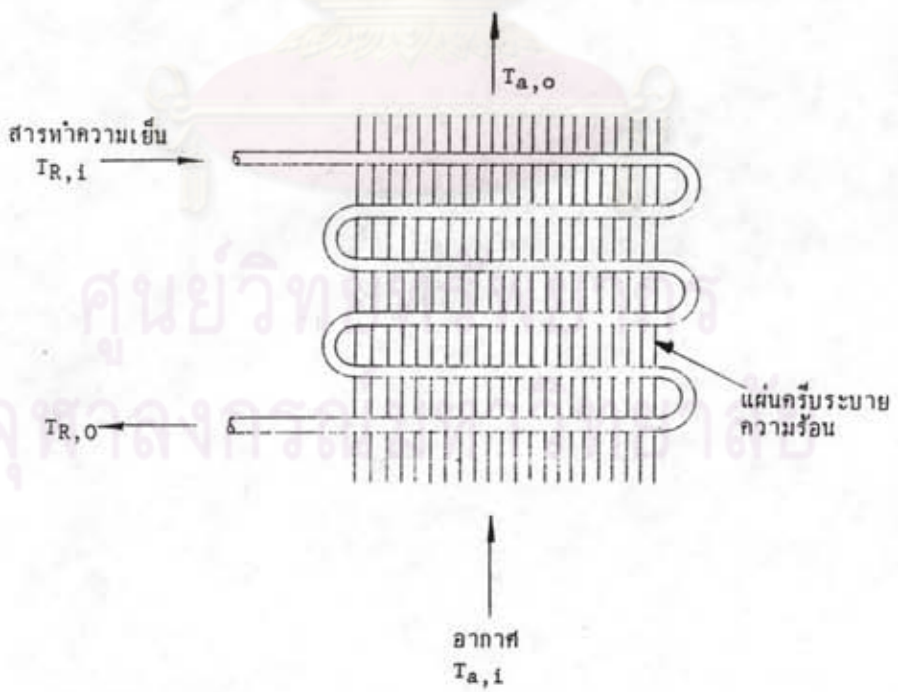
บทที่ 2

ทฤษฎี

เครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน มีส่วนสำคัญใหญ่ ๆ อยู่ 2 ส่วนที่ 1 เรียกว่า ชุดคอยล์เย็น จะติดตั้งอยู่ภายในห้องปรับอากาศประกอบด้วย คอยล์เย็น มอเตอร์พัดลม ใบพัด ถาดรองน้ำหยด แผ่นกรองอากาศ วาล์วลดความดันฯลฯ ส่วนที่ 2 เรียกว่า ชุดคอนเดนซิ่งยูนิต จะติดตั้งอยู่ภายนอกห้องปรับอากาศ ประกอบด้วย คอนเดนเซอร์ ใบพัด มอเตอร์พัดลม คอมเพรสเซอร์ อุปกรณ์ทางไฟฟ้าฯลฯ

ในการศึกษาและวิจัยจะสนใจคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งจะใช้อากาศเป็นตัวกลางในการระบายความร้อนออกจากสารทำความเย็น เพื่อหาผลดีและผลเสียของเครื่องปรับอากาศแบบแยกส่วน

หลักการการแลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องควบแน่นระบายความร้อนด้วยอากาศ แบบท่อขดวิ่งผ่านโลหะระบายความร้อน



รูปที่ 1 เครื่องควบแน่นระบายความร้อนด้วยอากาศ

แบบ Counter cross-flow

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 1 มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสารทำความเย็นกับอากาศจะได้สมการพื้นฐานการส่งผ่านความร้อน ดังนี้

