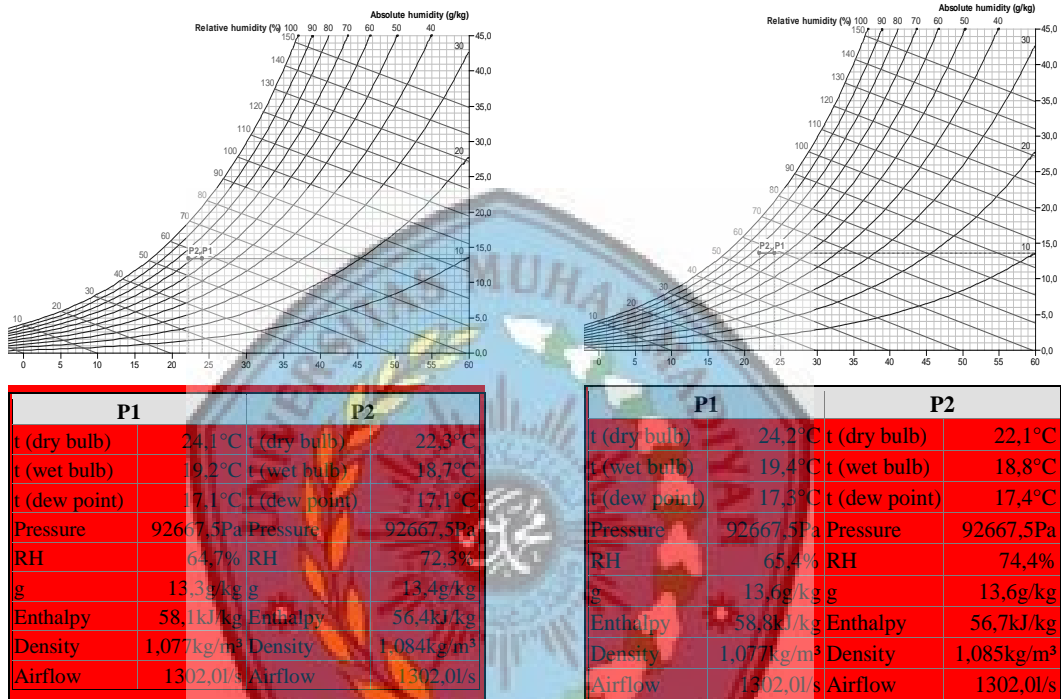
**4. HASIL PENELITIAN**

Penelitian dilakukan dengan pengujian alat evaporatif yang dioperasikan secara langsung dan tak langsung dengan memvariasasikan kecepatan/debit aliran udara. Kecepatan aliran udara masing-masing adalah 2,33 m/s; 2,85 m/s; 3,39 m/s dan 3,84 m/s. Sedangkan debit aliran udara tiap pengujian masing-masing adalah: 1302 l/s; 1596 l/s; 1897 l/s dan 2149 l/s. Data pengujian dan hasil plot data pada diagram psikrometrik ditampilkan pada gambar 5a-d.

INDIRECT V=2,33 m/s; Q=1302 l/s;

