



**ภาคผนวก ก**  
**คู่มือปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล**  
**การทดลองการทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์**  
**( Cooling Tower Apparatus )**

**1. บทนำ**

ในกระบวนการต่างๆ ที่มีความร้อนเกิดขึ้น การระบายความร้อนให้แก่ระบบจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรักษาอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหาย และเพื่อรักษาประสิทธิภาพในการทำงานของไว้ Cooling Tower เป็นชุดอุปกรณ์ที่ถูกเลือกให้เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับระบบ ซึ่งจะใช้น้ำเป็นตัวเข้าไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับระบบนั้น เมื่อน้ำรับความร้อนจากระบบน้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและน้ำที่มีอุณหภูมิสูงนี้จะถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศที่ Cooling Tower เพื่อให้มีอุณหภูมิลดลง แล้วนำน้ำที่ได้นี้ไปหมุนเวียนแลกเปลี่ยนกับระบบต่างๆอีกครั้ง ระบบที่ใช้ Cooling Tower เช่น โรงจักรไฟฟ้า , ระบบปรับอากาศ , เครื่องอัดอากาศ , กระบวนการชุบแข็ง ฯลฯ

**2. จุดประสงค์**

- 2.1 เพื่อศึกษาระบบการทำงานของ Cooling Tower
- 2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower

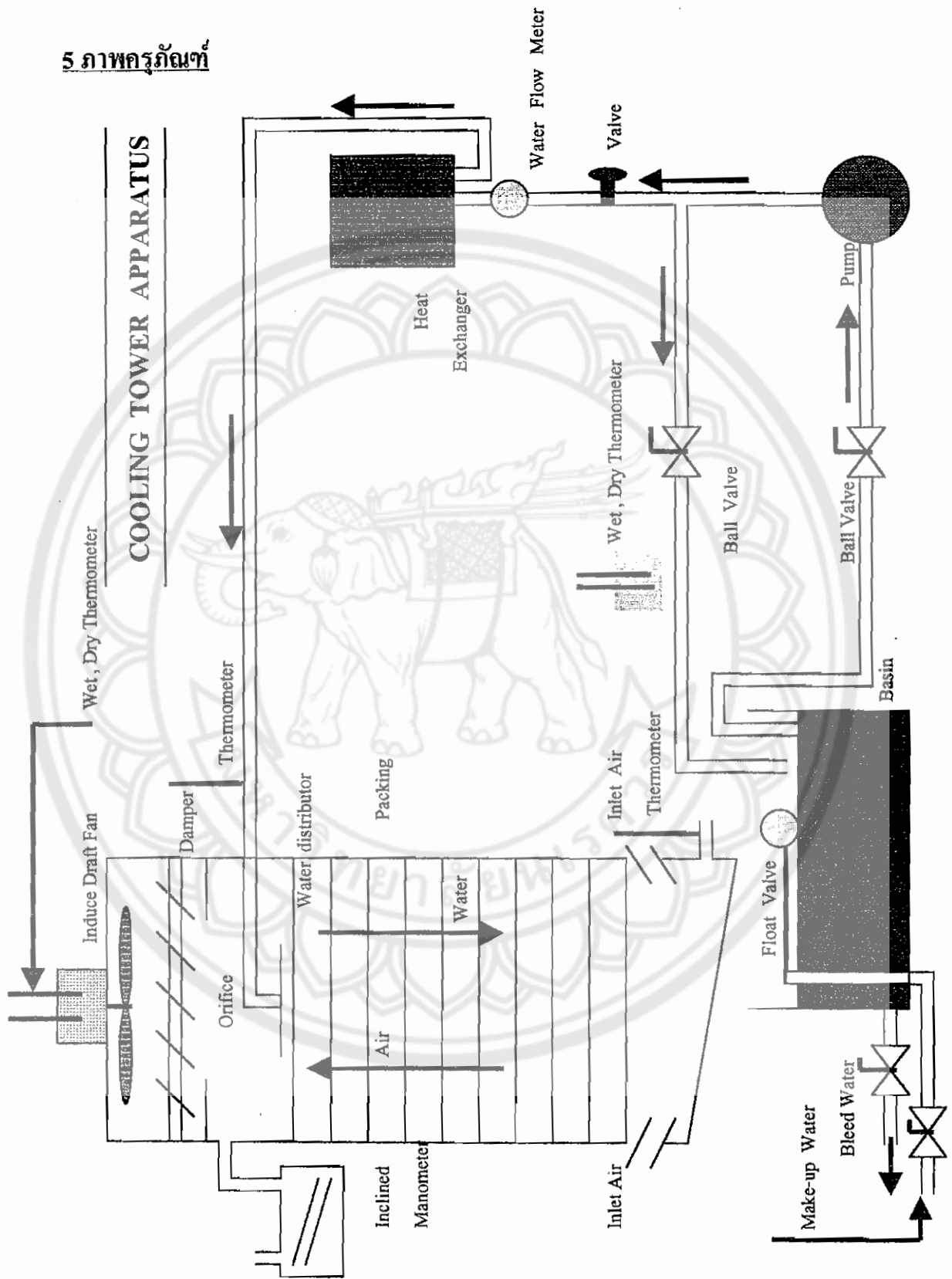
**3. เป้าหมาย**

- 3.1 ผู้ทำการทดลองสามารถอธิบายระบบการทำงานของ Cooling Tower
- 3.2 ผู้ทำการทดลองสามารถออกแบบพัฒนาให้ Cooling Tower มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น

**4. เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์สำหรับปฏิบัติการ**

ชุดทดลองการทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์

5 ภาพครุภัณฑ์



## 6. สัญลักษณ์, หน่วย และตัวห้อยท้าย

| สัญลักษณ์            | ปริมาตร   | หน่วย                   |
|----------------------|---|-------------------------|
| $M_w^{\bullet}$      | อัตราการแพร่มวลไอน้ำผ่านผิวรวม                    | kg / s                  |
| $\lambda_w$          | ความร้อนแฝงจำเพาะของไอน้ำที่แพร่กระจายออก         | kJ / kg                 |
| $Q_{diff}^{\bullet}$ | อัตราความร้อนแพร่กระจายคิดไปกับไอน้ำ              | kW                      |
| $Q_{scn}^{\bullet}$  | อัตราความร้อนถ่ายเทจากอากาศสู่น้ำโดยการพาความร้อน | kW                      |
| $\alpha$             | สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวรวม                | kW / m <sup>2</sup> -K  |
| $A_i$                | พื้นที่ผิวหยดน้ำ                                  | m <sup>2</sup>          |
| $K_g$                | สัมประสิทธิ์ฟิล์มของการแพร่                       | s / m                   |
| $t_i$                | อุณหภูมิที่ผิวรวม                                 | °C                      |
| $P_i$                | ความดันย่อยของไอน้ำที่ผิวรวม                      | kPa                     |
| $P_a$                | ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ                        | kPa                     |
| $K_a'$               | สัมประสิทธิ์การแพร่                               | kg / m <sup>2</sup> - s |
| $w_i$                | อัตราส่วนความชื้นที่ผิวรวม                        | kg / kg                 |
| $w_a$                | อัตราส่วนความชื้นในอากาศ                          | kg / kg                 |
| $Q_w^{\bullet}$      | อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ                      | kW                      |
| $Q_a^{\bullet}$      | อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ                    | kW                      |
| $m_w^{\bullet}$      | อัตราการไหลของน้ำ                                 | kg / s                  |
| $m_a^{\bullet}$      | อัตราการไหลของอากาศ                               | kg / s                  |
| $C_{p_w}$            | ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำที่ความดันคงที่      | kJ/kg-K                 |
| $t_{wi}$             | อุณหภูมิของน้ำทางเข้า Cooling Tower               | °C                      |
| $t_{wo}$             | อุณหภูมิของน้ำทางออก Cooling Tower                | °C                      |
| $t_{wbi}$            | อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศทางเข้า Cooling Tower | °C                      |
| $t_{ao}$             | อุณหภูมิของอากาศทางออก Cooling Tower              | °C                      |
| $h_{ai}$             | เอนทาลปีของอากาศตรงทางเข้า Cooling Tower          | kJ / kg                 |
| $h_{ao}$             | เอนทาลปีของอากาศตรงทางออก Cooling Tower           | kJ / kg                 |
| $\Delta h_m$         | ศักย์ขับเคลื่อนความร้อนเฉลี่ย                     | kJ / kg                 |

| สัญลักษณ์  | ปริมาตร   | หน่วย   |
|------------|---|---|
| $K_a$      | สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร  | $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$                       |
| $L$        | ความสูงของแผงขยายฟิล์มน้ำ   | m   |
| $A$        | พื้นที่ภาคตัดขวางของแผงขยายฟิล์มน้ำ   | $\text{m}^2$  |
| $f$        | ตัวประกอบสตีเฟน   |   |
| $h_{wm}$   | เอนทาลปีของเส้นโค้งอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ย   | $\text{kJ}/\text{kg}$                                       |
| $h_{un}$   | เอนทาลปีสภาวะของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย  | $\text{kJ}/\text{kg}$                                       |
| $c, m, n$  | ค่าคงที่สำหรับแผงขยายฟิล์มน้ำ   |   |
| Re         | Reynold's number  |   |
| $V$        | ความเร็วของอากาศ  | m/s   |
| $D$        | เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ  | m   |
| $\nu$      | Kinematic viscosity of air  | $\text{m}^2/\text{s}$                                       |
| $C$        | Discharge coefficient   |   |
| $C_d$      | Flow coefficient  |   |
| $h_s$      | ผลต่างความดันจากมานอมิเตอร์   | mmH <sub>2</sub> O  |
| $g_c$      | Conversion factor   | $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)$ |
| $\rho$     | ความหนาแน่นของอากาศ (Density of air)  | $\text{kg}/\text{m}^3$                                      |
| $U$        | ปริมาตรจำเพาะ (Specific volume)   | $\text{m}^3/\text{kg}$                                      |
| Range      | ค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้ากับน้ำออก  | $^{\circ}\text{C}$  |
| Approach   | ค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำออกกับอุณหภูมิ<br>กระเปาะเปียกของอากาศเข้า                           | $^{\circ}\text{C}$  |
| $\epsilon$ | ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower<br>(Effectiveness of A Counterflow Cooling Tower) |   |

### คุณลักษณะเฉพาะ

|                  |  |
|------------------|--|
| พัดลมดูดอากาศ    | ขนาดใบพัด 16 นิ้ว , 1/4 hp , 1425 rpm , 2.4 A , 220 V  |
| ปั๊ม             | Q = 40 l/min , ขนาด 1/2 hp , 2.5 A , 220 V , 0.37 kW<br>Head = 40 m , 1450 rpm และขนาดท่อดูดและท่อส่ง 1 นิ้ว   |
| เครื่องทำน้ำอุ่น | $P_{\max} = 51.20 \text{ psi} = 353.01 \text{ kPa}$ , $P_{\min} = 3.00 \text{ psi} = 20.68 \text{ kPa}$<br>Heater 5,500 W , 25 A , 220 V , 50 Hz<br>Temperature range 32-57 $^{\circ}\text{C}$ |

## เครื่องมือวัด

|                           |   |
|---------------------------|---|
| การวัดอัตราการไหลของอากาศ | แผ่น Orifice พร้อม Manometer แบบเอียง   |
| การวัดอุณหภูมิ            | เทอร์โมมิเตอร์หลอดแก้วแบบกระเปาะเปียกและ<br>กระเปาะแห้ง ความยาว 300 มม. 6 ตัว |
| การวัดอัตราการไหลของน้ำ   | มาตรวัดน้ำ  |

## ความต้องการบริการ

|       |                     |
|-------|---------------------|
| ไฟฟ้า | 220 V. 50 Hz. 32 A. |
|-------|---------------------|

## 7. ทฤษฎีพื้นฐาน

### ชนิดของ Cooling Tower

แบ่งตามวิธีการหมุนเวียนของอากาศ Cooling Tower แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

#### 1. Natural Draft

จะให้อากาศเคลื่อนไหวตามธรรมชาติ เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศของ Cooling Tower แบบนี้สมรรถนะของ Cooling Tower จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลมที่พัดผ่านโดยทั่วไปจึงติดตั้ง Cooling Tower ชนิดนี้ไว้กลางแจ้งเพื่อให้ลมพัดผ่านได้ตลอดตัว

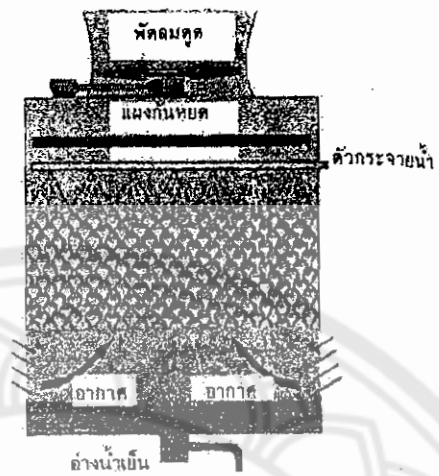
#### 2. Mechanical Draft

จะใช้พัดลมทำให้อากาศหมุนเวียน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดพัดลมดูด ( Induced Draft ) และชนิดพัดลมเป่า ( Forced Draft ) โดยปกติถ้าใช้พัดลมจะเป็นชนิดดูดและถ้าใช้ Blower จะเป็นชนิดพัดลมเป่า เนื่องจาก Cooling Tower ชนิดนี้มีพัดลม หรือ Blower พัดพาอากาศจึงสามารถติดตั้งไว้ในที่ร่มได้ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ Cooling Tower ชนิด Mechanical Draft จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า ชนิด Natural Draft

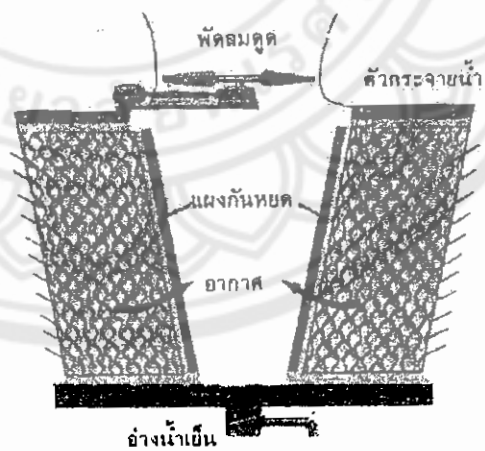
โดยทั่วไป Cooling Tower ชนิด Natural Draft และ Mechanical Draft จะสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 รูปแบบ คือ แบบไหลสวนทาง ( Counter flow tower ) และแบบไหลขวาง ( Cross flow tower ) ซึ่งต่างก็ประกอบด้วยชิ้นส่วนร่วมกันคือระบบการไหลของอากาศ ระบบการกระจายน้ำ และระบบพื้นผิวที่ถ่ายเทความร้อน เพียงแต่มีการจัดวางต่างกันไปเท่านั้น

แบบไหลสวนทาง ( Counter flow tower ) การสัมผัสจะเกิดในแนวสวนทางกัน คือ อากาศจะไหลขึ้นจากทางด้านล่าง สวนทางกับน้ำที่ตกลงมาจากด้านบน

แบบไหลขวาง ( Cross flow tower ) อากาศเย็นจะไหลในแนวราบผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ และสัมผัสในแนวตั้งฉากกับน้ำที่ไหลลงมาจากด้านบน