$$q = U_o A_o \Delta T_m \qquad \text{----------(2.1)}$$

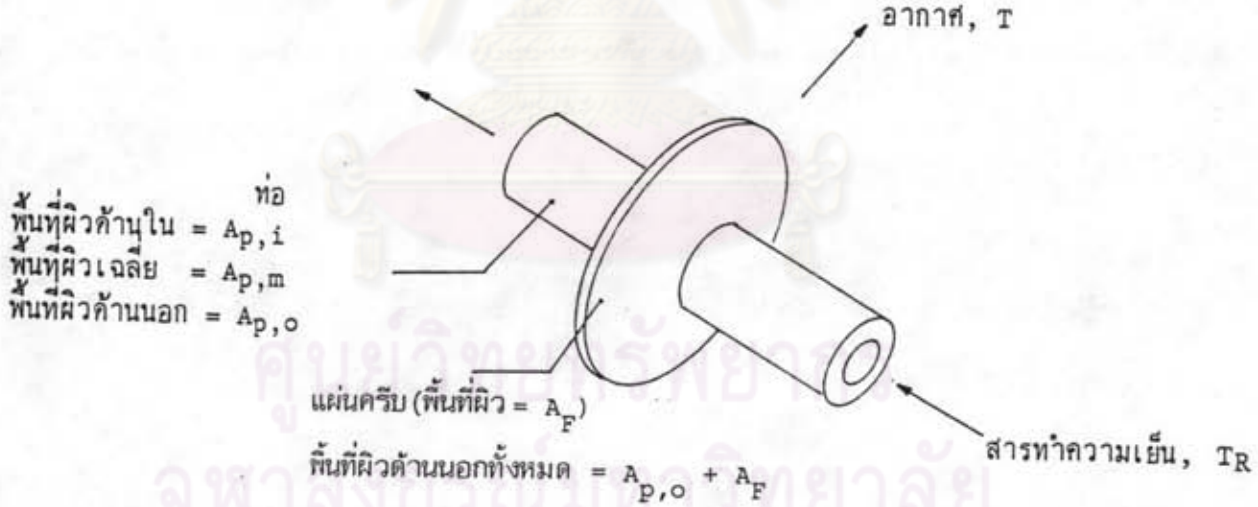
เมื่อ q = อัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น, W

U_o = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น, $W/(m^2.^\circ C)$

A_o = พื้นที่ผิวภายนอกทั้งหมด, m^2

ΔT_m = ผลต่างอุณหภูมิแบบล็อก

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (Overall Heat Transfer Coefficient)



รูปที่ 2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นครีบ

$$\frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{A_{p,i} h_i} + \frac{1}{A_{p,m} k_p} + \frac{1}{h_{c,o}(A_{p,o} + \eta_F A_F)} \qquad \text{----------(2.2)}$$

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ $A_{p,i}$ = พื้นที่ผิวด้านในท่อ, m^2

$A_{p,m}$ = พื้นที่ผิวเฉลี่ยของท่อ, m^2

$A_{p,o}$ = พื้นที่ผิวด้านนอกท่อ, m^2

A_F = พื้นที่ผิวของแผ่นครีบ, m^2

$h_{c,i}$ = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของสารทำความเย็นในท่อ, $W/(m^2.^\circ C)$

$h_{c,o}$ = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ, $W/(m^2.^\circ C)$

k_p = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน, $W/(m^2.^\circ C)$

η_F = ประสิทธิภาพของแผ่นครีบ (K.A. Gardner,1945)

2. ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก(Log mean Temperature difference method)

เนื่องจาก ผลต่างของอุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ร้อนกับอากาศที่เย็น ในเครื่องควบแน่นไม่คงที่ดังนั้นจึงต้องหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก

$$\Delta T_{m,cf} = \frac{(T_{R,o}-T_{a,i}) - (T_{R,i}-T_{a,o})}{\ln\{(T_{R,o}-T_{a,i}) - (T_{R,i}-T_{a,o})} \quad \text{----------(2.3)}$$

$$\Delta T_m = F(\Delta T_{m,cf})$$

เมื่อ ΔT_m = ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย

$\Delta T_{m,cf}$ = ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก

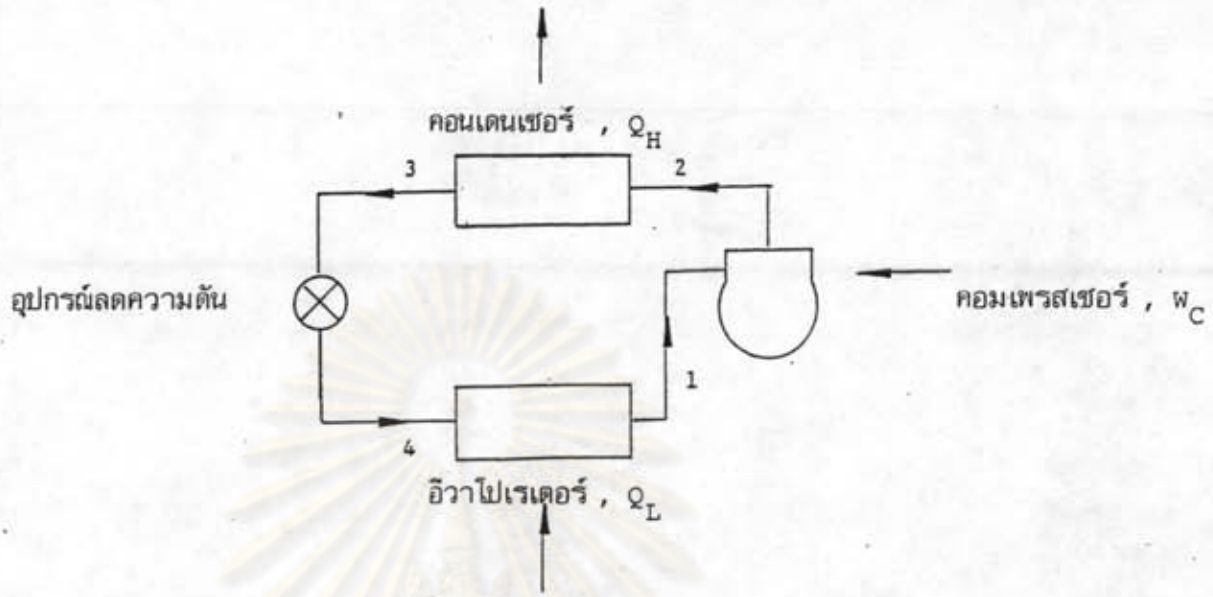
F = correction factor (R.A. Bowman, A.C.Mueller, and W.M. Nagle,1940)

ประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ (Coefficient of Performance)

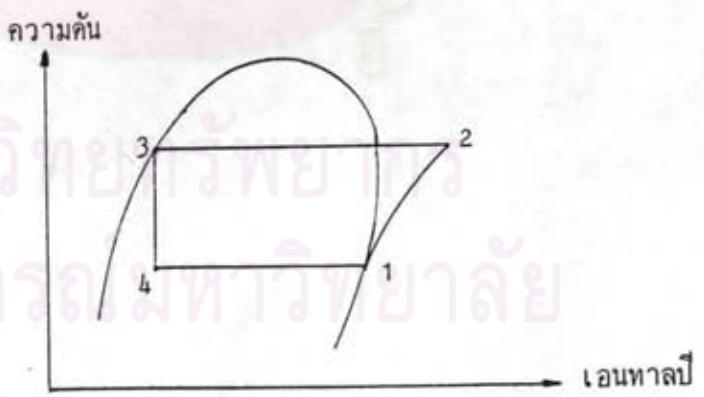
ในการหาค่าประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ คือ ขนาดทำความเย็นต่อกำลังที่ใส่ในเครื่องอัดไอ

$$COP = \frac{Q_L}{W_C} \quad \text{----------(2.4)}$$

$$= \frac{h_1-h_4}{h_2-h_1} \quad \text{----------(2.5)}$$



(a)



(b)

รูปที่ 3 (a) หลักการของระบบปรับอากาศ

(b) แผนภูมิ P-h

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขนาดการทำความเย็น

จากแผนภูมิไซโครเมตริก เราจะใช้เครื่องมือวัดค่าสมรรถนะการทำความเย็นได้ดังสมการ

$$Q_L = \frac{Q_a}{v_a}(h_{ev,i}-h_{ev,o})$$

$$Q_L = m_a C_{p,a}(T_{ev,i}-T_{ev,o}) \quad \text{----------(2.6)}$$

ส่วนการหาค่าขนาดการทำความเย็นในห้องทดสอบ Calorimeter จะหาได้จากมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้า

เมื่อ Q_L = ขนาดการทำความเย็น, kW

Q_a = อัตราการไหลของอากาศ, m^3/s

v_a = ปริมาตรจำเพาะของอากาศผ่านอีวาโปเรเตอร์ทางออก, m^3/kg

$h_{ev,o}$ = เอนทาลปีของอากาศผ่านอีวาโปเรเตอร์ที่ทางออก, kJ/kg

$h_{ev,i}$ = เอนธาลปีของอากาศผ่านอีวาโปเรเตอร์ที่ทางเข้า, kJ/kg

$T_{ev,o}$ = อุณหภูมิของอากาศผ่านอีวาโปเรเตอร์ที่ทางออก, kJ/kg

$T_{ev,i}$ = อุณหภูมิของอากาศผ่านอีวาโปเรเตอร์ที่ทางเข้า, kJ/kg

กำลังงานที่ใส่ในเครื่องอัดไอ

ในส่วนของกำลังงานที่ใช้ในระบบปรับอากาศนั้น จะหาได้จากสมการ

$$W_C = m_a(h_2-h_1) \quad \text{----------(2.7)}$$

จากห้องทดสอบเครื่องปรับอากาศ Colorimeter จะได้จากมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้าของเครื่องอัดไอ