DIRECT V=2,33 m/s; Q=1302

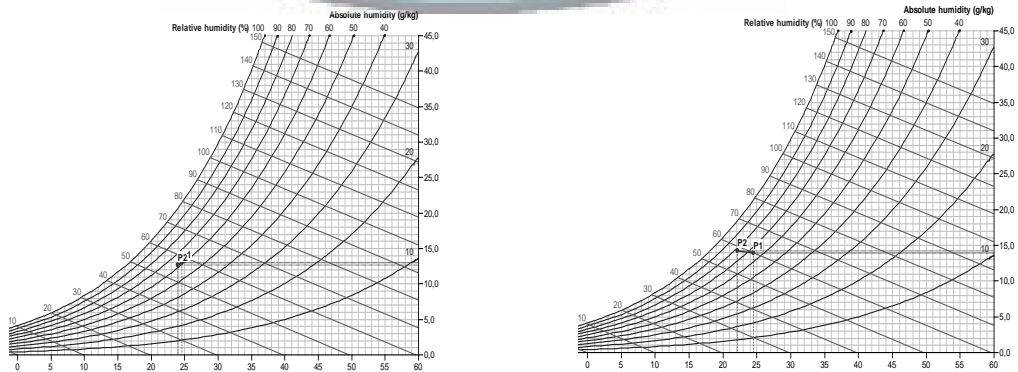
l/s



Gambar 5a. Hasil plot data pada Diagram Psikrometrik untuk kecepatan 2,33 m/s

INDIRECT KEC2, V=2,85 M/S, Q=1596 L/S

DIRECT KEC2, V=2,85 M/S, Q=1596 L/s

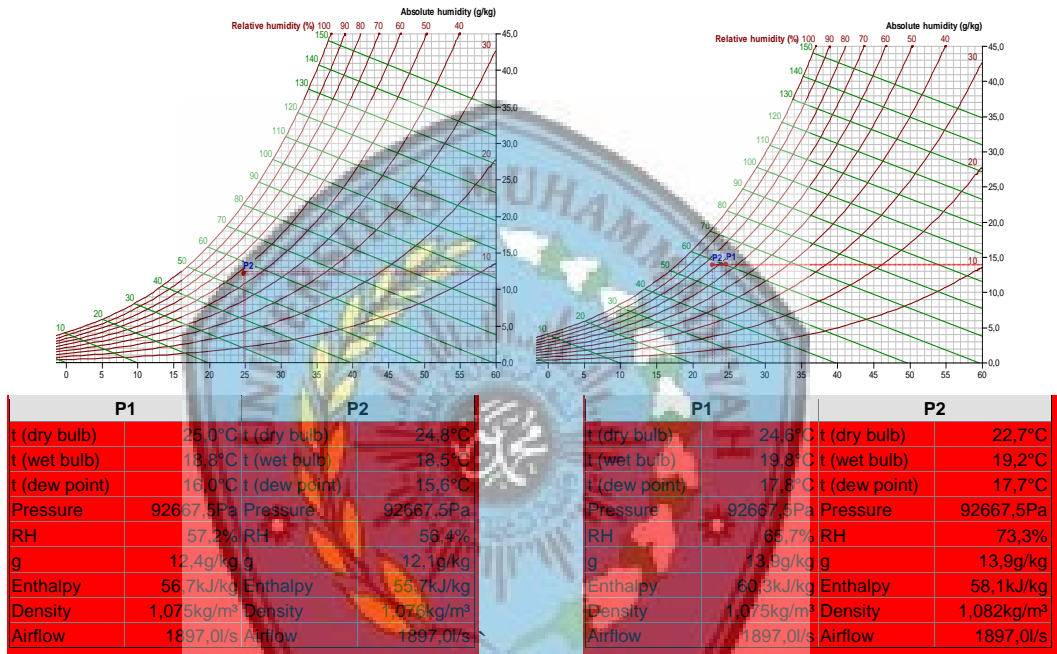


P1		P2	
t (dry bulb)	24,6°C	t (dry bulb)	24,0°C
t (wet bulb)	19,1°C	t (wet bulb)	18,7°C
t (dew point)	16,7°C	t (dew point)	16,3°C
Pressure	92667,5Pa	Pressure	92667,5Pa
RH	61,2%	RH	62,0%
g	13,0g/kg	g	12,7g/kg
Enthalpy	57,8kJ/kg	Enthalpy	56,4kJ/kg
Density	1,076kg/m <sup>3</sup>	Density	1,078kg/m <sup>3</sup>
Airflow	1596,0l/s	Airflow	1596,0l/s