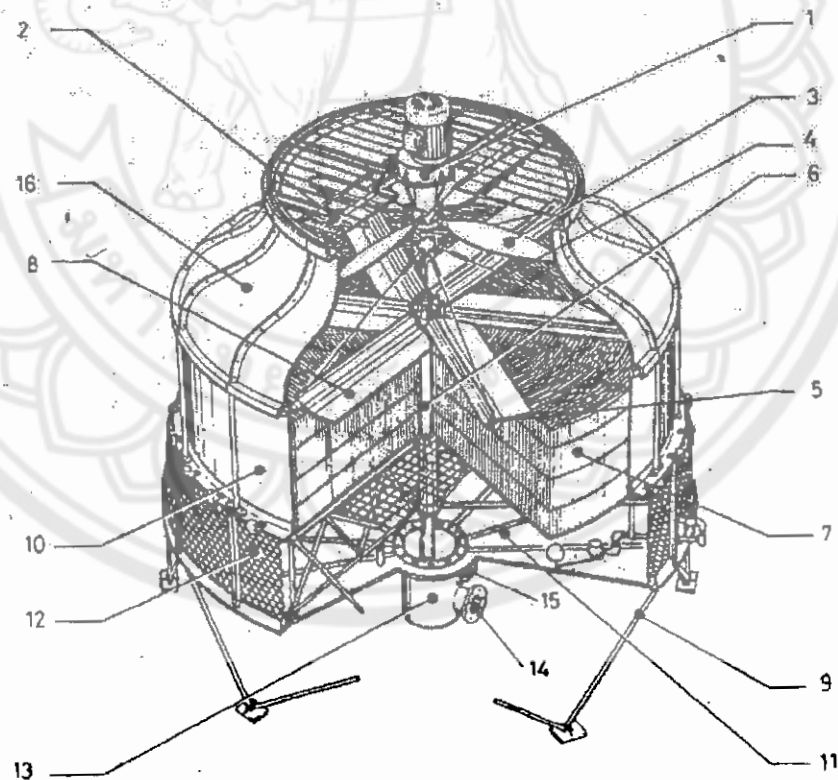


รูปที่ 1 Cooling Tower ชนิด Mechanical draft counter flow  
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหกรรม ฉบับที่ 105, ไพบุลย์ ศรีภาสกร )



รูปที่ 2 Cooling Tower ชนิด Mechanical draft cross flow  
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหกรรม ฉบับที่ 105, ไพบุลย์ ศรีภาสกร )

การทำงานของ Cooling Tower แบบอากาศไหลสวนทางกับน้ำ ( รูปที่ 3 ) น้ำร้อนจะไหลเข้าสู่ท่อน้ำร้อนเข้า (14) ผ่านท่อน้ำร้อนออก (6) ผ่านหัวจ่ายน้ำ (4) และจะจ่ายน้ำร้อนออกที่ท่อจ่ายน้ำ (5) น้ำร้อนขณะไหลออกจากท่อจะมีแรงขับเคลื่อนทำให้ท่อจ่ายน้ำหมุนรอบแกนหัวจ่ายน้ำ (4) น้ำร้อนจะราดลงบนแผงขยายฟิล์มน้ำ (7) แผงขยายฟิล์มน้ำจะทำหน้าที่แผ่กระจายน้ำร้อนออกเป็นพื้นที่ที่กว้าง น้ำร้อนจะไหลลงสู่เบื้องล่างด้วยแรงดึงดูดของโลก พัดลม (3) จะดูดอากาศเข้าทางช่องอากาศเข้า (12) ผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (7) สวนทางกับทิศการไหลของน้ำ ขณะที่น้ำไหลสวนทางกับอากาศ น้ำร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ กลายเป็นน้ำเย็น (11) น้ำเย็นในถาดรองรับน้ำเย็นจะถูกใช้ระบายความร้อนกลายเป็นน้ำร้อนกลับเข้าทางท่อน้ำร้อนเข้า (14)

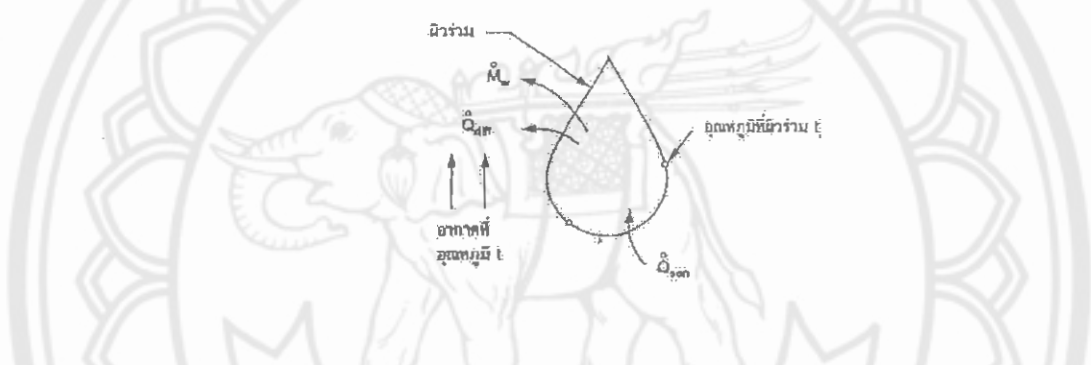


รูปที่ 3 การทำงานของ Cooling Tower ชนิด Mechanical draft counter flow  
(ที่มา: 65 เรื่อนำรู้เทคนิคเครื่องกล , สิทธิชัย วงษ์รัตนสุภรณ์ )



## ปริมาณความร้อนถ่ายเทระหว่างหยดน้ำกับอากาศ

ของไหลทำงานที่ไหลผ่าน Cooling Tower มี 2 ชนิด คือ น้ำ และอากาศ ขณะที่น้ำไหลผ่านแผงกระจายน้ำจะทำให้น้ำกระจายแผ่เต็มแผงขยายฟิล์มน้ำ จึงทำให้น้ำขณะไหลผ่านสัมผัสกับอากาศนั้น จะระเหยตัวกลายเป็นไอน้ำ และเข้าไปในอากาศจึงทำให้อากาศมีความชื้นสูงขึ้น ส่วนน้ำจะเย็นลงเนื่องจากการดึงความร้อนจากน้ำ เพื่อใช้ระเหยตัว และแพร่กระจายผ่านผิวร่วม (Interface) ระหว่างหยดน้ำและอากาศ กลไกในการถ่ายเทจึงมีทั้งการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อน จากความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทออกจากหยดน้ำนั้นประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นความร้อนแฝงที่ติดไปกับไอน้ำที่ถ่ายเทความร้อนผ่านผิวร่วม และการถ่ายเทสู่อากาศโดยการพาความร้อนต่อไป



รูปที่ 4 การถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างหยดน้ำกับอากาศ

(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหกรรม ฉบับที่ 141, รศ.มนตรี พิรุณเกษร)

ดังนั้นอัตราการความร้อนที่แพร่กระจายติดไปกับไอน้ำที่ระเหยออกจากหยดน้ำ คำนวณจาก

$$Q_{diff} = M_w \lambda_w \quad (1)$$

$M_w$  = อัตราการแพร่มวลไอน้ำผ่านผิวร่วม , kg / s

$\lambda_w$  = ความร้อนแฝงจำเพาะของไอน้ำที่แพร่กระจายออก , kJ / kg

$Q_{diff}$  = อัตราความร้อนแพร่กระจายติดไปกับไอน้ำ , kW

เนื่องจากอุณหภูมิกระเปาะเปียกต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศ ( อุณหภูมิกระเปาะแห้ง ) ดังนั้นอุณหภูมิผิวร่วม ( $t_d$ ) จึงต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศ ( $t$ ) จึงทำให้ความร้อนถ่ายเทออกจากอากาศสู่หยดน้ำโดยการพาความร้อน ซึ่งคำนวณจาก

$$Q_{sen} = \alpha A_f (t - t_d) \quad (2)$$

$Q_{sen}$  = อัตราความร้อนถ่ายเทจากอากาศสู่หยดน้ำโดยการพาความร้อน

$\alpha$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวร่วม , kW / m<sup>2</sup> K

$A_f$  = พื้นที่ผิวหยดน้ำ , m<sup>2</sup>

ภายใต้จุดสมดุล อุณหภูมิของหยดน้ำจะคงที่และเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ถ้า  
อุณหภูมิกระเปาะเปียกเสถียรที่จุดนี้ จะพบว่า  $\dot{Q}_{diff} = \dot{Q}_{sen}$

ถ้าสำหรับอัตราการแพร่มวลไอน้ำผ่านผิวร่วมสามารถหาในรูปของความดันย่อย ดังนี้

$$\dot{M}_w = K_g A (P_i - P_a) \quad (3)$$

$K_g$  = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของการแพร่ , s/m

$P_i$  = ความดันย่อยของไอน้ำที่ผิวร่วม , kPa

$P_a$  = ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ , kPa

หรือเขียนในรูปสมการของ

$$\dot{M}_w = K_a' A_i (w_i - w_a) \quad (4)$$

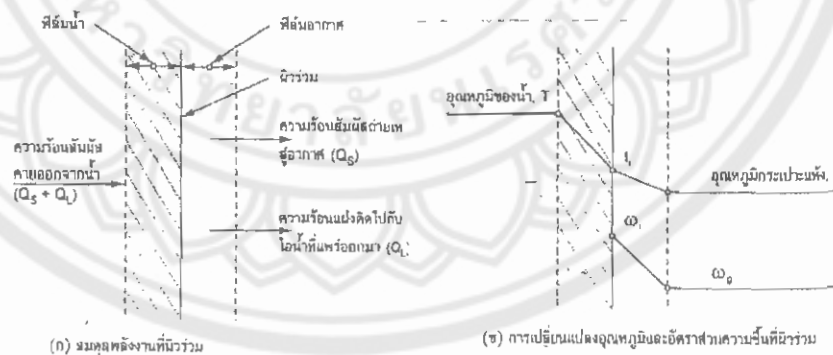
$K_a'$  = สัมประสิทธิ์การแพร่ , kg/m<sup>2</sup>s

$w_i$  = อัตราส่วนความชื้นที่ผิวร่วม , kg/kg

$w_a$  = อัตราส่วนความชื้นในอากาศ , kg/kg

จากสมการ (1) , (2) และ (4) พิจารณาที่จุดสมดุล อุณหภูมิหยดน้ำเท่ากับอุณหภูมิ  
กระเปาะเปียกของอากาศ

$$w_i - w_a = \alpha (t_i - t_a) / K_a' \lambda_w \quad (5)$$

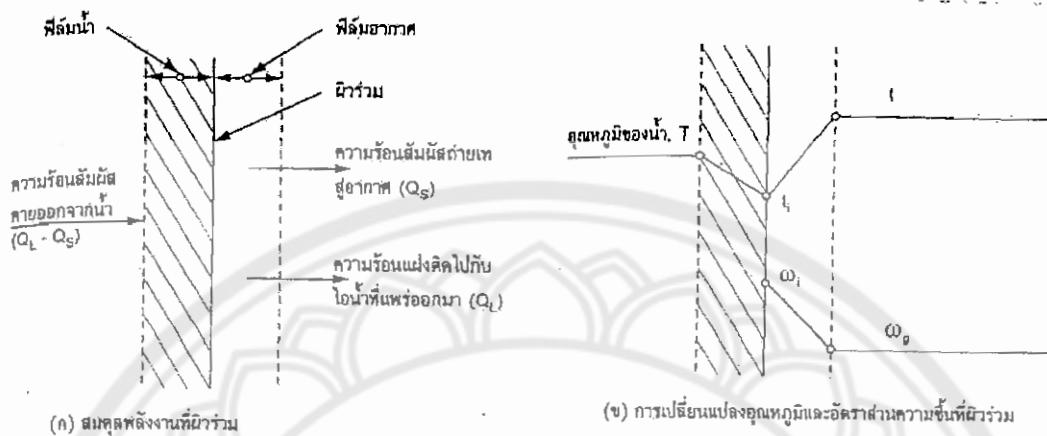


(ก) สมดุลพลังงานที่ผิวร่วม

(ข) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นที่ผิวร่วม

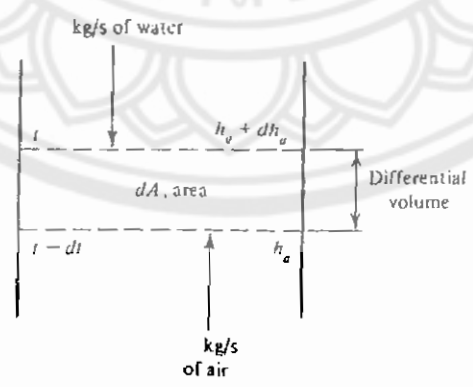
รูปที่ 5 การถ่ายเทความร้อนใน Cooling Tower เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ  
กระเปาะแห้งของอากาศ

(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหกรรม ฉบับที่ 141 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)



รูปที่ 6 การถ่ายเทความร้อนใน Cooling Tower เมื่ออุณหภูมิน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิ  
 ระยะเวลา แห่งของอากาศ  
 (ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหกรรม ฉบับที่ 141 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)

การถ่ายเทความร้อนใน Cooling Tower



รูปที่ 7 การแลกเปลี่ยนพลังงานใน Cooling Tower ชนิด Mechanical draft counterflow  
 (ที่มา:Refrigeration and Air Condition , Wilbert F.Stoecker, Jerold W.Jones, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill)

จาก \*Analysis of a counter flow cooling tower

$$dQ = m_a \dot{d}h_a = m_w \dot{C}p_w dt \quad (6)$$

$$\int dQ = \int m_a \dot{d}h_a = \int m_w \dot{C}p_w dt \quad \text{จะได้}$$

$$Q_a = Q_w$$

$$m_a (h_{a0} - h_{a1}) = m_w C p_w (t_{w1} - t_{w0}) \quad (7)$$

ดังนั้นจะได้

$$Q_a = m_a (h_{a0} - h_{a1}) \quad (8)$$

$$Q_w = m_w C p_w (t_{w1} - t_{w0}) \quad (9)$$

และในการคำนวณประสิทธิภาพถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower (Effectiveness of A Counterflow Cooling Tower) สามารถหาได้จากสมการ

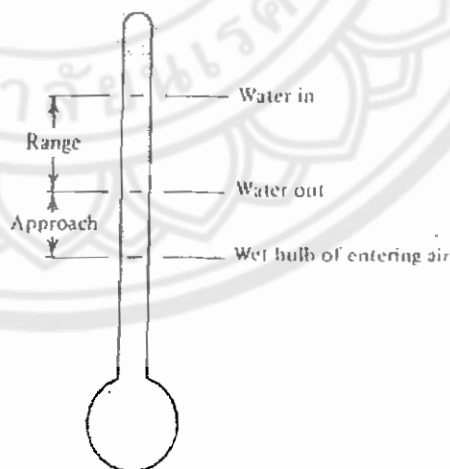
$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= Q_{\text{actual}} / Q_{\text{theory}} \\ &= m_w C p_w (t_{w1} - t_{w0}) / m_w C p_w (t_{w1} - t_{wb}) \\ \mathcal{E} &= (t_{w1} - t_{w0}) / (t_{w1} - t_{wb}) \quad (10) \end{aligned}$$

$$\text{Range} = t_{w1} - t_{w0}$$

$$\text{Approach} = t_{w0} - t_{wbi}$$

ดังนั้นจะได้

$$\mathcal{E} = \text{Range} / (\text{Range} + \text{Approach})$$



รูปที่ 8 Range and approach in a Cooling Tower

(ที่มา: Refrigeration and Air Condition, Wilbert F. Stoecker, Jerold W. Jones, 2<sup>nd</sup> edition, McGraw-Hill)