เมื่อ W_C = กำลังงานที่ใส่ในคอมเพรสเซอร์, W

h_1 = เอนทาลปีก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์, kJ/kg

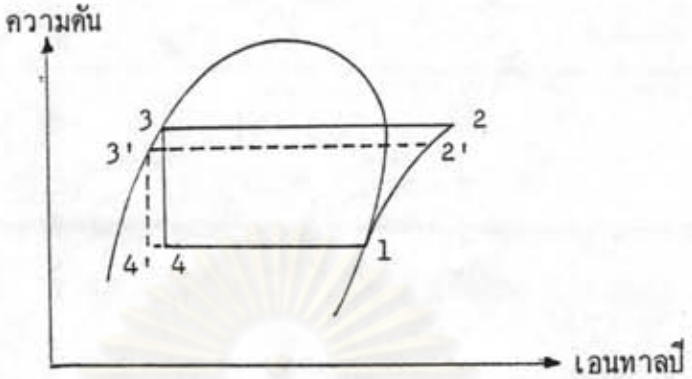
h_2 = เอนทาลปีก่อนเข้าคอมเพรสเซอร์, kJ/kg

การวิเคราะห์คอนเดนเซอร์ระบายความร้อนด้วยอากาศ

ในที่นี้เป็น 2 กรณีด้วยกัน คือ

1. การลดอุณหภูมิของอากาศภายนอกก่อนเข้าสู่คอนเดนเซอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4 การลดอุณหภูมิของอากาศภายนอก หรือการลดอุณภูมิอิ่มตัว ของสารทำความเย็นที่คอนเดนเซอร์

โดยทั่วไปแล้ว การลดอุณหภูมิของอากาศก็เหมือนกับการลดอุณหภูมิอิ่มตัวของสารทำความเย็นที่จะทำให้สารทำความเย็นเหลวที่จะเข้าสู่วาล์วลดความดัน ในขณะมีค่าความร้อนใช้งาน (Enthapy) ต่ำ เป็นเหตุให้ความสามารถในการทำความเย็นมีมากขึ้น และในเวลาเดียวกันกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในคอมเพรสเซอร์ของเครื่องปรับอากาศจะลดลง กล่าวโดยสรุปก็คือ หากทำให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นในคอนเดนเซอร์ลดลงหมายถึง ความดันลดลงด้วย และประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศนั้นจะเพิ่มขึ้น โดยดูได้จากความสามารถในการทำความเย็นที่เพิ่มขึ้นกับ กำลังงานที่ใช้ในคอมเพรสเซอร์ที่ลดลงจาก p-h diagram ตามรูปที่ 4 ถ้าอุณหภูมิของอากาศ ภายนอกห้องสูงหรืออุณหภูมิของสารทำความเย็นเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ออกจากคอนเดนเซอร์น้อยลงตามไปด้วย ดังนั้น จึงได้มีวิธีการลดอุณหภูมิของอากาศภายนอกก่อนเข้าสู่คอนเดนเซอร์อยู่ 2 วิธี คือ วิธีแรกโดยการให้อากาศไหลกลับทางและใช้พัดลมตีน้ำ ส่วนวิธีที่สองจะใช้วัสดุพิเศษที่ทำจากเซลลูโรส

จากสมการที่ 2.1 สมการพื้นฐานการส่งผ่านความร้อนในคอนเดนเซอร์

$$q = U_o A_o \Delta T_m$$

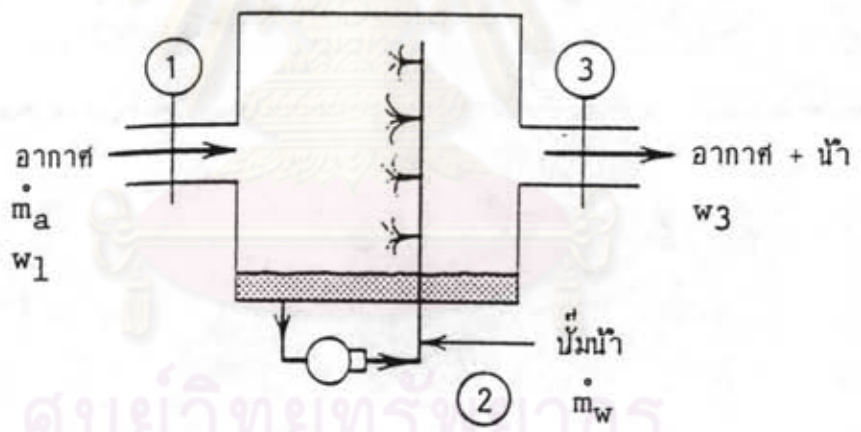
จะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์ (U_o) นั้นมี ค่าคงที่ และพื้นที่ผิวทั้งหมด (A_o) เป็นค่าคงที่ ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านคอนเดนเซอร์นั้นจะขึ้นอยู่กับผลต่างอุณหภูมิแบบล็อก

$$q \propto \Delta T_m$$

จะเห็นได้ว่า อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านคอนเดนเซอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่อผลต่างอุณหภูมิแบบล็อกเพิ่มขึ้น ในกรณีนี้ ผลต่างอุณหภูมิแบบล็อกเพิ่มขึ้นโดยการลดอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าคอนเดนเซอร์ ดังนั้น เมื่อระบายความร้อนได้ดีก็จะทำให้อุณหภูมิที่ควบแน่นลดลง หรืออุณหภูมิของสารทำความเย็นที่ออกจากคอนเดนเซอร์ลดลงด้วย จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศดีขึ้น