P1		P2	
t (dry bulb)	24,5°C	t (dry bulb)	22,2°C
t (wet bulb)	19,7°C	t (wet bulb)	19,3°C
t (dew point)	17,7°C	t (dew point)	18,1°C
Pressure	92667,5Pa	Pressure	92667,5Pa
RH	65,6%	RH	77,4%
g	13,8g/kg	g	14,2g/kg
Enthalpy	59,9kJ/kg	Enthalpy	58,5kJ/kg
Density	1,076kg/m <sup>3</sup>	Density	1,084kg/m <sup>3</sup>
Airflow	1596,0l/s	Airflow	1596,0l/s

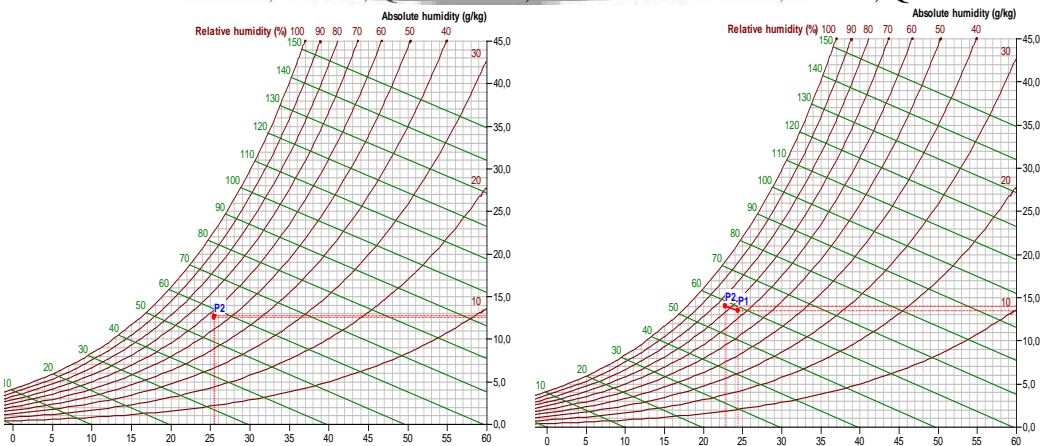
Gambar 5b. Hasil plot data pada Diagram Psikrometrik untuk kecepatan 3,84 m/s

INDIRECT KEC. V=3,39 M/S, Q=1897L/S;      DIRECT KEC.V=3,39 M/S, Q=1897 L/S



Gambar 5c. Hasil plot data pada Diagram Psikrometrik untuk kecepatan 3,39 m/s

INDIRECT KEC.V=3,84 M/S; Q=2149 L/S;      DIRECT KEC.V=3,84 M/S; Q=2149 L/S



P1		P2		P1		P2	
t (dry bulb)	25,6°C	t (dry bulb)	25,5°C	t (dry bulb)	24,4°C	t (dry bulb)	22,8°C
t (wet bulb)	19,2°C	t (wet bulb)	19,0°C	t (wet bulb)	19,4°C	t (wet bulb)	19,3°C
t (dew point)	16,3°C	t (dew point)	16,1°C	t (dew point)	17,2°C	t (dew point)	17,8°C
Pressure	92667,5Pa	Pressure	92667,5Pa	Pressure	92667,5Pa	Pressure	92667,5Pa
RH	56,5%	RH	55,8%	RH	64,2%	RH	73,4%
g	12,7g/kg	g	12,5g/kg	g	13,5g/kg	g	14,0g/kg
Enthalpy	58,1kJ/kg	Enthalpy	57,4kJ/kg	Enthalpy	58,8kJ/kg	Enthalpy	58,5kJ/kg
Density	1,072kg/m <sup>3</sup>	Density	1,073kg/m <sup>3</sup>	Density	1,076kg/m <sup>3</sup>	Density	1,082kg/m <sup>3</sup>
Airflow	2149,0l/s	Airflow	2149,0l/s	Airflow	2149,0l/s	Airflow	2149,0l/s