เมื่อ  $Q_{\text{actual}}^{\bullet}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงของ Cooling Tower

$Q_{\text{theory}}^{\bullet}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนทางทฤษฎีของ Cooling Tower

$\epsilon$  = ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower (Effectiveness of A Counterflow Cooling Tower)

$Q_w^{\bullet}$  = อัตราความร้อนถ่ายเทออกจากน้ำทั้งหมด, kW

$Q_a^{\bullet}$  = อัตราความร้อนถ่ายเทสู่อากาศ, kW

$m_w^{\bullet}$  = อัตราการไหลของน้ำ, kg/s

$m_a^{\bullet}$  = อัตราการไหลของอากาศ, kg/s

$Cp_w$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำที่ความดันคงที่  
= 4.19 kJ/kg-K

$t_{wi}$  = อุณหภูมิของน้ำทางเข้า Cooling Tower, °C

$t_{wo}$  = อุณหภูมิของน้ำทางออก Cooling Tower, °C

$t_{wbi}$  = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเข้า Cooling Tower, °C

$h_{ai}$  = เอนทาลปีของอากาศตรงทางเข้า Cooling Tower, kJ/kg

$h_{ao}$  = เอนทาลปีของอากาศตรงทางออก Cooling Tower, kJ/kg

สมการที่ (7) เป็นสมการจากสมดุลพลังงานโดยไม่คิดการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก คุณสมบัติ  $h_a$  หาจากตารางที่ 3

### การคำนวณอัตราการไหลของอากาศจาก Orifice

การคำนวณจาก Orifice สามารถคำนวณได้จาก Discharge Coefficient และ Flow Coefficient

การไหลในท่อแบบ Incompressible Flow จะใช้ Bernoulli's Equation เมื่อ  $\Delta P.E = 0$  จะได้

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g_c} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g_c} \quad (11)$$

จากสมการการไหลแบบ Continuity Equation จะได้ค่า  $V_1$ ,

$$V_1 = V_2 (A_2/A_1) \quad (12)$$

แทนค่าสมการ (11) ในสมการ (12) จะได้

$$V_2 = \frac{1}{[1-(A_2/A_1)^2]^{1/2}} [2g_c (p_1-p_2)/\rho]^{1/2} \quad (13)$$

เมื่อ Discharge Coefficient ,C

$$C = Q_{Actual} / Q_{Ideal} \tag{14}$$

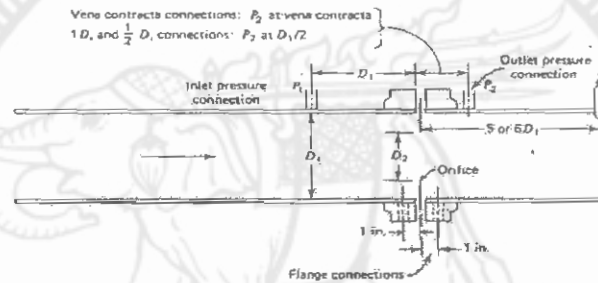
จากสมการที่ ( 13 ) และ ( 14 ) จะได้

$$Q_{Actual} = \frac{CA_2}{[1-(A_2/A_1)^2]^{1/2}} [2g_c (p_1-p_2)/\rho]^{1/2} \tag{15}$$

ดังนั้น Flow Coefficient, C<sub>d</sub>,

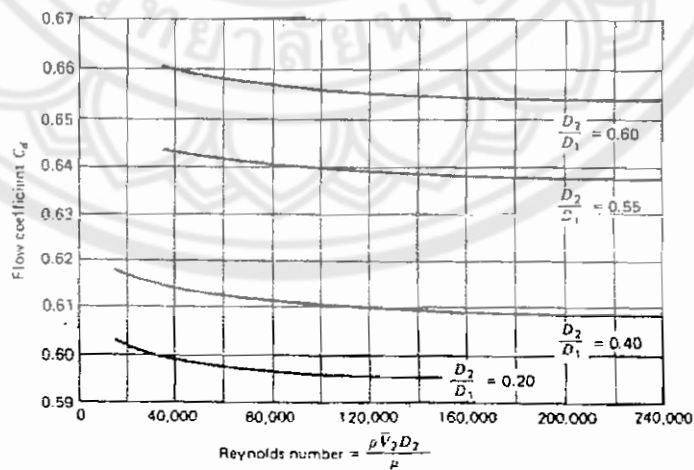
$$C_d = \frac{C}{[1-(A_2/A_1)^2]^{1/2}} \tag{16}$$

และ C<sub>d</sub> หาได้จากรูปที่ 10



รูปที่ 9 Orifice plate

(ที่มา: Heating Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design , Faye C.McQuiston ,Jerald D.Parker , 4<sup>th</sup> edition , 1994 , John Wiley & Sons,Inc.)



รูปที่ 10 แผนภูมิ Flow Coefficient

(ที่มา : Heating Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design , Faye C.McQuiston ,Jerald D.Parker , 4<sup>th</sup> edition , 1994 , John Wiley & Sons,Inc.)

## 8. ความปลอดภัยขณะทำการทดลอง

ขณะทำการทดลองอาจเกิดอุบัติเหตุขึ้น จึงจำเป็นต้องหามาตรการป้องกันและแก้ไข ดังนี้

- 8.1 ครุภัณฑ์ที่ใช้ในการทดลองใช้พลังงานไฟฟ้า จึงอาจเกิดการลัดวงจรหรือไฟฟ้ารั่วได้ จึงควรสวมรองเท้าที่เป็นฉนวนขณะทำการทดลอง
- 8.2 การเดินเครื่องอุปกรณ์ต้องเดินเครื่องปั๊มก่อน แล้วตามด้วยพัดลมและเครื่องทำน้ำอุ่นตามลำดับ
- 8.3 ในกรณีฉุกเฉินใดๆ ให้ผู้ทำการทดลองปิดสวิทช์ หรือถอดปลั๊ก

## 9. ขั้นตอนการทดลอง

1. เปิดน้ำเข้าอ่างเก็บ โดยมีวาล์วลูกกลอยควบคุมระดับน้ำ
2. อ่านค่าผลต่างความดันเริ่มต้นจากमानอมิเตอร์
3. เปิดพัดลม ปรับอุปกรณ์ปรับปริมาณอากาศให้ได้ผลต่างความดันจากमानอมิเตอร์มีค่าสูงสุด ซึ่งมีค่าประมาณ  $4 \text{ mmH}_2\text{O}$
4. เปิดปั๊มน้ำ ปรับอัตราการไหลของน้ำให้ได้ค่า  $Q_w$  (ค่าแนะนำ : ประมาณ 1 ลิตรต่อ 11 วินาที) โดยใช้นาฬิกาจับเวลา ( ถ้าปั๊มคุดน้ำไม่ขึ้นให้ทำการล่อน้ำ )
5. เปิดเครื่องทำน้ำอุ่น ปรับอุณหภูมิน้ำเข้าให้ได้ค่า  $t_{wi}$  ประมาณ  $42^\circ\text{C}$
6. รอประมาณ 10 นาทีเพื่อให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำการบันทึกค่าอุณหภูมิน้ำเข้า ( $t_{wi}$ ), น้ำออก ( $t_{wo}$ ), อุณหภูมิอากาศเข้า ( $t_{ai}$ ), อากาศออก ( $t_{ao}$ ) ทั้งกระเปาะเปียก(CWB)และกระเปาะแห้ง(CDB), อัตราการไหลของน้ำ ( $Q_w$ ) และผลต่างความดันจากमानอมิเตอร์ลงในตารางบันทึกผลการทดลอง
7. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 6. แต่ปรับอัตราการไหลของอากาศให้ได้ค่าผลต่างความดันจากमानอมิเตอร์มีค่าประมาณ  $2.5 \text{ mmH}_2\text{O}$
8. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 5 – 7 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิน้ำเข้าให้ได้ค่า  $t_{wi}$  ประมาณ  $38^\circ\text{C}$
9. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 5 – 7 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิน้ำเข้าให้ได้ค่า  $t_{wi}$  ประมาณ  $34^\circ\text{C}$
10. ทำการทดลองซ้ำ ข้อ 3 – 9 แต่เปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำให้ได้ค่า  $Q_w$  (ค่าแนะนำ : ประมาณ 1 ลิตรต่อ 16 วินาที) โดยใช้นาฬิกาจับเวลา
11. เมื่อทำการทดลองเสร็จให้ปิดสวิทช์เครื่องทำน้ำอุ่น ปั๊ม และพัดลมตามลำดับ (ต้องปิดเครื่องทำน้ำอุ่นก่อนปิดปั๊มทุกครั้งเพื่อความปลอดภัย)

12. นำค่าที่บันทึกไปคำนวณหา อัตราการไหลของน้ำโดยมวล ( $m_w^\circ$ ), อัตราการไหลของอากาศโดยมวล ( $m_a^\circ$ ) อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ ( $Q_w^\circ$ ), อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ ( $Q_a^\circ$ ) และประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน ( $E$ )
13. นำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ และพล็อตกราฟระหว่าง  $Q_w^\circ, Q_a^\circ$  กับข้อมูล  $E$  กับเงื่อนไขการทดลอง และระหว่างเอนทัลปีกับ อุณหภูมิ

### 10. ตารางผลการทดลอง

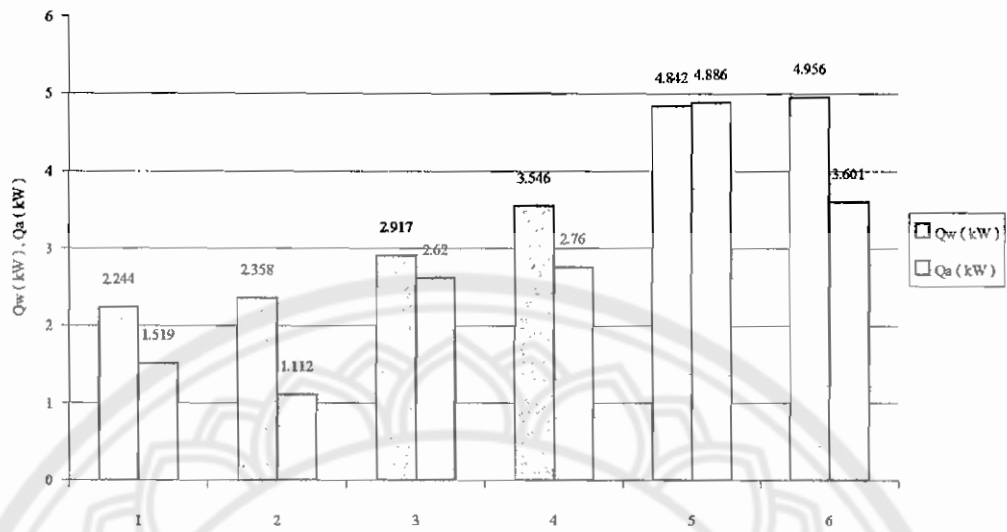
ตารางบันทึกผลการทดลอง

| อัตราการไหลของน้ำ (L/s) | ข้อมูล ที่ | ผลต่างความดัน จาก Manometer (mmH <sub>2</sub> O) | อุณหภูมิน้ำ (C) |          | อุณหภูมิอากาศ (C) |      |      |      |
|-------------------------|------------|--|-----------------|----------|-------------------|------|------|------|
|                         |            |  | เข้า            | ออก      | เข้า              |      | ออก  |      |
| ( $Q_w$ )               |            |  | $t_{wi}$        | $t_{wo}$ | CWB               | CDB  | CWB  | CDB  |
| 1/11.0                  | 1          | 2.5  | 33.9            | 28       | 26                | 31.1 | 26.7 | 31   |
|                         | 2          | 4.1  | 33.9            | 27.7     | 26                | 32.1 | 26.4 | 39.7 |
|                         | 3          | 2.5  | 37.9            | 29.2     | 26                | 32.2 | 27.2 | 31.6 |
|                         | 4          | 4.05   | 37.9            | 28.6     | 26                | 32.2 | 27   | 30   |
|                         | 5          | 2.5  | 42.8            | 30.1     | 26                | 32   | 28.2 | 31.9 |
|                         | 6          | 4  | 42.4            | 29.4     | 26                | 32   | 27.3 | 30.3 |
| 1/16.17                 | 1          | 2.5  | 34              | 27.9     | 26                | 32.2 | 26.3 | 31.2 |
|                         | 2          | 4  | 34              | 27.5     | 26                | 32.3 | 26.2 | 30.2 |
|                         | 3          | 2.5  | 38.5            | 28.6     | 26                | 32.9 | 27   | 31.7 |
|                         | 4          | 4  | 38              | 28.1     | 26                | 32.3 | 26.8 | 30.9 |
|                         | 5          | 2.5  | 42.3            | 29.5     | 26                | 33   | 27.2 | 32.1 |
|                         | 6          | 4  | 42.3            | 29       | 26                | 33   | 27   | 31.5 |