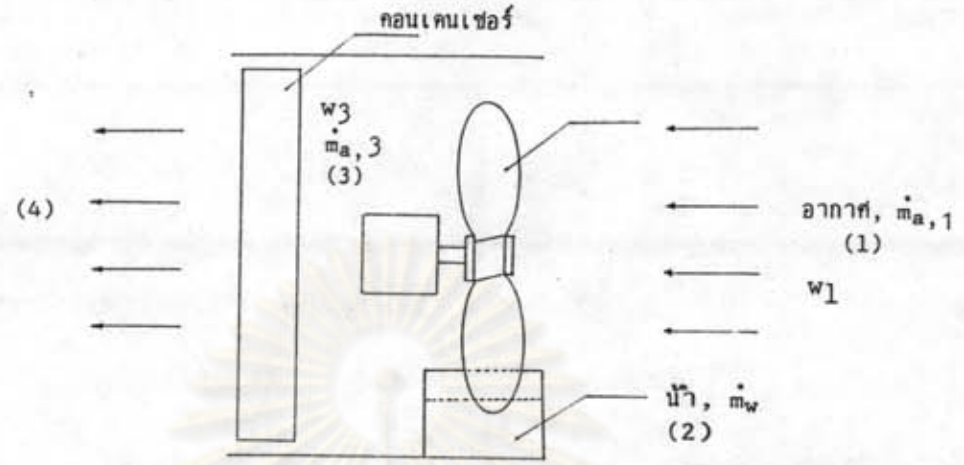
1.1 วิธีการให้อากาศไหลกลับทางและใช้พัดลมตีน้ำ

การวิเคราะห์นี้เป็นกระบวนการทำให้อากาศเย็น โดยการผสมระหว่างอากาศกับน้ำ แล้วเป่าเข้าสู่คอนเดนเซอร์ ซึ่งจะทำให้ความร้อนแฝงของอากาศเพิ่มขึ้นและความร้อนสัมผัสของอากาศลดลง โดยมีหลักการดังนี้



(a)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(b)

รูปที่ 5 กระบวนการทำอากาศเย็นโดยการผสมระหว่างอากาศกับน้ำ

(a) กระบวนการโดยการระเหย

(b) กระบวนการโดยการทดสอบ

จากรูปที่ 5 (a) จะใช้น้ำหมุนเวียน โดยการฉีดฝอยน้ำเข้าไปในอากาศน้ำบางส่วนจะระเหยจะทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดลงและความชื้นสูงขึ้น กระบวนการนี้ถือได้ว่า ไม่มีแหล่งความร้อนจากภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้องในการระเหยของน้ำ จำเป็นต้องใช้ความร้อนในการระเหย ฉะนั้น น้ำจะดูดความร้อนจากอากาศ ทำให้อากาศมีความร้อนสัมผัสลดลง (อุณหภูมิกระเปาะแห้งต่ำลง) แต่ความร้อนแฝงของอากาศเพิ่มขึ้น (จากการระเหยของน้ำ) ในจำนวนที่เท่ากันนั้นคือ การทำให้อากาศเย็น โดยการระเหยที่ไม่มีการเพิ่ม หรือลดความร้อนออกจากอากาศ แสดงได้ว่า กระบวนการทำให้อากาศเย็นโดยการระเหยเป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่

สำหรับการทำให้อากาศก่อนเข้าคอนเดนเซอร์เย็นขึ้น โดยการระเหยในการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5 (b) โดยแทนการฉีดฝอยน้ำด้วยการใช้พัดลมตีน้ำ และให้แหล่งความร้อนจากภายนอกมีส่วนเกี่ยวข้องน้อยที่สุด เพราะฉะนั้นกล่าวได้ว่า กระบวนการนี้เป็นกระบวนการเอนทาลปีคงที่ (อะเดียบาติก)

จากกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวว่า

$$\delta Q + \delta W = \Delta H + \Delta KE + \Delta PE \qquad \text{----------(2.8)}$$