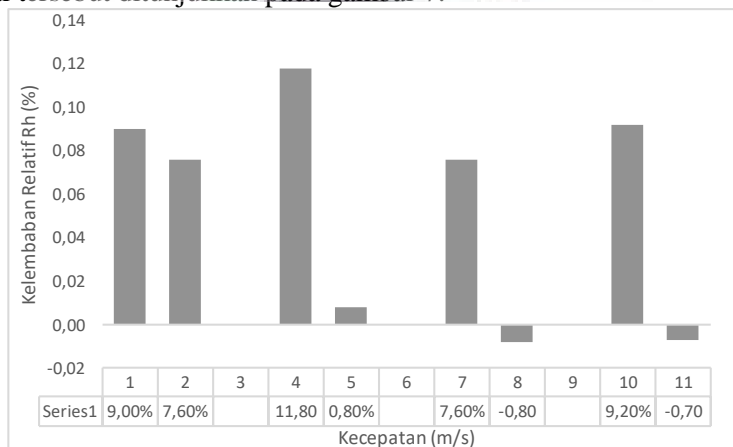
Gambar 5d. Hasil plot data pada Diagram Psikrometrik untuk kecepatan 3,84 m/s

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas pendinginan rata-rata dari sistem evaporatif langsung lebih tinggi dibandingkan dengan operasi sistem tak langsung seperti ditunjukkan pada gambar 6. Hal ini disebabkan pendinginan evaporatif langsung dapat menyerap kalor sensible dan laten, sedangkan sistem evaporatif tak langsung hanya menyerap kalor secara sensible saja.



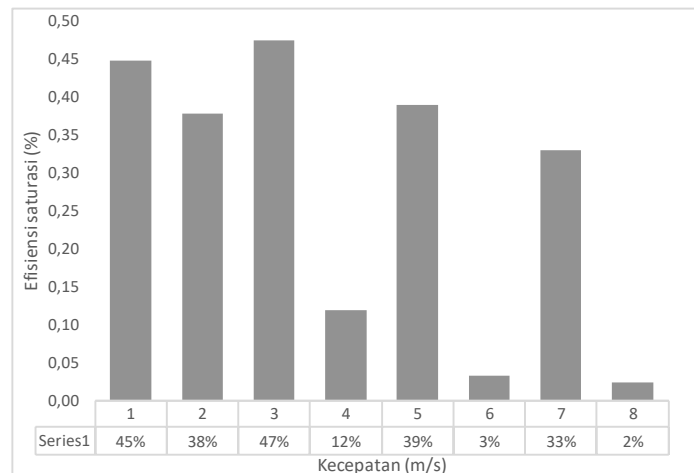
Gambar 6. Kapasitas Pendinginan Evaporatif Langsung dan Tak Langsung

Hal ini juga ditunjukkan dengan tingginya kelembaban relative pada sistem evaporatif langsung. Tingginya kelembaban relative tersebut disebabkan temperature tabung basah dari udara keluaran yang mendekati temperature air pendingin pada system evaporative langsung. Hal tersebut ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Kelembaban Relatif (%) Pendinginan Evaporatif Langsung dan Tak Langsung





Gambar 8. Efisiensi Saturasi Pendinginan Evaporatif Langsung dan Tak Langsung

Efisiensi saturasi pada sistem evaporatif langsung juga lebih tinggi dibanding system tak langsung seperti ditunjukkan pada gambar 8. Hal ini disebabkan temperature keluaran hasil pendinginan evaporative langsung yang lebih mendekati temperature air pendingin.

## 5. SIMPULAN

Pendinginan evaporatif adalah proses pengkondisian udara yang menggunakan penguapan air untuk mendinginkan aliran udara secara langsung atau tidak langsung sehingga suhu aliran udara yang didinginkan lebih rendah daripada yang sebelum menjalani proses.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas pendinginan rata-rata dari sistem evaporatif langsung lebih tinggi sekitar 20% dibandingkan dengan operasi sistem tak langsung. Hal ini disebabkan pendinginan evaporatif langsung dapat menyerap kalor sensible dan laten, sedangkan sistem evaporatif tak langsung hanya menyerap kalor secara sensible saja.