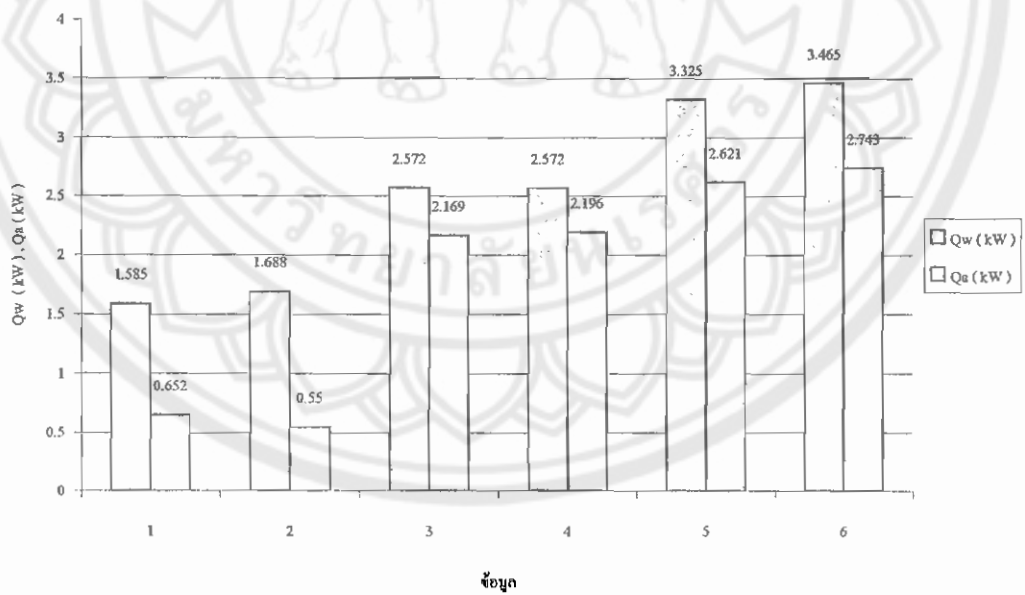


## ตารางบันทึกผลการคำนวณ

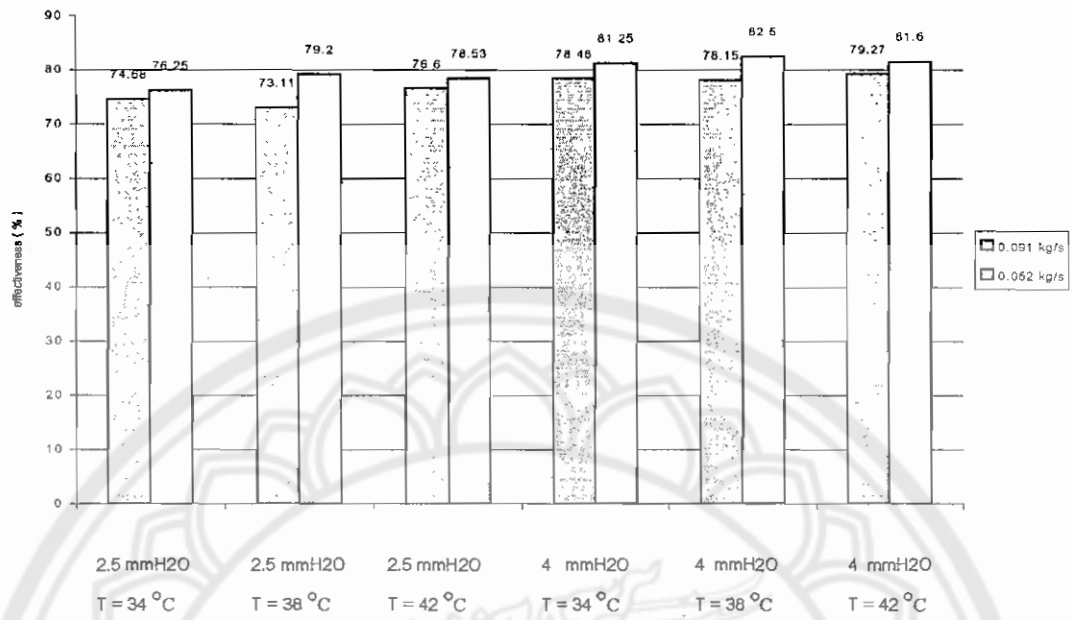
| อัตราการไหลของน้ำ | ข้อมูล | เอนทาลปีของน้ำที่อากาศเข้า | เอนทาลปีของอากาศเข้า | เอนทาลปีของอากาศออก | ปริมาตรจำเพาะของอากาศออก | เอนทาลปีของน้ำเข้า | เอนทาลปีของน้ำออก | อัตราการไหลของน้ำ | อัตราการไหลของอากาศ | อัตราการถ่ายเทความร้อน | ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน |
|-------------------|--------|----------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|
| $Q_w$             |        | $h_{wei}$                  | $h_{ai}$             | $h_{ao}$            | $v$                      | $h_{wi}$           | $h_{wo}$          | $Q_w$             | $Q_a$               | $Q_w^{\circ}$          | $Q_a^{\circ}$                |
| (L/s)             |        | (kJ/kg)                    | (kJ/kg)              | (kJ/kg)             | (m <sup>3</sup> /kg)     | (kJ/kg)            | (kJ/kg)           | (kg/s)            | (kg/s)              | (kW)                   | (kW)                         |
| 1/11.0            | 1      | 108.95                     | 80.777               | 83.917              | 0.8797                   | 141.962            | 117.310           | 0.091             | 0.4838              | 2.244                  | 1.519                        |
|                   | 2      | 108.95                     | 80.777               | 82.571              | 0.8782                   | 141.962            | 116.056           | 0.091             | 0.6201              | 2.358                  | 1.112                        |
|                   | 3      | 108.95                     | 80.777               | 86.201              | 0.8821                   | 158.673            | 122.320           | 0.091             | 0.4832              | 2.917                  | 2.62                         |
|                   | 4      | 108.95                     | 80.777               | 85.263              | 0.8811                   | 159.090            | 119.815           | 0.091             | 0.6153              | 3.546                  | 2.76                         |
|                   | 5      | 108.95                     | 80.777               | 90.932              | 0.8870                   | 178.854            | 126.078           | 0.091             | 0.4818              | 4.842                  | 4.886                        |
|                   | 6      | 108.95                     | 80.777               | 86.670              | 0.8826                   | 177.082            | 123.155           | 0.091             | 0.611               | 4.956                  | 3.601                        |
| 1/16.17           | 1      | 108.95                     | 80.777               | 82.123              | 0.8777                   | 142.380            | 116.892           | 0.062             | 0.4844              | 1.585                  | 0.652                        |
|                   | 2      | 108.95                     | 80.777               | 81.674              | 0.8773                   | 142.380            | 115.220           | 0.062             | 0.6128              | 1.688                  | 0.55                         |
|                   | 3      | 108.95                     | 80.777               | 85.263              | 0.8811                   | 161.180            | 119.815           | 0.062             | 0.4834              | 2.572                  | 2.169                        |
|                   | 4      | 108.95                     | 80.777               | 84.366              | 0.8802                   | 158.673            | 117.730           | 0.062             | 0.6118              | 2.572                  | 2.196                        |
|                   | 5      | 108.95                     | 80.777               | 86.201              | 0.8821                   | 176.639            | 123.570           | 0.062             | 0.4832              | 3.325                  | 2.621                        |
|                   | 6      | 108.95                     | 80.777               | 85.263              | 0.8811                   | 176.639            | 121.485           | 0.062             | 0.6115              | 3.465                  | 2.743                        |



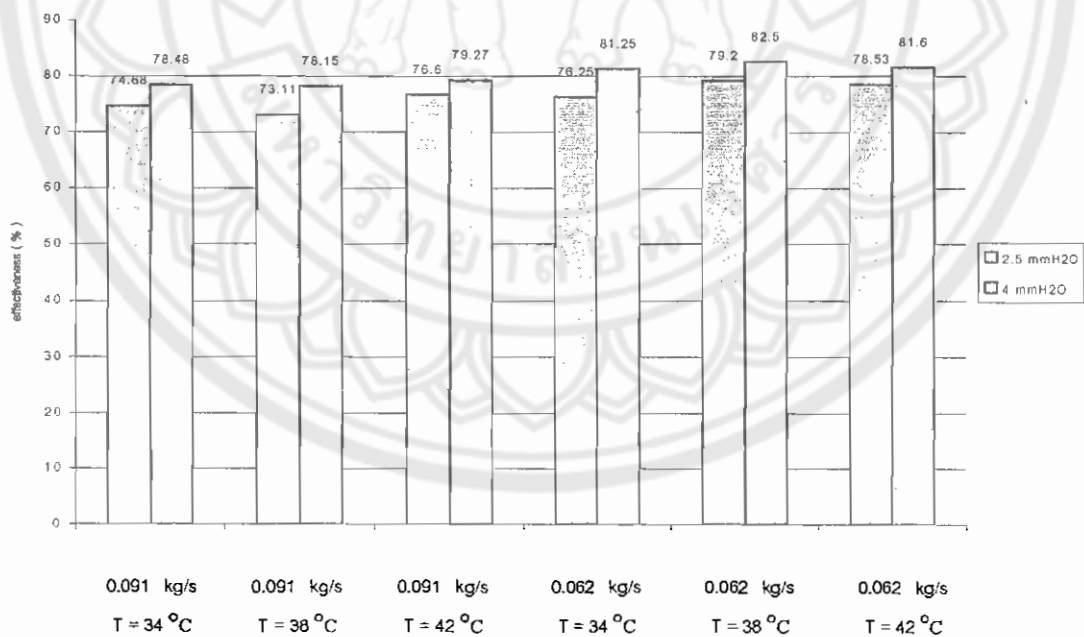
กราฟที่ 1 แสดงค่า  $Q_w$  และ  $Q_a$  กับข้อมูล ที่อัตราการไหลน้ำ 0.091 kg/s



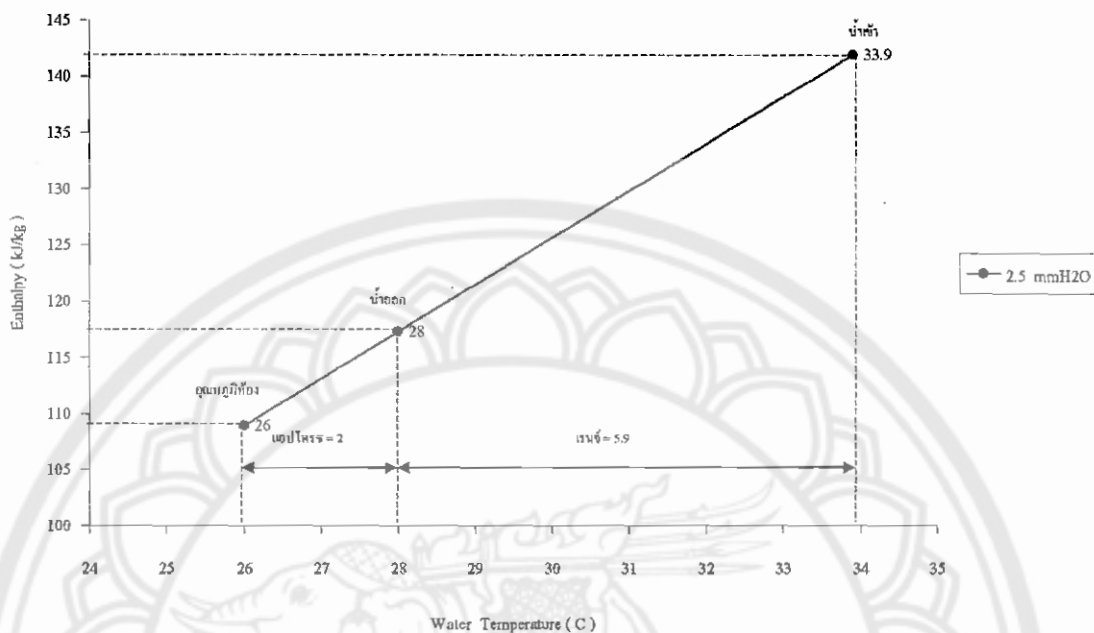
กราฟที่ 2 แสดงค่า  $Q_w$  และ  $Q_a$  กับข้อมูล ที่อัตราการไหลน้ำ 0.062 kg/s



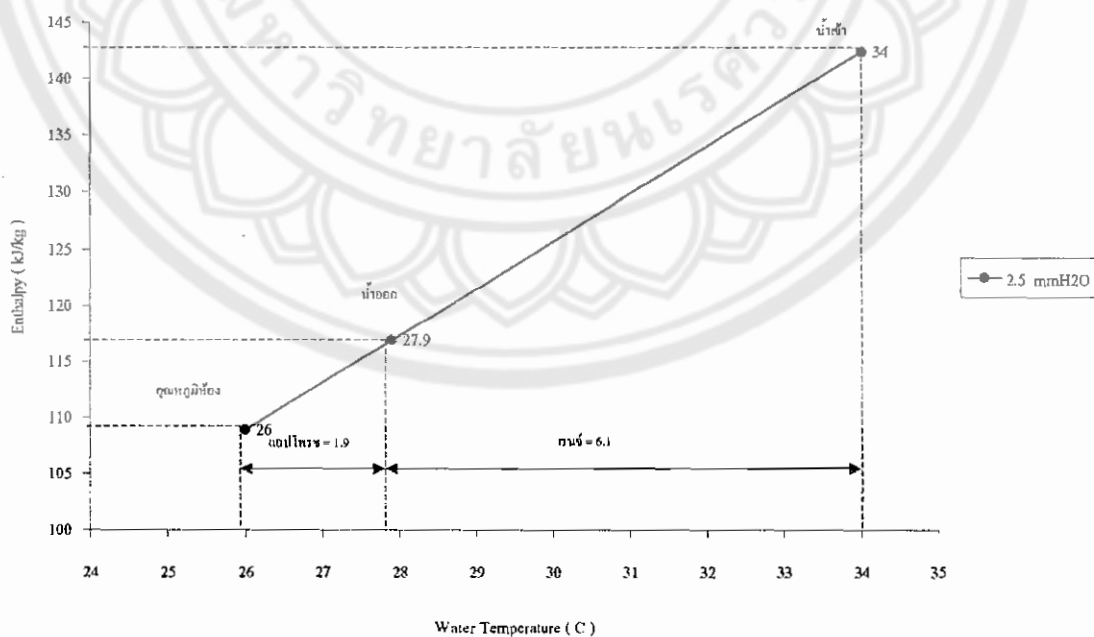
กราฟที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิผล  
ของผลต่างความดัน 2.5 mmH<sub>2</sub>O กับ 4 mmH<sub>2</sub>O



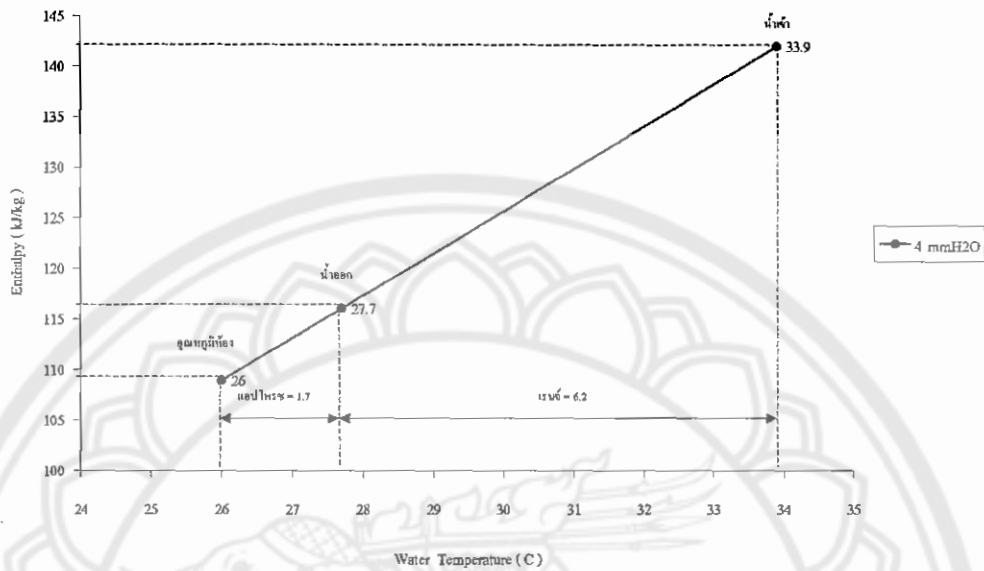
กราฟที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิผล  
ของอัตราการไหลน้ำ 0.091 kg/s กับ อัตราการไหลน้ำ 0.062 kg/s



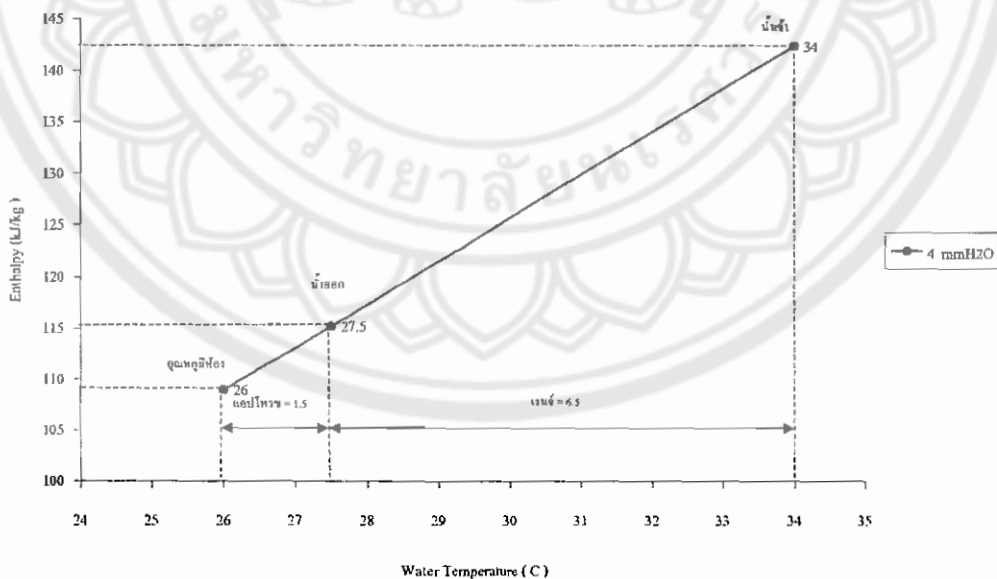
กราฟที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 34 °C) ที่อัตราไหลของน้ำ 0.091 kg/s