เงื่อนไข

1. กระบวนการนี้เป็นกระบวนการ Adiabatic saturation
2. อัตราการไหลคงที่
3. ไม่มีความร้อน งานที่เกี่ยวข้อง ($\delta Q = \delta W = 0$)
4. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์

($\Delta KE = \Delta PE = 0$)

จากกฎอนุรักษ์มวลของอากาศแห้ง : $\Sigma m_{a,i} = \Sigma m_{a,o}$

$$m_{a,1} = m_{a,3} = m_a \qquad \text{----------(2.9)}$$

จากกฎอนุรักษ์มวลของน้ำ : $\Sigma m_{w,i} = \Sigma m_{w,o}$

$$m_{w,1} + m_{w,2} = m_{w,3}$$

$$m_{a,1}\omega_1 + m_{w,2} = m_{a,3}\omega_3 \qquad \text{----------(2.10)}$$

จากสมการ (2.13) และ (2.14)

$$m_{w,2} = m_a(\omega_3-\omega_1)$$

$$m_a = \frac{m_{w,2}}{(\omega_3-\omega_1)} \qquad \text{----------(2.11)}$$

$$\omega_3-\omega_1 = m_{w,2}/m_a$$

เมื่อกฎอนุรักษ์พลังงาน : $\sum m_i h_i = \sum m_o h_o$ (ค่า $\delta Q=0$ และ $\delta W = 0$)

$$m_a h_{a,1}+m_{w,1}h_{w,1}+m_{w,2}h_{w,2} = m_a h_{a,3}+m_{w,3}h_{w,3}$$

โดย $\omega_1 = m_{w,1}/m_a$ ----------(2.12)

$\omega_3 = m_{w,3}/m_a$ ----------(2.13)

ดังนั้น สมการอนุรักษ์พลังงาน :

$$h_{a,1}+[m_{\omega,1}/m_a]h_{\omega,1}+[m_{\omega,2}/m_a]h_{w,2} = h_{a,3}+[m_{\omega,3}/m_a]h_{w,3}$$

$$h_{a,1}+\omega_1 h_{w,1}+(\omega_3-\omega_1)h_{w,2} = h_{a,3}+m_{w,3}h_{w,3}$$

$$h_{a,3}-h_{a,1} = \omega_1 h_{w,1}+(\omega_3-\omega_1)h_{w,2}-\omega_3 h_{w,3}$$

$$C_{p,a}(T_{a,3}-T_{a,1}) = \omega_1 h_{w,1}+(\omega_3-\omega_1)h_{w,2}-\omega_3 h_{w,3}$$

$$T_{a,3} = \frac{[\omega_1(h_{w,1}-h_{w,2})+\omega_3(h_{w,2}-h_{w,3})]}{C_{p,a}} - T_{a,1}$$

$$T_{a,3} = \frac{[\omega_1(h_{g,1}-h_{f,2})+\omega_3(h_{fg})_3]}{C_{p,a}} + T_{a,1} \qquad \text{----------(2.14)}$$

เมื่อ ω_3 = $(0.622\ P_{g,3})/(P_2-P_{g,3})$

การหาอัตราการใช้น้ำที่ต้องการจากแผนภูมิไซโครเมตริก ดังนี้

$m_w = \rho_{a,i} Q_a(\omega_3-\omega_1)$ ----------(2.15)

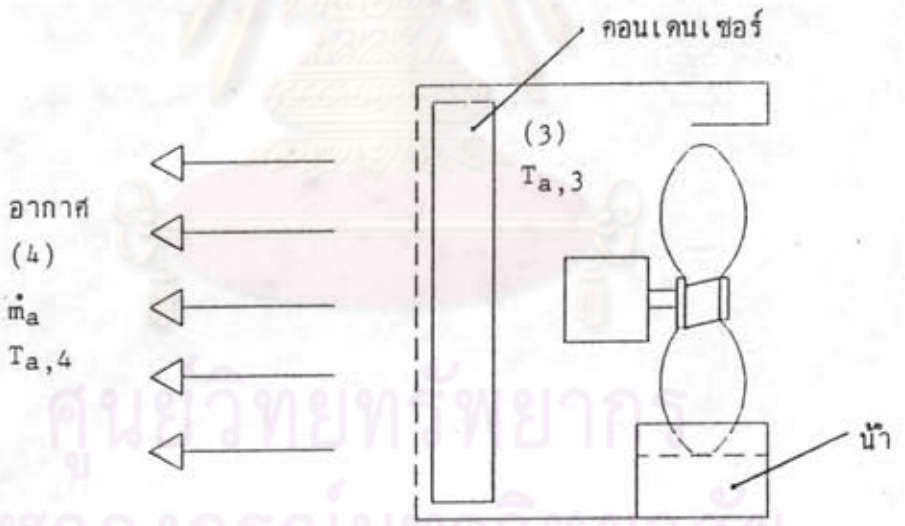
เมื่อ m_w = มวลของน้ำต่อหน่วยเวลา, kg/s

$\rho_{a,i}$ = ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิก่อนเข้าคอนเดนเซอร์, kg/m^3