Kelembaban relative pada sistem evaporatif langsung juga lebih tinggi dibanding system tak langsung.

Efisiensi saturasi pada sistem evaporatif langsung juga lebih tinggi dibanding system tak langsung.

## 6. REFERENSI

- American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE), 2015, *Handbook of HVAC Application*, Atlanta
- A.K.M. Mohiuddin, K. Kant, Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers, Part I: Selection and tower characteristics, *Int. J. Refrig* 19 (1996) 43–51.
- A.K.M. Mohiuddin, K. Kant, Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers, Part II: Fill and other design parameters, *Int. J. Refrig* 19 (1996) 52–60.
- B. Givoni, N. Al Hemiddi, Applicability of a “shower” passive cooling tower in hot dry climate, 20th National Passive Solar Conference. Minneapolis, 1995, 15, pp. 143–148.
- B. Givoni, Performance of the shower cooling tower in different climates, *Renew. Energy* 10 (1996) 173–178.
- H.R. Goshayshi, J.F. Missenden, R. Tozer, Cooling tower-an energy conservation resource, *Appl. Therm. Eng.* 19 (1999) 1223–1235.

- J. Alrahman-Khan, S.M. Zubair, Performance characteristics of counter flow wet cooling towers, *Energy Convers. Manage.* 44 (2003) 2073–2091.
- J.J. Jiang, X.H. Liu, Y. Jiang, Experimental and numerical analysis of a cross-flow closed wet cooling tower, *Appl. Therm. Eng.* 61 (2013) 678–689.
- J.R. Picardo, J.E. Variyar, The Merkel equation revisited: a novel method to compute the packed height of a cooling tower, *Energy Convers. Manage.* 57 (2012) 167–172.
- Li Wang, Li Nianping, Exergy transfer and parametric study of counter flow wet cooling tower, *Appl. Therm. Eng.* 31 (2011) 954–960.
- M. Zunaid, M. Murtaza, S. Gautam, Energy and performance analysis of multi droplets shower cooling tower at different inlet water temperature for air cooling application, *Appl. Therm. Eng.* 121 (2017) 1070–1079
- Q. Xiaoni, L. Zhenyan, L. Dandan, Performance characteristics of a shower cooling tower, *Energy Convers. Manage.* 48 (2007) 193–203.
- Q. Xiaoni, L. Yongqi, L. Zhenyan, Numerical simulation of shower cooling tower based on artificial neural network, *Energy Convers. Manage.* 49 (2008) 724–732.
- Q. Xiaoni, L. Zhenyan, Further investigation on the performance of a shower cooling tower, *Energy Convers. Manage.* 49 (2008) 570–577.
- Q. Xiaoni, L. Zhenyan, L. Dandan, Prediction of the performance of a shower cooling tower based on projection pursuit regression, *Appl. Therm. Eng.* 28 (2008) 1031–1038.
- Q. Xiaoni, L. Yongqi, L. Zhenyan, Exergy based performance analysis of a shower cooling tower, *Mech. Eng.* 59 (2013) 251–259.
- Q. Xiaoni, L. Yongqi, G. Qianjian, Y. Jie, Y. Shanshan, Performance prediction of seawater shower cooling towers, *Energy* 97 (2016) 435–443.
- T. Muangnoi, W. Asvapoositkul, P. Hungspreugs, Performance characteristics of a downward spray water-jet cooling tower, *Appl. Therm. Eng.* 69 (2014) 165–176.
- W. Asvapoositkul, M. Kuansathan, Comparative evaluation hybrid (dry/wet) cooling tower performance, *Appl. Therm. Eng.* 71 (2014) 83–93.
- Wang, Shan K., 2001, *HANDBOOK OF AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION*, Second edition, Mc.Graw Hill, CBC
- Y. Satoshi, B. Givoni, Experimental performance of the shower cooling tower in Japan, *Renewable Energy* 10 (1996) No. 179-183.