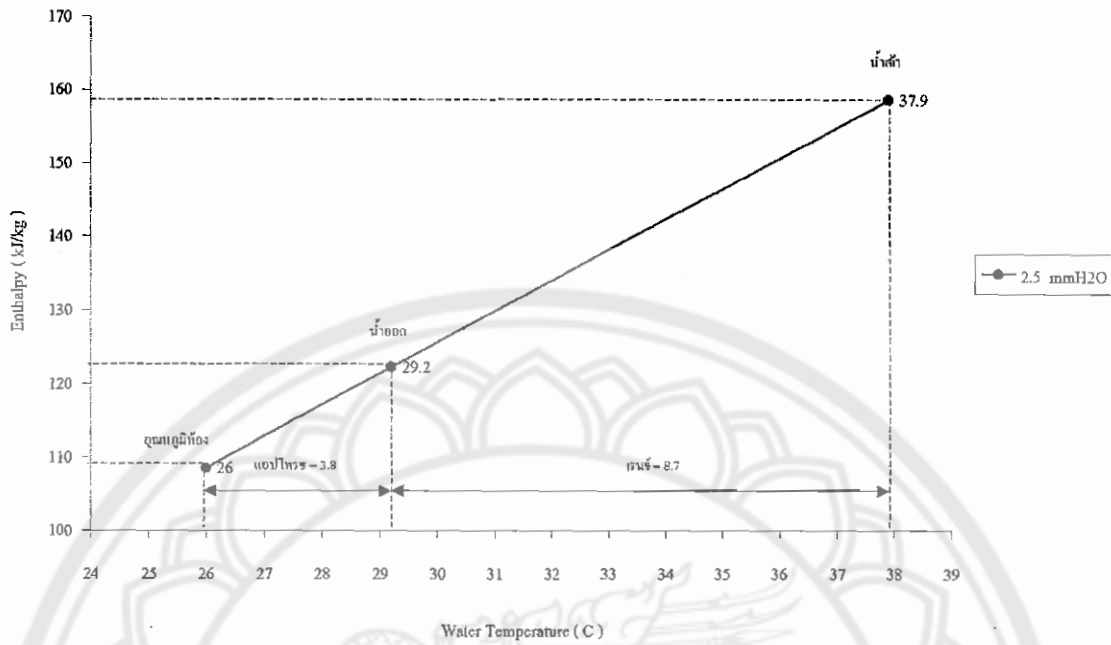
กราฟที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 34 °C) ที่อัตราไหลของน้ำ 0.062 kg/s



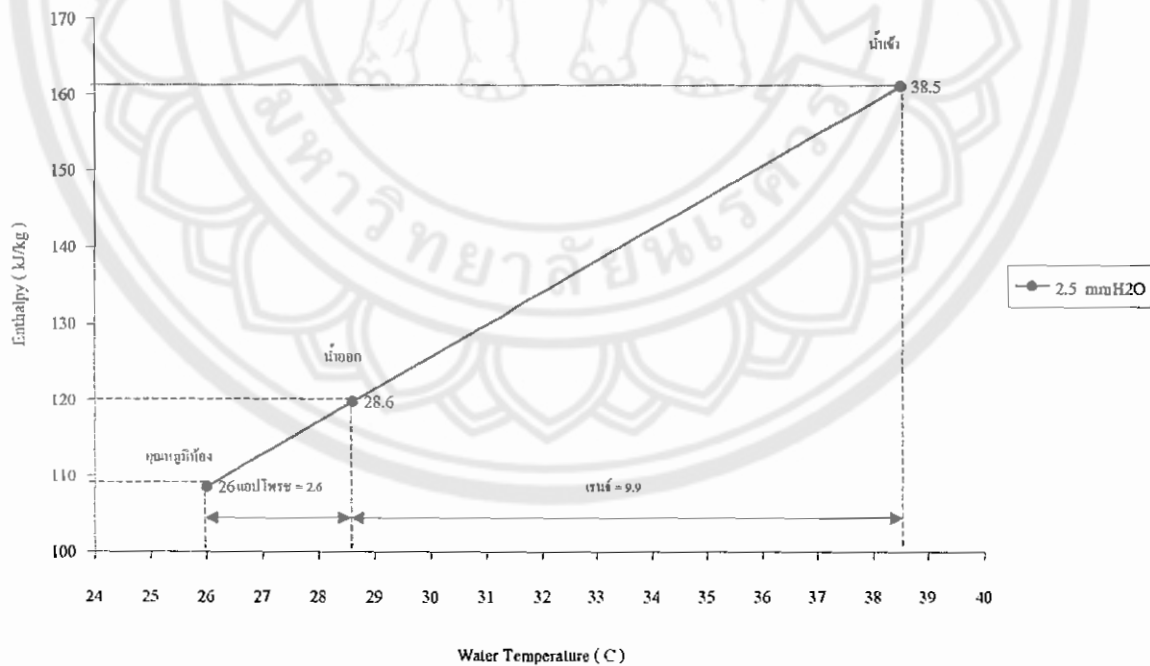
กราฟที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 34 °C) ที่อัตราไหลของน้ำ 0.091 kg/s



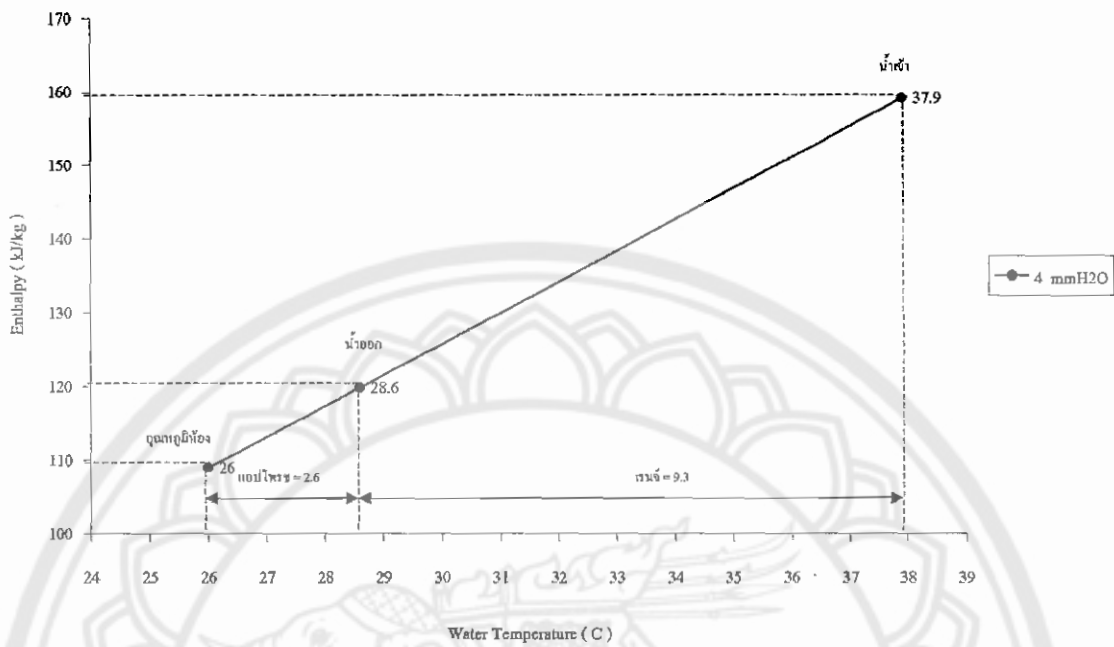
กราฟที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 34 °C) ที่อัตราไหลของน้ำ 0.062 kg/s



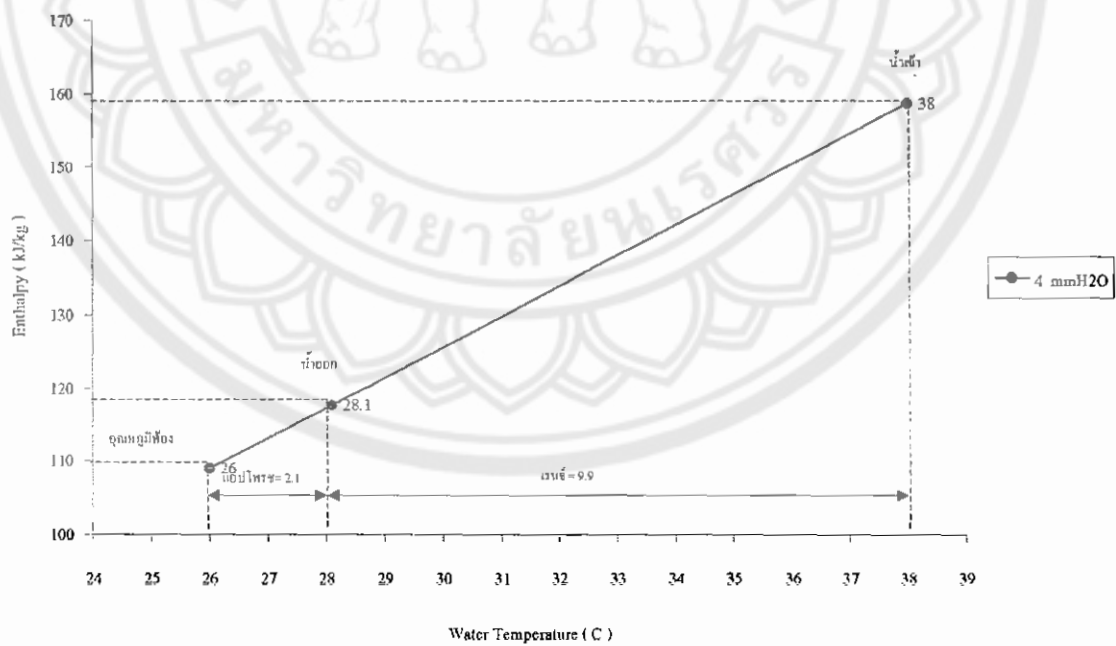
กราฟที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 38 °C)  
ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.091 kg/s



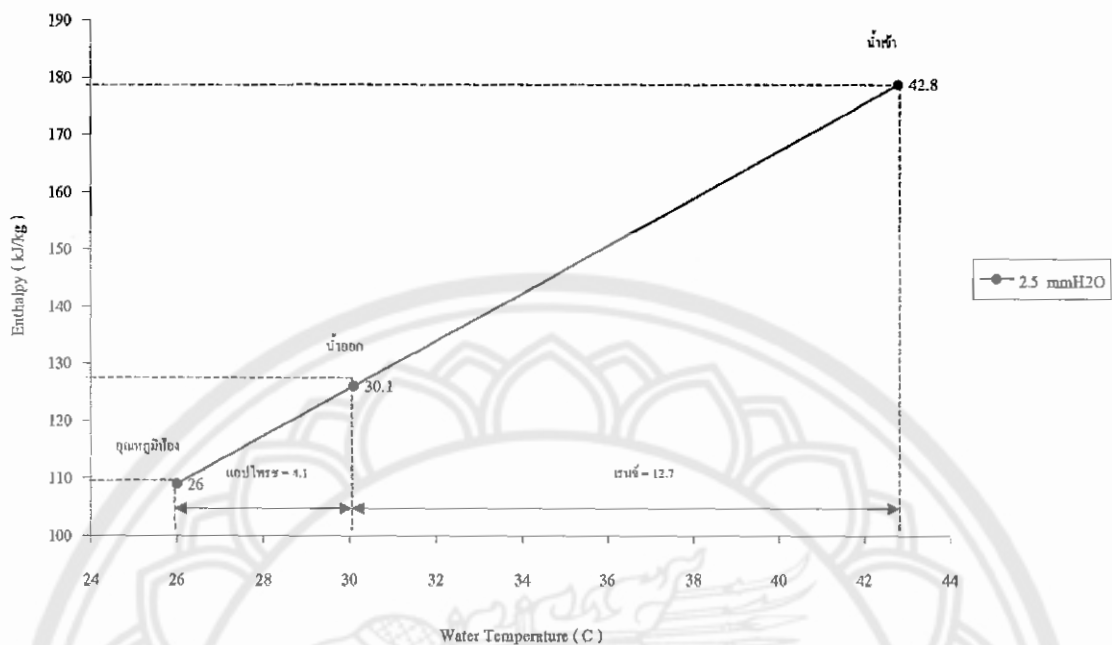
กราฟที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 38 °C)  
ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.062 kg/s



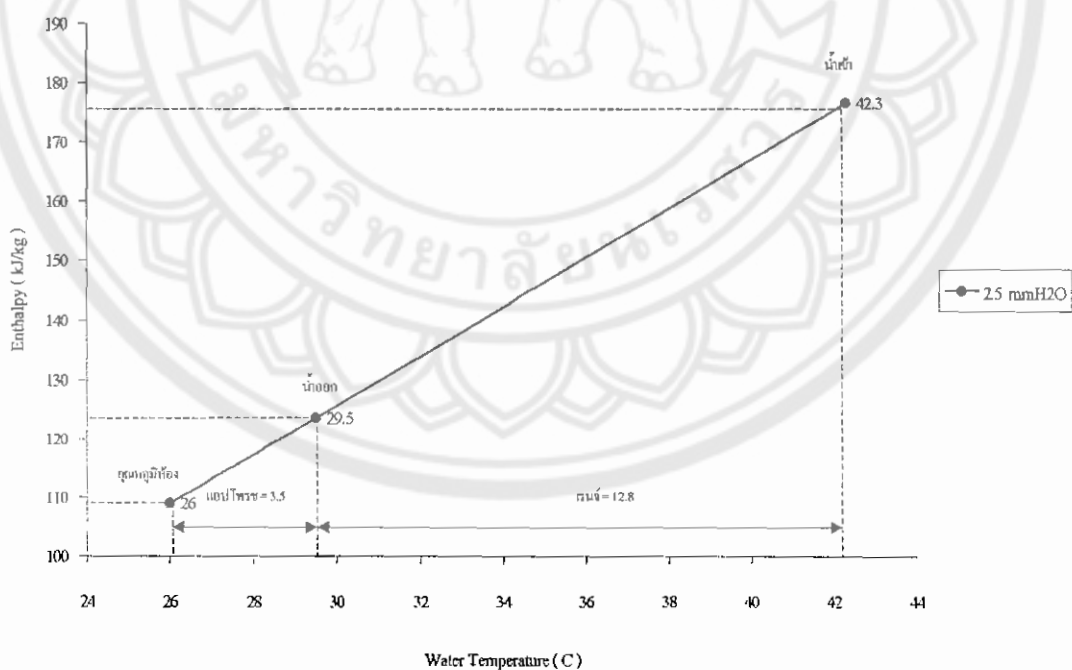
กราฟที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 38 °C)  
ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.091 kg/s



กราฟที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 38 °C)  
ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.062 kg/s

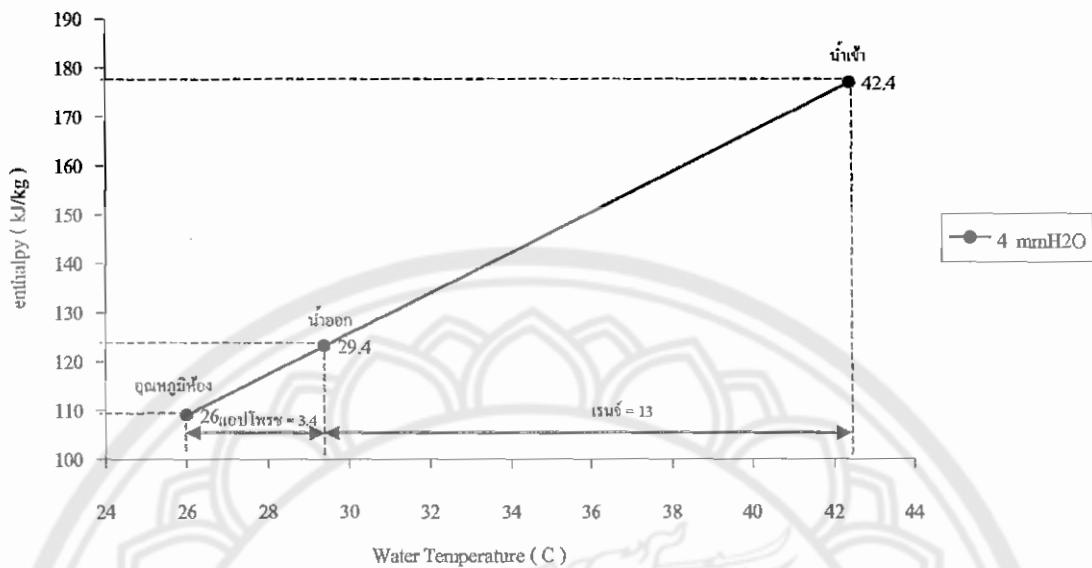


กราฟที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทาลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 42 °C) ที่อัตราไหลของน้ำ 0.091 kg/s

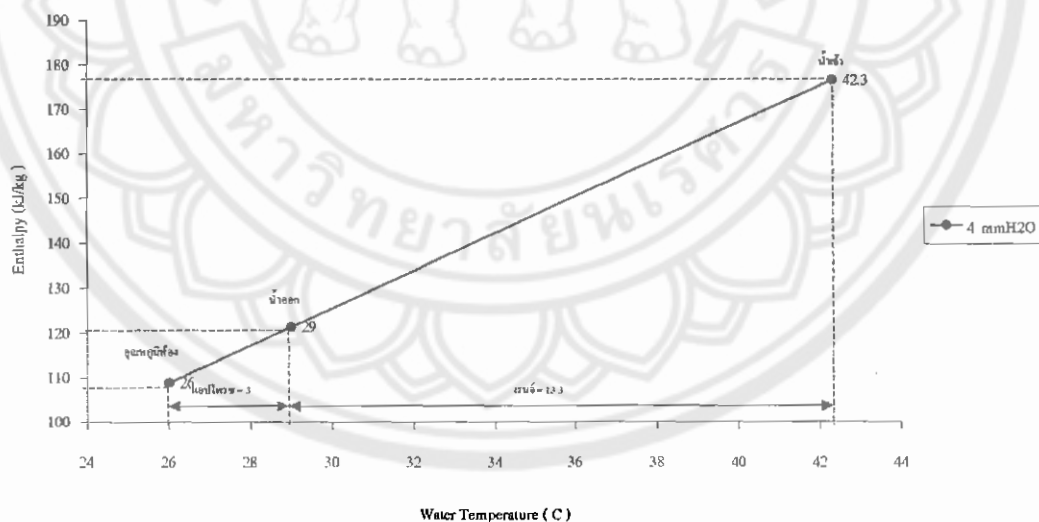


กราฟที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทาลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 42 °C) ที่อัตราไหลของน้ำ 0.062 kg/s





กราฟที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 42 °C) ที่อัตราไหลของน้ำ 0.091 kg/s



กราฟที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเอนทัลปีกับอุณหภูมิน้ำ (น้ำเข้า 42 °C) ที่อัตราไหลของน้ำ 0.062 kg/s

## 11. ตัวอย่างการคำนวณ

### 11.1 การคำนวณอัตราการไหลของน้ำ

จากตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหลของน้ำ ( $Q_w$ ) เท่ากับ

$$1/11.0 \text{ L/s} = 0.091 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ} \quad \dot{m}_w &= \rho Q_w \\ &= 1000 (0.091 \cdot 10^{-3}) \text{ kg/s} \\ &= 0.091 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

### 11.2 การคำนวณอัตราการไหลของอากาศ

การคำนวณค่า discharge coefficient (C)

จากสมการที่ 13

$$V_2 = \frac{1}{[1 - (A_2/A_1)^2]^{1/2}} [2g_c (p_1 - p_2)/\rho]^{1/2}$$

$$\text{เมื่อ } D_1 = 22 \text{ in} = 0.559 \text{ m} \quad \text{จะได้ } A_1 = (\pi/4) D_1^2 = 0.245 \text{ m}^2$$

$$D_2 = 13.2 \text{ in} = 0.335 \text{ m} \quad \text{จะได้ } A_2 = (\pi/4) D_2^2 = 0.088 \text{ m}^2$$

$$P_1 - P_2 = \text{ผลต่างความดันของ Orifice (Pa)}$$

$$= 9.81 h_s$$

$$h_s = \text{ผลต่างความดันจากมานอมิเตอร์ (mmH}_2\text{O)}$$

$$2 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.81 \text{ Pa}$$

$$g_c = \text{Conversion factor}$$

$$= 1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)$$

$$\rho = \text{Density of air (kg/m}^3) = 1/U$$

$$U = \text{Specific volume (m}^3/\text{kg)}$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$V_2 = 4.748 [h_s/\rho]^{1/2}$$

$$\text{หรือ} \quad V_2 = 4.748 [h_s U]^{1/2}$$

จากสมการ  $Re = VD/\nu$

เมื่อ  $Re = \text{Reynold's number}$

$V = \text{ความเร็วของอากาศ (m/s)}$

$D = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)}$

$\nu = \text{Kinematic viscosity of air (m}^2/\text{s)}$

จากสมการที่ 16

$$C_d = \frac{C}{[1-(A_2/A_1)^2]^{1/2}}$$

แทนค่า  $A_1$  และ  $A_2$  จะได้

$$C = 0.933C_d$$

$$\text{และ } D_2/D_1 = 0.335/0.559 = 0.6$$

จากการทดลอง Outlet air อยู่ในช่วง 20–30 CWB

จากตารางที่ 3 และ ตารางที่ 4

$$\text{ที่ 20 CWB, } \rho = 0.8498 \text{ m}^3/\text{kg}, \nu = 14.8134 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{ที่ 27 CWB, } \rho = 0.8811 \text{ m}^3/\text{kg}, \nu = 15.68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{ที่ 30 CWB, } \rho = 0.8961 \text{ m}^3/\text{kg}, \nu = 15.9848 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

อัตราการไหลสูงสุดจากการทดลอง  $h_s = 4 \text{ mmH}_2\text{O}$

$$\text{ที่ 20 CWB, } V_2 = 4.748 [4 \cdot 0.8498]^{1/2} = 8.75 \text{ m/s}$$

$$Re = (8.75 \cdot 0.335) / 14.8134 \cdot 10^{-6} = 197,878.27$$

จากรูปที่ 10 อ่านค่า  $C_d \cong 0.655$

$$C = 0.933 \cdot 0.655 = 0.611$$

$$\text{ที่ 27 CWB, } V_2 = 4.748 [4 \cdot 0.8811]^{1/2} = 8.91 \text{ m/s}$$

$$Re = (8.91 \cdot 0.335) / 15.68 \cdot 10^{-6} = 190,319.06$$

จากรูปที่ 10 อ่านค่า  $C_d \cong 0.655$

$$C = 0.933 \cdot 0.655 = 0.611$$

$$\text{ที่ 30 CWB, } V_2 = 4.748 [4 \cdot 0.8961]^{1/2} = 9.0 \text{ m/s}$$

$$Re = (9.0 \cdot 0.335) / 15.9848 \cdot 10^{-6} = 188,616.69$$

จากรูปที่ 10 อ่านค่า  $C_d \cong 0.655$

$$C = 0.933 \cdot 0.655 = 0.611$$

ดังนั้นจึงได้ค่า  $C = 0.611$

จากสมการที่ 15

$$Q_{\text{Actual}} = \frac{CA_2 [2g_c (p_1 - p_2)/\rho]^{1/2}}{[1 - (A_2/A_1)^2]^{1/2}}$$

$$Q_{\text{Actual}} = 0.611 * 0.088 * 4.748 [h_s / \rho]^{1/2}$$

$$= 0.287 [h_s / \rho]^{1/2}$$

$$Q_{\text{Actual}} = 0.287 [h_s \nu]^{1/2} \quad (17)$$

จาก  $m_a^\bullet = \rho Q_a$  (18)

เมื่อ  $m_a^\bullet =$  อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)

จากสมการ (17) แทนค่าในสมการ (18) จะได้

$$m_a^\bullet = 0.287 \rho [h_s / \rho]^{1/2}$$

$$= 0.287 [\rho h_s]^{1/2}$$

$$m_a^\bullet = 0.287 [h_s \nu]^{1/2}$$

ดังนั้นเราจะใช้ค่า

$$m_a^\bullet = 0.287 [h_s \nu]^{1/2} \quad (19)$$

จากตารางบันทึกผลการทดลอง ข้อมูลที่ 1 ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 1 ลิตรต่อ 11 วินาที อุณหภูมิอากาศออก 26.7 CWB และผลต่างความดันจาก Manometer  $h_s = 2.5 \text{ mmH}_2\text{O}$  เปิดตารางที่ 3 และประมาณค่า  $\nu$  ได้เท่ากับ  $0.8797 \text{ m}^3/\text{kg}$  แทนค่าในสมการที่ 19

$$m_a^\bullet = 0.287 [h_s \nu]^{1/2}$$

$$= 0.287 [2.5 / 0.8797]^{1/2}$$

$$= 0.4838 \text{ kg/s}$$

### 11.3 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ

จากตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร ต่อ 11 วินาที ข้อมูลที่ 1

$$\dot{m}_w = 0.091 \text{ kg/s}, t_{wi} = 33.9 \text{ }^{\circ}\text{C}, t_{wo} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ และค่า } C_{pw} = 4.19 \text{ kJ/kg-K}$$

แทนค่าในสมการที่ 9

$$\begin{aligned} \dot{Q}_w &= \dot{m}_w C_{pw} (t_{wi} - t_{wo}) \\ &= 0.091 * 4.19 (33.9 - 28) \\ &= 2.244 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 11.4 การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ

จากตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร ต่อ 11 วินาที ข้อมูลที่ 1  
 $\dot{m}_a = 0.4838 \text{ kg/s}$ , อุณหภูมิอากาศเข้า = 26 CWB, อุณหภูมิอากาศออก = 26.7 CWB

จากตารางที่ 3 ที่ 26 CWB จะได้ค่า Enthalpy = 80.777 kJ/kg

ที่ 26.7 CWB จะได้ค่า Enthalpy = 83.917 kJ/kg

แทนค่าในสมการที่ 8

$$\begin{aligned} \dot{Q}_a &= \dot{m}_a (h_{ao} - h_{ai}) \\ &= 0.4838 * (83.917 - 80.777) \\ &= 1.519 \text{ kW} \end{aligned}$$

### 11.5 การคำนวณประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน

จากตารางบันทึกผลการทดลอง ที่อัตราการไหลของน้ำ 1 ลิตร ต่อ 11 วินาที ข้อมูลที่ 1  
 อุณหภูมิอากาศเข้า = 26 CWB, อุณหภูมิอากาศออก = 26.7 CWB,  $t_{wi} = 33.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{wo} = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$

แทนค่าในสมการที่ 10

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= (t_{wi} - t_{wo}) / (t_{wi} - t_{wbi}) \\ &= (33.9 - 28) / (33.9 - 26) \\ &= 0.7486 \\ &= 74.86 \% \end{aligned}$$

## 12. วิเคราะห์ผลการทดลอง

- 12.1 จากตารางผลการทดลอง เปรียบเทียบที่อัตราการไหลของน้ำ 0.091 kg/s และที่ 0.062 kg/s จะเห็นว่าค่าประสิทธิผลการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower ที่อัตราการไหลของน้ำ 0.091 kg/s มีค่าน้อยกว่าที่อัตราการไหล 0.062 kg/s ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ถ้าอัตราการไหลของน้ำมีค่าน้อย สัดส่วนระหว่างมวลอากาศต่อมวลน้ำจะมีค่ามากทำให้ความร้อนจากน้ำถ่ายเทให้กับอากาศได้มากด้วย แต่ถ้าอัตราการไหลของน้ำน้อยมากจนน้ำไม่กระจาย การถ่ายเทความร้อนก็จะไม่ดี ดังนั้นค่าอัตราการไหลของน้ำต้องเป็นค่าที่เหมาะสมซึ่งในที่นี้มีค่าประมาณ 0.062 kg/s
- 12.2 เปรียบเทียบผลต่างความดันจากมานอมิเตอร์ พบว่าที่ผลต่างความดันมีค่าเท่ากับ  $4\text{mmH}_2\text{O}$  จะทำให้ประสิทธิผลการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower มีค่าสูงกว่าผลต่างความดันที่  $2.5\text{mmH}_2\text{O}$  เนื่องจากเมื่อเราปรับให้อัตราการไหลของอากาศเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีอากาศมากพอที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำได้ดี
- 12.3 จากกราฟ ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ มีค่ามากกว่าค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ ซึ่งแสดงว่าค่าความร้อนที่น้ำถ่ายออกมาไม่ได้ถ่ายเทให้กับอากาศทั้งหมด แต่จะมีการถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมรอบข้างด้วยบางส่วน เช่น ถ่ายเทให้กับโครงตัวถังที่เป็นเหล็ก พลาสติก เป็นต้น
- 12.4 จากผลการทดลองเปรียบเทียบที่อุณหภูมิน้ำเข้าสูงคือ  $42^\circ\text{C}$  กับอุณหภูมิน้ำเข้าที่  $38^\circ\text{C}$  และอุณหภูมิอากาศเข้ากระเปาะเปียกคงที่เท่ากับ  $26^\circ\text{C}$  จะเห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำของ  $t_{wi}$  ที่  $42^\circ\text{C}$  จะสูงกว่า  $t_{wi}$  ที่  $38^\circ\text{C}$  เพราะผลต่างของ  $t_{wi}$  และ  $t_{wbi}$  มีค่าสูงกว่า
- 12.5 เมื่อพิจารณากราฟระหว่างเอนทาลปีกับอุณหภูมิของน้ำ จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิน้ำเข้าและอัตราการไหลของน้ำเดียวกัน แต่อัตราการไหลของอากาศต่างกัน ที่อัตราการไหลของอากาศสูงกว่าจะมีค่า Range สูงกว่า แต่ค่า Approach จะต่ำกว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่ต่ำกว่า ดังนั้นค่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอัตราการไหลอากาศที่สูงกว่าจะมีค่าสูงกว่าที่อัตราการไหลของอากาศที่ต่ำกว่า

$$\text{เนื่องจาก} \quad \epsilon = \text{Range} / (\text{Range} + \text{Approach})$$

แต่เมื่อเทียบที่อัตราการไหลของน้ำต่างกัน ค่าอุณหภูมิน้ำเข้าและอัตราการไหลของอากาศเดียวกัน จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของน้ำต่ำ จะมีค่า Range สูงกว่า แต่ Approach ต่ำกว่าที่อัตราการไหลของน้ำที่สูงกว่า ดังนั้นค่า ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของอัตราการไหลของน้ำที่ต่ำกว่าจะมีค่าสูงกว่าที่อัตราการไหลของน้ำที่สูงกว่า

### 13. สรุปผลการทดลอง

- 13.1 จากการทดลอง ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower จะขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลของน้ำ , อัตราการไหลของอากาศ และผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าของน้ำและอากาศ จากการทดลองทำให้เราสามารถเปรียบเทียบได้ว่า
- อัตราการไหลของน้ำต่ำ จะทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนดีกว่าอัตราการไหลของน้ำสูง เพราะมีเวลาที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศนานกว่า แต่ถ้าอัตราการไหลของน้ำน้อยมากจนน้ำไม่กระจาย การถ่ายเทความร้อนก็จะไม่ดี
  - อัตราการไหลของอากาศสูง จะทำให้มีการแลกเปลี่ยนความร้อนดีกว่าอัตราการไหลของอากาศต่ำ เพราะมีอากาศมากพอที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ แต่ถ้าอัตราการไหลของอากาศมากเกินไปการถ่ายเทความร้อนก็จะไม่ดี เนื่องจากอากาศจะไหลเร็วเกินไปจนไม่มีเวลาที่จะแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำ
  - ผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าของอากาศและอุณหภูมิทางเข้าของน้ำมีค่ามาก การแลกเปลี่ยนความร้อนก็จะดีกว่าผลต่างอุณหภูมิที่มีค่าน้อย
- 13.2 จากตารางผลการทดลอง ค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดคือ 82.5% โดยมีอัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 0.062 kg/s และอัตราการไหลของอากาศ 0.6118 kg/s และอุณหภูมิทางเข้าของน้ำเท่ากับ 38°C ซึ่งอัตราการไหลของน้ำมีค่าต่ำ และอัตราการไหลของอากาศมีค่าสูง แต่อุณหภูมิทางเข้าของน้ำที่ควรจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุดควรจะเป็น 42.3°C เพราะทำให้ผลต่างของอุณหภูมิทางเข้าของน้ำ และอากาศมีค่ามากกว่า ที่อุณหภูมิทางเข้าเท่ากับ 38°C แต่อาจจะเนื่องมาจากการอ่านค่าอุณหภูมิทางออกน้ำผิดพลาด
- 13.3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำ และอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศมีค่าไม่เท่ากัน โดยค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำมีค่ามากกว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำบางส่วนไม่ได้แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ ซึ่งอาจจะสูญเสียไปกับท่อ PVC หรือกับโครงตัวถัง จึงทำให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศมีค่าต่ำ และมวลน้ำที่ใช้ในการคำนวณไม่ใช่มวลที่แท้จริงที่ถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ เพราะมีบางส่วนที่กระเซ็นออกทางด้านบนของ Cooling Tower ซึ่งมวลของน้ำส่วนนี้ไม่ได้แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของอากาศมีค่าต่ำ

#### 14. ข้อเสนอแนะ

- 14.1 ได้มาตรฐานเท่าที่ควร อีกทั้งเป็นแบบสเกล การอ่านค่าต้องให้อยู่ระดับสายตา และสเกลไม่ละเอียดพอทำให้อ่านค่าผิดพลาด ดังนั้นควรมีการใช้ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่เป็นแบบดิจิตอล เช่น Thermocouple
- 14.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของน้ำและอากาศ เป็นแบบสเกลทำให้อ่านค่าได้ไม่ละเอียดพอควรที่จะเปลี่ยนเป็นแบบดิจิตอล เพื่อการอ่านค่าที่แน่นอนขึ้น
- 14.3 เครื่องทำน้ำอุ่น และอุปกรณ์ต่างๆ ใช้กระแสไฟฟ้ามากเกินไป ทำให้เป็นการยากที่จะหาแหล่งจ่ายไฟได้เพียงพอตามที่ต้องการ เพราะใช้ไฟถึง 30 A จำเป็นต้องหาแหล่งจ่ายไฟแหล่งอื่น ดังนั้นจึงควรที่จะลดขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยลง

#### 15. คำถามท้ายการทดลอง

- 15.1 จงอธิบายถึงวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower ว่ามีวิธีใดบ้าง?
- 15.2 Cooling Tower และเครื่องปรับอากาศ ที่มีขนาด 1 ตันความเย็น จะมีค่าความร้อนที่ถ่ายเทได้กั้บที่ชุดต่อชั่วโมง มีค่าแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร จงอธิบาย ?



## ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1 Physical properties of water in SI units

( ที่มา : Fluid Mechanics , Vector L.Streeter , E.Benjamin Wylie , 1983 , McGraw -Hill )

| Temp. | Unit gavity    | Density         | Viscosity                | Kinematic             | Surface | Vapor    | Bulk          |
|-------|----------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|---------|----------|---------------|
|       | force          | $\rho,$         | $10^3\mu$                | Viscosity             | Tention | Pressure | modulus       |
| C     | $\gamma,$      | $\text{kg/m}^3$ | $\text{Pa}\cdot\text{s}$ | $10^6\nu$             | 100°C   | Pv,      | of elasticity |
|       | $\text{N/m}^3$ |                 |                          | $\text{m}^2/\text{s}$ | N/m     | kPa      | K, Gpa        |
| 0     | 9805           | 999.9           | 1.792                    | 1.792                 | 7.62    | 0.6      | 2.04          |
| 5     | 9806           | 1000            | 1.519                    | 1.519                 | 7.54    | 0.9      | 2.06          |
| 10    | 9803           | 999.7           | 1.308                    | 1.308                 | 7.48    | 1.2      | 2.11          |
| 15    | 9798           | 999.1           | 1.140                    | 1.141                 | 7.41    | 1.7      | 2.14          |
| 20    | 9789           | 998.2           | 1.105                    | 1.007                 | 7.36    | 2.5      | 2.2           |
| 25    | 9779           | 997.1           | 0.894                    | 0.897                 | 7.26    | 3.2      | 2.22          |
| 30    | 9767           | 995.7           | 0.801                    | 0.804                 | 7.18    | 4.3      | 2.23          |
| 35    | 9752           | 994.1           | 0.723                    | 0.727                 | 7.10    | 5.7      | 2.24          |
| 40    | 9737           | 992.2           | 0.656                    | 0.661                 | 7.01    | 7.5      | 2.27          |
| 45    | 9720           | 990.2           | 0.599                    | 0.605                 | 6.92    | 9.6      | 2.29          |
| 50    | 9697           | 988.1           | 0.549                    | 0.556                 | 6.82    | 12.4     | 2.30          |
| 55    | 9679           | 985.7           | 0.506                    | 0.513                 | 6.74    | 15.8     | 2.31          |
| 60    | 9658           | 983.2           | 0.469                    | 0.477                 | 6.68    | 19.9     | 2.28          |
| 65    | 9635           | 980.6           | 0.436                    | 0.444                 | 6.58    | 25.1     | 2.26          |
| 70    | 9600           | 977.8           | 0.406                    | 0.415                 | 6.50    | 31.4     | 2.25          |
| 75    | 9589           | 974.9           | 0.380                    | 0.39                  | 6.40    | 38.8     | 2.23          |
| 80    | 9557           | 971.8           | 0.357                    | 0.367                 | 6.30    | 47.7     | 2.21          |
| 85    | 9529           | 968.6           | 0.336                    | 0.347                 | 6.20    | 58.1     | 2.17          |
| 90    | 9499           | 965.3           | 0.317                    | 0.328                 | 6.12    | 70.4     | 2.16          |
| 95    | 9469           | 961.9           | 0.299                    | 0.311                 | 6.02    | 84.5     | 2.11          |
| 100   | 9438           | 958.4           | 0.284                    | 0.296                 | 5.94    | 101.3    | 2.07          |

## ภาคผนวก ก

## ตารางที่ 2 Water : properties of liquid and saturated vapor

( ที่มา : Refrigeration and Air Conditioning , Wilbert F. Stoecker , Jerold W. Jones ,1982 ,McGraw –Hill )

| Temp.<br>C | Saturation      | Specific volume    |       | Enthalpy |        | Entropy |        |
|------------|-----------------|--------------------|-------|----------|--------|---------|--------|
|            | pressure<br>kPa | m <sup>3</sup> /kg |       | kJ/kg    |        | kJ/kg-K |        |
|            |                 | Liquid             | Vapor | Liquid   | Vapor  | Liquid  | Vapor  |
| 0          | 0.6108          | 0.0010002          | 206.3 | -0.04    | 2501.6 | -0.0002 | 9.1577 |
| 2          | 0.7055          | 0.0010001          | 179.9 | 8.39     | 2505.2 | 0.0306  | 9.1047 |
| 4          | 0.8129          | 0.0010000          | 157.3 | 16.80    | 2508.9 | 0.0611  | 9.0526 |
| 6          | 0.9345          | 0.0010000          | 137.8 | 25.21    | 2512.6 | 0.0913  | 9.0015 |
| 8          | 1.0720          | 0.0010001          | 121.0 | 33.60    | 2516.2 | 0.1213  | 8.9513 |
| 10         | 1.2270          | 0.0010003          | 106.4 | 41.99    | 2519.9 | 0.1510  | 8.902  |
| 12         | 1.4014          | 0.0010004          | 93.84 | 50.38    | 2523.6 | 0.1805  | 8.8536 |
| 14         | 1.5973          | 0.0010007          | 82.90 | 58.75    | 2527.2 | 0.2098  | 8.806  |
| 16         | 1.8168          | 0.0010010          | 73.38 | 67.13    | 2530.9 | 0.2388  | 8.7593 |
| 18         | 2.0620          | 0.0010013          | 65.09 | 75.50    | 2534.5 | 0.2677  | 8.7135 |
| 20         | 2.3370          | 0.0010017          | 57.84 | 83.86    | 2538.2 | 0.2963  | 8.6684 |
| 22         | 2.6420          | 0.0010022          | 51.49 | 93.23    | 2541.8 | 0.3247  | 8.6241 |
| 24         | 2.9820          | 0.0010026          | 45.93 | 100.59   | 2545.5 | 0.3530  | 8.5806 |
| 26         | 3.3600          | 0.0010032          | 41.03 | 108.95   | 2549.1 | 0.3810  | 8.5379 |
| 28         | 3.7780          | 0.0010037          | 36.73 | 117.31   | 2552.7 | 0.4088  | 8.4959 |
| 30         | 4.2410          | 0.0010043          | 32.93 | 125.66   | 2556.4 | 0.4365  | 8.4546 |
| 32         | 4.7530          | 0.0010049          | 29.57 | 134.02   | 2560.0 | 0.4640  | 8.414  |
| 34         | 5.3180          | 0.0010056          | 26.6  | 142.38   | 2563.6 | 0.4913  | 8.374  |
| 36         | 5.9400          | 0.0010063          | 23.97 | 150.74   | 2567.2 | 0.5184  | 8.3348 |
| 38         | 6.6240          | 0.001007           | 21.63 | 159.09   | 2570.8 | 0.5453  | 8.2962 |
| 40         | 7.3750          | 0.0010078          | 19.55 | 167.45   | 2574.4 | 0.5721  | 8.2583 |
| 42         | 8.1980          | 0.0010086          | 17.69 | 175.31   | 2577.9 | 0.5987  | 8.2209 |
| 44         | 9.1000          | 0.0010094          | 16.04 | 184.17   | 2581.5 | 0.6252  | 8.1842 |

ตารางที่ 2 (ต่อ)

| Temp.<br>C | Saturation<br>pressure<br>kPa | Specific volume<br>m <sup>3</sup> /kg |       | Enthalpy<br>kJ/kg |        | Entropy<br>kJ/kg-K |        |
|------------|-------------------------------|---------------------------------------|-------|-------------------|--------|--------------------|--------|
|            |                               | Liquid                                | Vapor | Liquid            | Vapor  | Liquid             | Vapor  |
| 46         | 10.086                        | 0.0010103                             | 14.56 | 192.53            | 2585.1 | 0.6514             | 8.1481 |
| 48         | 11.162                        | 0.0010112                             | 13.23 | 200.89            | 2588.6 | 0.6776             | 8.1125 |
| 50         | 12.335                        | 0.0010121                             | 12.05 | 209.26            | 2592.2 | 0.7033             | 8.0776 |
| 52         | 13.613                        | 0.0010131                             | 10.98 | 217.62            | 2595.7 | 0.7293             | 8.0432 |
| 54         | 15.002                        | 0.001014                              | 10.02 | 225.98            | 2599.2 | 0.755              | 8.0093 |
| 56         | 16.511                        | 0.001015                              | 9.159 | 234.35            | 2602.7 | 0.7804             | 7.9759 |
| 58         | 18.147                        | 0.0010161                             | 8.381 | 242.72            | 2606.2 | 0.8058             | 7.9431 |
| 60         | 19.92                         | 0.0010171                             | 7.679 | 251.09            | 2609.7 | 0.831              | 7.9108 |
| 62         | 21.84                         | 0.0010182                             | 7.044 | 259.46            | 2613.2 | 0.856              | 7.879  |
| 64         | 23.91                         | 0.0010193                             | 6.469 | 267.84            | 2616.6 | 0.8809             | 7.8477 |
| 66         | 26.15                         | 0.0010205                             | 5.948 | 276.21            | 2620.1 | 0.9057             | 7.8168 |
| 68         | 28.56                         | 0.0010217                             | 5.476 | 284.59            | 2623.5 | 0.9303             | 7.7864 |
| 70         | 31.16                         | 0.0010228                             | 5.046 | 292.97            | 2626.9 | 0.9548             | 7.7565 |
| 72         | 33.96                         | 0.0010241                             | 4.646 | 301.35            | 2630.1 | 0.9792             | 7.727  |
| 74         | 36.96                         | 0.0010253                             | 4.300 | 309.74            | 2633.7 | 1.0034             | 7.6979 |
| 76         | 40.19                         | 0.0010266                             | 3.976 | 318.13            | 2637.1 | 1.0275             | 7.6693 |
| 78         | 43.65                         | 0.0010279                             | 3.680 | 326.52            | 2640.4 | 1.0514             | 7.6416 |
| 80         | 47.36                         | 0.0010292                             | 3.409 | 334.92            | 2643.8 | 1.0753             | 7.6132 |
| 82         | 51.33                         | 0.0010305                             | 3.162 | 343.31            | 2647.1 | 1.099              | 7.585  |
| 84         | 55.57                         | 0.0010319                             | 2.935 | 351.71            | 2650.4 | 1.1225             | 7.5588 |
| 86         | 60.11                         | 0.0010333                             | 2.727 | 360.12            | 2653.6 | 1.1460             | 7.5321 |
| 88         | 64.95                         | 0.0010347                             | 2.536 | 368.53            | 2656.9 | 1.1693             | 7.5058 |

ตารางที่ 2 (ต่อ)

| Temp.<br>C | Saturation | Specific volume    |        | Enthalpy |        | Entropy |        |
|------------|------------|--------------------|--------|----------|--------|---------|--------|
|            | pressure   | m <sup>3</sup> /kg |        | kJ/kg    |        | kJ/kg-K |        |
|            | kPa        | Liquid             | Vapor  | Liquid   | Vapor  | Liquid  | Vapor  |
| 90         | 70.11      | 0.0010361          | 2.361  | 376.94   | 2660.1 | 1.1925  | 7.4799 |
| 92         | 75.61      | 0.0010376          | 2.200  | 385.36   | 2663.4 | 1.2156  | 7.4543 |
| 94         | 81.46      | 0.0010391          | 2.052  | 393.78   | 2666.6 | 1.2386  | 7.4291 |
| 96         | 87.69      | 0.0010406          | 1.915  | 402.2    | 2669.7 | 1.2615  | 7.4042 |
| 98         | 94.30      | 0.0010421          | 1.789  | 410.63   | 2672.9 | 1.2842  | 7.3796 |
| 100        | 101.30     | 0.0010437          | 1.673  | 419.06   | 2676.0 | 1.3069  | 7.3554 |
| 102        | 108.78     | 0.0010753          | 1.566  | 427.50   | 2679.1 | 1.3294  | 7.3315 |
| 104        | 116.68     | 0.0010469          | 1.466  | 435.95   | 2682.2 | 1.3518  | 7.3078 |
| 106        | 125.04     | 0.0010485          | 1.374  | 444.4    | 2685.3 | 1.3742  | 7.2845 |
| 108        | 133.90     | 0.0010502          | 1.289  | 452.85   | 2688.3 | 1.3964  | 7.2615 |
| 110        | 143.26     | 0.0010519          | 1.210  | 461.32   | 2691.3 | 1.4185  | 7.2388 |
| 112        | 153.16     | 0.0010536          | 1.137  | 469.78   | 2694.3 | 1.4405  | 7.2164 |
| 114        | 163.62     | 0.0010553          | 1.069  | 478.26   | 2697.2 | 1.4624  | 7.1942 |
| 116        | 174.65     | 0.0010571          | 1.005  | 486.74   | 2700.2 | 1.4842  | 7.1723 |
| 118        | 186.28     | 0.0010588          | 0.9463 | 495.23   | 2703.1 | 1.506   | 7.1507 |
| 120        | 198.54     | 0.0010606          | 0.8915 | 503.72   | 2706.0 | 1.5276  | 7.1293 |

## ภาคผนวก ง

**ตารางที่ 3** Moist air : Thermodynamic properties of saturated air at atmospheric pressure of 101.325 kPa  
( ที่มา : Refrigeration and Air Conditioning , Wilbert F. Stoecker , Jerold W. Jones , 1982 , McGraw -Hill )

| Temperature | Vapor pressure | Humidity ratio | Specific volume    | Enthalpy |
|-------------|----------------|----------------|--------------------|----------|
| C           | kPa            | kg/kg          | m <sup>3</sup> /kg | kJ/kg    |
| 0           | 0.6107         | 0.00379        | 0.7781             | 9.470    |
| 1           | 0.6566         | 0.00407        | 0.7813             | 11.200   |
| 2           | 0.7055         | 0.00438        | 0.7845             | 12.978   |
| 3           | 0.7575         | 0.00471        | 0.7878             | 14.807   |
| 4           | 0.8130         | 0.00505        | 0.7911             | 16.692   |
| 5           | 0.8719         | 0.00542        | 0.7944             | 18.634   |
| 6           | 0.9347         | 0.00582        | 0.7978             | 20.639   |
| 7           | 1.0013         | 0.00624        | 0.8012             | 22.708   |
| 8           | 1.0722         | 0.00668        | 0.8046             | 24.848   |
| 9           | 1.1474         | 0.00716        | 0.8081             | 27.059   |
| 10          | 1.2272         | 0.00766        | 0.8116             | 29.348   |
| 11          | 1.3119         | 0.0082         | 0.8152             | 31.716   |
| 12          | 1.4017         | 0.00876        | 0.8188             | 34.172   |
| 13          | 1.4969         | 0.00937        | 0.8225             | 36.719   |
| 14          | 1.5977         | 0.01001        | 0.8262             | 39.362   |
| 15          | 1.7044         | 0.01069        | 0.8300             | 42.105   |
| 16          | 1.8173         | 0.01141        | 0.8380             | 44.955   |
| 17          | 1.9367         | 0.01218        | 0.8377             | 47.918   |
| 18          | 2.0631         | 0.01299        | 0.8417             | 50.998   |
| 19          | 2.1964         | 0.01384        | 0.8457             | 54.205   |
| 20          | 2.3373         | 0.01475        | 0.8498             | 57.544   |
| 21          | 2.4861         | 0.01572        | 0.854              | 61.021   |
| 22          | 2.6431         | 0.01674        | 0.8583             | 64.646   |
| 23          | 2.8086         | 0.01781        | 0.8626             | 68.425   |
| 24          | 2.9832         | 0.01896        | 0.8671             | 72.366   |
| 25          | 3.1671         | 0.02016        | 0.8716             | 76.481   |

ตารางที่ 3 (ต่อ)

| Temperature | Vapor pressure | Humidity ratio | Specific volume    | Enthalpy |
|-------------|----------------|----------------|--------------------|----------|
| C           | kPa            | kg/kg          | m <sup>3</sup> /kg | kJ/kg    |
| 26          | 3.3609         | 0.02144        | 0.8763             | 80.777   |
| 27          | 3.5649         | 0.02279        | 0.8811             | 85.263   |
| 28          | 3.7797         | 0.02422        | 0.886              | 89.952   |
| 29          | 4.0055         | 0.02572        | 0.891              | 94.851   |
| 30          | 4.2431         | 0.02732        | 0.8961             | 99.977   |
| 31          | 4.4928         | 0.0290         | 0.9014             | 105.337  |
| 32          | 4.7552         | 0.0378         | 0.9068             | 110.946  |
| 33          | 4.0308         | 0.03266        | 0.9124             | 116.819  |
| 34          | 5.3201         | 0.03464        | 0.9182             | 122.968  |
| 35          | 5.6237         | 0.03674        | 0.9241             | 129.411  |
| 36          | 5.9423         | 0.03895        | 0.9202             | 131.611  |
| 37          | 6.2764         | 0.04129        | 0.9365             | 143.239  |
| 38          | 6.6265         | 0.04376        | 0.9430             | 150.660  |
| 39          | 6.9935         | 0.04636        | 0.9497             | 158.445  |
| 40          | 7.3778         | 0.04911        | 0.9567             | 166.615  |
| 41          | 7.7803         | 0.05202        | 0.9639             | 175.192  |
| 42          | 8.2016         | 0.05509        | 0.9713             | 184.200  |
| 43          | 8.6424         | 0.05833        | 0.9790             | 193.662  |
| 44          | 9.1036         | 0.06176        | 0.9871             | 203.610  |
| 45          | 9.5856         | 0.06537        | 0.9954             | 214.067  |
| 46          | 10.0896        | 0.0692         | 1.0040             | 225.068  |
| 47          | 10.6161        | 0.07324        | 1.0130             | 236.643  |
| 48          | 11.1659        | 0.07751        | 1.0224             | 248.828  |
| 49          | 11.7402        | 0.08202        | 1.0322             | 261.667  |
| 50          | 12.3397        | 0.0868         | 1.0424             | 275.198  |

ตารางที่ 3 (ต่อ)

| Temperature | Vapor pressure | Humidity ratio | Specific volume    | Enthalpy |
|-------------|----------------|----------------|--------------------|----------|
| C           | kPa            | kg/kg          | m <sup>3</sup> /kg | kJ/kg    |
| 52          | 13.6176        | 0.09720        | 1.0641             | 304.512  |
| 54          | 15.0072        | 0.10887        | 1.0879             | 337.182  |
| 56          | 16.05163       | 0.12198        | 1.1141             | 373.679  |
| 58          | 18.1531        | 0.13674        | 1.1429             | 414.572  |
| 60          | 19.9263        | 0.15341        | 1.1749             | 460.536  |
| 62          | 21.8447        | 0.17228        | 1.2105             | 512.391  |
| 64          | 23.9184        | 0.19375        | 1.2504             | 571.144  |
| 66          | 26.1565        | 0.21825        | 1.2953             | 638.003  |
| 68          | 28.5701        | 0.24638        | 1.3462             | 714.531  |
| 70          | 31.1693        | 0.27884        | 1.4043             | 802.643  |
| 75          | 38.5562        | 0.38587        | 1.5925             | 1092.01  |
| 80          | 47.3670        | 0.55201        | 1.8792             | 1539.414 |
| 85          | 57.8096        | 0.83634        | 2.3633             | 2302.878 |
| 90          | 70.1140        | 1.41604        | 3.3412             | 3856.547 |

## ภาคผนวก จ

ตารางที่ 4 Physical properties of air at atmospheric pressure of 101.325 kPa

( ที่มา : Heat Transfer A Basic Approach , M. Necati Ozisik , 1985 , McGraw-Hill )

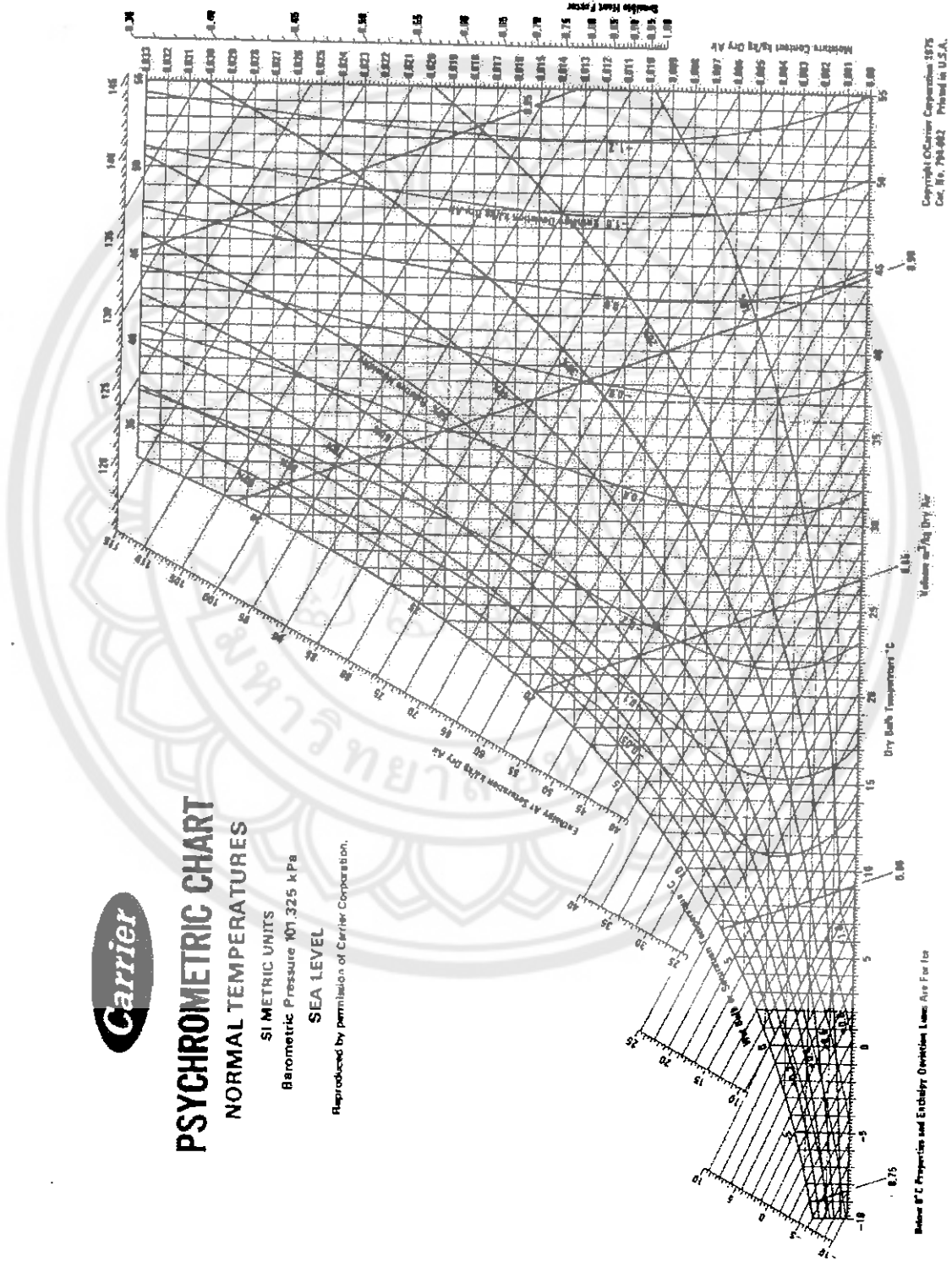
| Temperature | Density                       | Specific heat      | Viscosity          | Kinematic                                   |
|-------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|---|
| K           | $\rho$ ,<br>kg/m <sup>3</sup> | $C_p$ ,<br>kJ/kg-K | $10^5 \mu$<br>Pa*s | Viscosity<br>$10^6 \nu$ , m <sup>2</sup> /s |
| 100         | 3.6010                        | 1.0266             | 0.6924             | 1.923                                       |
| 150         | 2.3675                        | 1.0099             | 1.0283             | 4.343                                       |
| 200         | 1.7684                        | 1.0061             | 1.3289             | 7.49  |
| 250         | 1.1428                        | 1.0053             | 1.4880             | 9.49  |
| 300         | 1.1774                        | 1.0057             | 1.9830             | 15.68                                       |
| 350         | 0.9980                        | 1.0090             | 2.0750             | 20.76                                       |
| 400         | 0.8826                        | 1.0140             | 2.2860             | 25.90                                       |
| 450         | 0.7833                        | 1.0207             | 2.4840             | 28.86                                       |
| 500         | 0.7048                        | 1.0295             | 2.6710             | 37.90                                       |
| 550         | 0.6423                        | 1.0392             | 2.8480             | 44.34                                       |
| 600         | 0.5879                        | 1.0551             | 3.0180             | 51.34                                       |
| 650         | 0.5430                        | 1.0635             | 3.1770             | 58.51                                       |
| 700         | 0.5030                        | 1.0752             | 3.3320             | 66.25                                       |
| 750         | 0.4709                        | 1.0856             | 3.4810             | 73.91                                       |
| 800         | 0.4405                        | 1.0978             | 3.6250             | 82.29                                       |
| 850         | 0.4149                        | 1.1095             | 3.7650             | 90.75                                       |
| 900         | 0.3925                        | 1.1212             | 3.8990             | 99.30                                       |
| 950         | 0.3716                        | 1.1321             | 4.0230             | 108.20                                      |
| 1000        | 0.3524                        | 1.1417             | 4.1520             | 117.80                                      |



ภาคผนวก ฉ

Psychrometric chart

( ที่มา : Roy J. Dossat, Principles of Refrigeration, 4<sup>th</sup> ed. Prentice-Hall Inc, 1997.)



ภาคผนวก ข

แผนภูมิตัวประกอบสเต็ป (STEPHENS W.L.)

(ที่มา: เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหกรรม ฉบับที่ 141 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)