Q_a = อัตราการไหลของอากาศ, m^3/s

ω_1 = อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่อุณหภูมิทางเข้าคอนเดนเซอร์ก่อนฉีดฝอยน้ำ, (kg H_2O)/(kg dry air)

ω_3 = อัตราส่วนความชื้นของอากาศที่อุณหภูมิทางเข้าคอนเดนเซอร์หลังฉีดฝอยน้ำ, (kg H_2O)/(kg dry air)



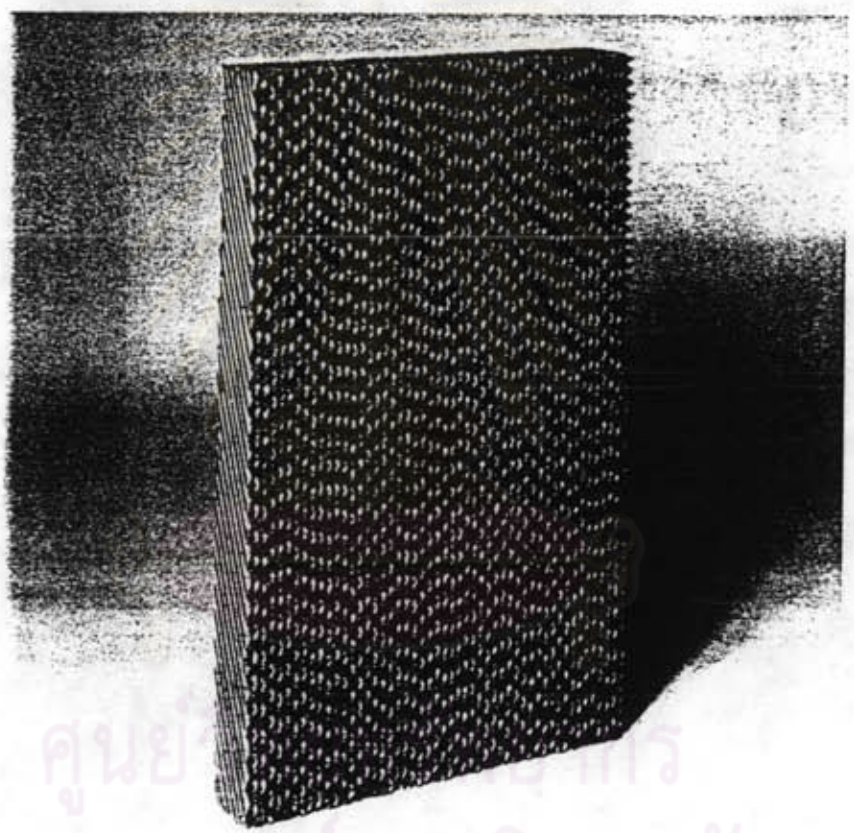
รูปที่ 6 การลดอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าสู่เครื่องควบแน่น โดยให้อากาศไหลกลับทางและใช้พัดลมตีน้ำ

จากสมการ (2.11) และ (2.14) หาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ คือ

$Q_H = m_a C_{p,a}(T_{a,3}-T_{a,4})$ ----------(2.16)

1.2 ใช้วัสดุพิเศษ

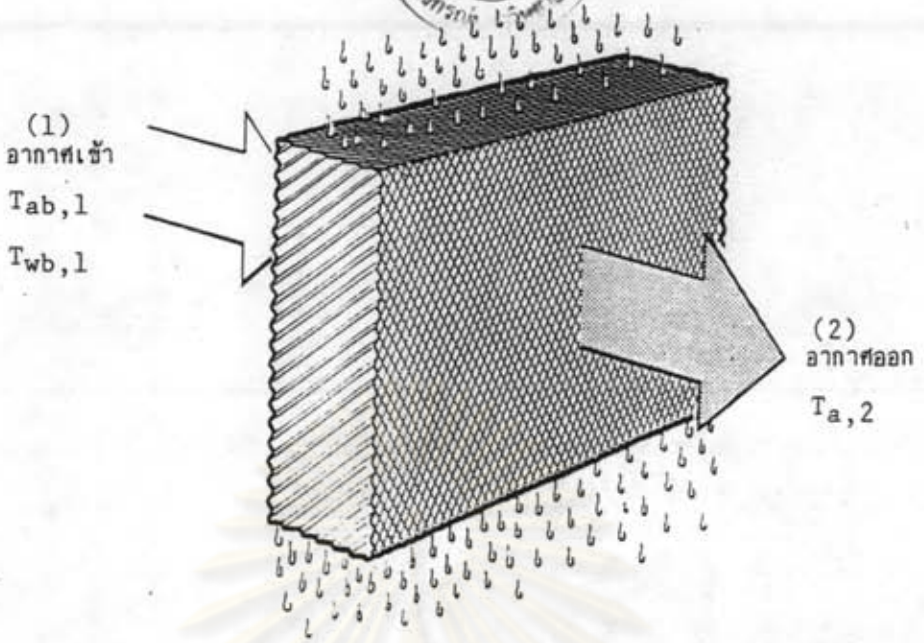
วัสดุพิเศษจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ ซึ่งเป็นแบบ Cross-flow อากาศ จะผ่านวัสดุพิเศษ โดยการใส่น้ำไปยังด้านบนของวัสดุพิเศษ น้ำจะไหลลงผ่านพื้นที่ผิวสัมผัสที่มีมุมต่าง ๆ ของวัสดุพิเศษ เมื่ออากาศไหลผ่านจะสัมผัสกับพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุพิเศษที่มีน้ำไหลผ่านลงมา จะทำให้อากาศที่ผ่านออกจากวัสดุพิเศษมีอุณหภูมิต่ำ และความชื้นสูง



รูปที่ 7 ลักษณะของวัสดุพิเศษที่สัมผัสระหว่างอากาศกับน้ำ

วัสดุพิเศษทำมาจากเซลลูโรสพิเศษ ซึ่งมีลักษณะพิเศษ คือ ชุ่มน้ำ และรักษาประสิทธิภาพความเปียกชื้น

ในการคำนวณหาอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำผ่านวัสดุพิเศษ



รูปที่ 8 การลดอุณหภูมิก่อนเข้าคอนเดนเซอร์ โดยใช้วัสดุพิเศษ

ความเร็วของอากาศ (Air Velocity)

$$V_a = Q_a/A \qquad \text{----------(2.17)}$$

เมื่อ Q_a = อัตราการไหลของอากาศ, m^3/s

A = พื้นที่หน้าตัดที่อากาศไหลผ่าน, m^2

ส่วนประสิทธิภาพของวัสดุพิเศษนั้น หาได้จากภาคผนวก ฌ โดยที่หราบความเร็วของอากาศกับความลึกของวัสดุพิเศษ

จากนั้นเป็นการหาอุณหภูมิของอากาศผ่านวัสดุพิเศษ โดยสมการ

$$T_{a,2} = T_{db,1}-(T_{db,1}-T_{wb,1})\frac{\eta_{pad}}{100} \qquad \text{----------(2.18)}$$

$T_{a,2}$ = อุณหภูมิของอากาศที่ผ่านวัสดุพิเศษ, °C

$T_{db,1}$ = อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศก่อนเข้าวัสดุพิเศษ, °C

$T_{wb,1}$ = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศก่อนเข้าวัสดุพิเศษ, °C

η_{pad} = ประสิทธิภาพของวัสดุพิเศษ (ภาคผนวก ฌ)

ในการหาอัตราการไหลของน้ำผ่านวัสดุพิเศษ จะหาได้โดย

อ่านค่าอัตราส่วนความชื้นที่อุณหภูมิเข้าและอุณหภูมิออกจากวัสดุพิเศษ จากแผนภูมิไซโครเมตริก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$E_w = Q_a(m^3/s) \times (\omega_{p.2}-\omega_{p.1})$kg H_2O/kg dry air x ρ_a (kg dry air/m^3)

$E_w = \rho_a Q_w(\omega_{p.2}-\omega_{p.1})/\rho_w$ ----------(2-19)

เมื่อ E_w = อัตราการไหลของน้ำในวัสดุพิเศษ, m^3/s

2. การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของเครื่องควบแน่น

จากสมการ (2.1) คือ สมการพื้นฐานจะเห็นได้ว่า ค่าสัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนของเครื่องควบแน่น (U_o) และผลต่างของอุณหภูมิแบบล็อก (ΔT_m) มีค่าคงที่ ดังนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจะแปรผันตรงกับพื้นที่หน้าตัดของคอนเดนเซอร์ คือ

$Q \propto A_o$

ดังนั้น จะเห็นได้ว่า เมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นก็จะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของคอนเดนเซอร์เพิ่มขึ้นไปด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย