

บทที่ 2

หลักการ ทฤษฎี เหตุผลและสมมติฐาน

2.1 ระบบทำความเย็นแบบระเหย

ระบบทำความเย็นแบบระเหยเป็นการทำให้อากาศเย็นลง โดยอาศัยหลักการระเหยของน้ำ คือ เมื่ออากาศร้อนผ่านน้ำ ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) ของอากาศจะสูญเสียไป เนื่องจากถูกนำไปใช้เป็นการระเหยเป็นไอของน้ำ จึงทำให้อากาศมีอุณหภูมิหนึ่งลดลง ระบบทำความเย็นแบบระเหยสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ ระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยตรง (Direct evaporative cooling) กับระบบทำความเย็นแบบระเหยไม่ตรง (Indirect evaporative cooling)

ระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยตรงเป็นการนำอากาศภายนอกผ่านพื้นผิวน้ำหรือละอองน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด

ระบบพ่นหมอก (Spray nozzle) ใช้น้ำอัดผ่านหัวฉีดให้กลายเป็นฝอยภายในโรงเรือน และมีพัดลมระบายอากาศออกไปข้างนอกโรงเรือน

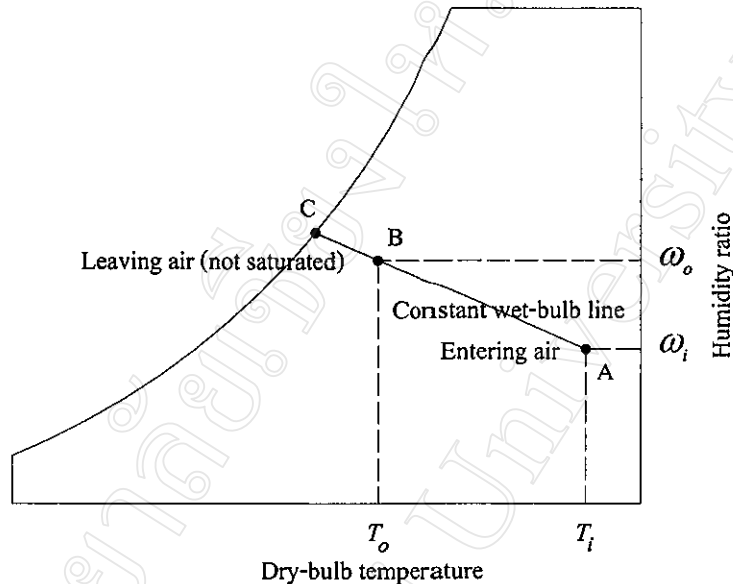
ระบบจานหมุน (Spring disc) ใช้งานหมุนที่มีความเร็วสูงตุน้ำที่หยดลงบนจานให้กลายเป็นหมอก และมีพัดลมดูดเข้าไปในโรงเรือน

ระบบแผงระเหยน้ำ ใช้อากาศผ่านแผงระเหยน้ำที่เปียก และมีพื้นที่สัมผัสอากาศมาก โดยมีพัดลมดูดอากาศภายนอกเข้าไปในโรงเรือน

ระบบทำความเย็นแบบระเหยไม่ตรง จะแตกต่างกับระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยตรง โดยอากาศที่จะผ่านกระบวนการจะต้องผ่านขดลวดทำความเย็นปฐมภูมิ (Precooling coil) ก่อน ซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิหนึ่ง และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศลง แต่จะมีความซับซ้อนและค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบระเหยโดยตรง

ในการศึกษานี้จะทำการศึกษาอุณหภูมิ และความชื้นของอากาศในระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยตรงชนิดใช้แผงระเหยน้ำ

2.2 คุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่านแผงระเหยน้ำในระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยตรงบน ไซโครเมตริกชาร์ท (Psychrometric chart)



รูป 2.1 คุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่านแผงระเหยน้ำในระบบทำความเย็นแบบระเหยโดยตรง
ในทางอุดมคติบนไซโครเมตริกชาร์ท

ที่มา: Watt *et al.* (1986)

อากาศที่ไหลผ่านแผงระเหยน้ำสามารถแสดงคุณสมบัติต่างๆ บนไซโครเมตริกชาร์ท ดัง
ในรูป 2.1 โดยแสดงสถานะอากาศภายนอก (อากาศก่อนผ่านแผงระเหยน้ำ) ที่จุด A และสถานะ
อากาศหลังผ่านแผงระเหยน้ำที่จุด B กระบวนการในอุดมคติจะดำเนินบนเส้นเอนทัลปีคงที่หรือ
บนเส้นอุณหภูมิกระเปาะเปียกคงที่ AB คือ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกระบบทำความเย็น
(Adiabatic process) โดยสมมติให้อุณหภูมิของน้ำที่ผ่านแผงระเหยน้ำเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก
ของอากาศก่อนผ่านแผงระเหยน้ำ และอากาศที่ผ่านแผงระเหยน้ำทั้งหมดจะอิ่มตัว ดังแสดงที่จุด C
แต่ในทางปฏิบัติอากาศจะเกือบถึงจุดอิ่มตัว ยกตัวอย่างเช่นที่จุด B อากาศที่ผ่านระบบนี้จะมี
ความชื้นเพิ่มขึ้นเท่ากับ $\omega_o - \omega_i$ และอากาศที่ผ่านแผงระเหยน้ำจะถูกทำให้ร้อนขึ้นโดยความร้อน
ในที่ต้องการปรับอากาศ

เมื่อพิจารณากระบวนการทำความชื้นเป็นแบบอะไดบาติก พบว่าความร้อนสัมผัสที่อากาศสูญเสียเท่ากับความร้อนแฝงที่น้ำได้รับ โดยสามารถแสดงเป็นสมการสมดุลความร้อนต่อมวลของอากาศแห้งได้ดังนี้ (อัครเดช, 2540)

$$(C_{pa} + C_{pv}\omega_i)(T_i - T_o) = h_{fg}(\omega_o - \omega_i) \quad (2.1)$$

เมื่อ C_{pa} , C_{pv} คือ ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของอากาศแห้ง และของไอน้ำตามลำดับ h_{fg} คือ ความร้อนแฝงในการระเหยเป็นไอของน้ำที่อุณหภูมิ T_o

2.3 อากาศชื้น

อากาศชื้น คือ ก๊าซผสมที่ประกอบด้วยอากาศแห้งและไอน้ำความดันต่ำ โดยความดันของอากาศ (P) หรือความดันของอากาศชื้น เท่ากับผลรวมระหว่างความดันบางส่วน (Partial pressure) ของอากาศแห้ง (P_a) กับความดันบางส่วนของไอน้ำ (P_v) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$P = P_a + P_v \quad (2.2)$$

ปริมาณความชื้นในอากาศสามารถแสดงได้หลายลักษณะ โดยแบ่งเป็น

2.3.1 อัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio, ω) คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของไอน้ำ (m_v) ต่อมวลของอากาศแห้ง (m_a) และถ้าพิจารณาอากาศชื้นเป็นก๊าซในอุดมคติ จากความสัมพันธ์ $P_v = RT$ เมื่อ T มีหน่วยเป็นเคลวิน $R_a = 0.287$ kJ/(kg.K) และ $R_v = 0.462$ kJ/(kg.K) จะได้ว่า

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = \frac{0.622P_v}{P - P_v} \quad (2.3)$$

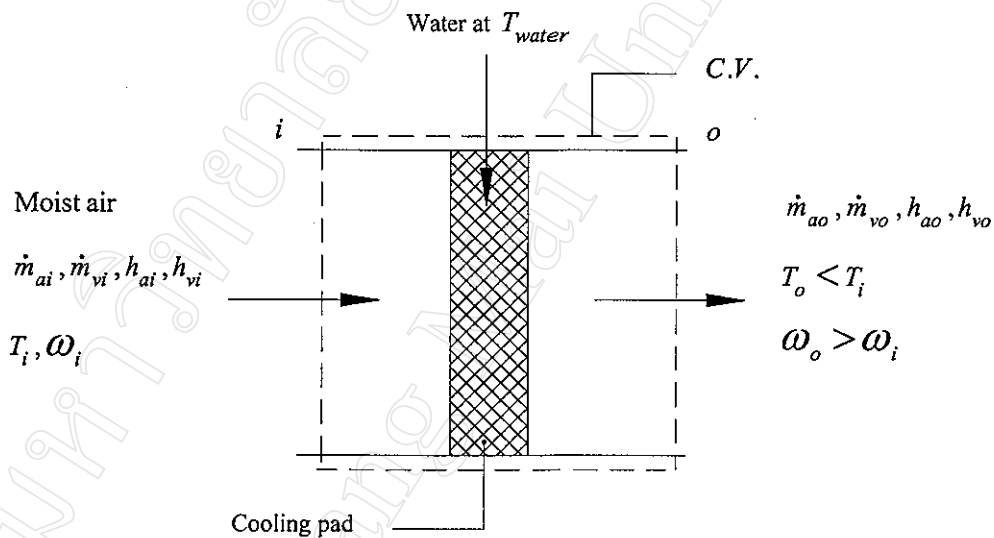
2.3.2 ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, ϕ) คือ อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไอน้ำ (M_v) กับไอน้ำอิ่มตัว (M_g) ที่อุณหภูมิเดียวกัน ถ้าพิจารณาอากาศชื้นเป็นก๊าซในอุดมคติและจากสมการ 2.3 จะได้ว่า

$$\phi = \frac{M_v}{M_g} = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega)P_g} \quad (2.4)$$

และ

$$\omega = \frac{0.622\phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (2.5)$$

2.4 สมดุลมวลและพลังงานของแผงระเหยน้ำ



รูป 2.2 ปริมาตรควบคุมของแผงระเหยน้ำ

ที่มา: Moran and Shapiro (1995)

พิจารณากฎข้อที่ 1 ของอุณหพลศาสตร์สำหรับกระบวนการสภาวะคงตัว-การไหลคงตัว (Steady-state steady-flow process) โดยพิจารณาแผงระเหยน้ำเป็นปริมาตรควบคุม ดังรูป 2.2

$$Q_{C.V.} - W_{C.V.} + (\dot{m}_{ai}h_{ai} + \dot{m}_{vi}h_{vi}) + \dot{m}_f h_f - (\dot{m}_{ao}h_{ao} + \dot{m}_{vo}h_{vo}) = 0 \quad (2.6)$$

เมื่อ \dot{m} คือ อัตราการไหลโดยมวล และ h คือ เอนทาลปีของมวลสารที่กำลังไหล

สมมติฐานในที่นี้ คือ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกปริมาตรควบคุม ไม่มีงานเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ไม่มีผลต่อระบบขณะดำเนินกระบวนการ น้ำที่ผ่านแผงระเหยน้ำระเหยเป็นไอทั้งหมด และอากาศมีความดันคงที่ ดังนั้นสมการ 2.6 สามารถเขียนได้ในรูป

$$(\dot{m}_{ai}h_{ai} + \dot{m}_{vi}h_{vi}) + \dot{m}_f h_f = (\dot{m}_{ao}h_{ao} + \dot{m}_{vo}h_{vo}) \quad (2.7)$$

จากความสัมพันธ์ $\omega = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_a}$ และนำ \dot{m}_a หาคancel ได้

$$(h_{ai} + \omega_i h_{vi}) + (\omega_o - \omega_i)h_f = (h_{ao} + \omega_o h_{vo}) \quad (2.8)$$

และจาก $h_v \approx h_g$ ได้

$$(h_{ai} + \omega_i h_{gi}) + (\omega_o - \omega_i)h_f = (h_{ao} + \omega_o h_{go}) \quad (2.9)$$

สมการ 2.9 เป็นสมการสมดุลพลังงานของแผงระเหยน้ำ

2.5 ประสิทธิภาพการอิ่มตัว (Saturating efficiency)

ประสิทธิภาพของการทำความเย็นแบบระเหยโดยตรง นิยามว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างผลต่างของอุณหภูมิแห้งอากาศก่อนผ่านแผงระเหยน้ำ (T_{do}) และอุณหภูมิแห้งอากาศหลังผ่านแผงระเหยน้ำ (T_{di}) กับผลต่างของอุณหภูมิแห้งและอุณหภูมิกระเปาะเปียกอากาศก่อนผ่านแผงระเหยน้ำ (T_{wo}) ดังสมการ

$$E_S = \frac{T_{do} - T_{di}}{T_{do} - T_{wo}} \times 100 \quad (2.10)$$

2.6 อุณหภูมิอากาศหลังผ่านแผงระเหยน้ำ

การหาอุณหภูมิอากาศหลังผ่านแผงระเหยน้ำ (T_o) จะอาศัยหลักการของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างอากาศกับผิวแผงระเหยน้ำเท่ากับปริมาณความร้อนของอากาศที่เปลี่ยนแปลง (Özışik, 1985) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$h_p A_{pt} \Delta T_m = \rho A_{ct} V_i C_p (T_i - T_o) \quad (2.11)$$

เมื่อ h_p คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผงระเหยน้ำ เมื่อจัดรูปแบบสมการ 2.11 ใหม่จะได้อุณหภูมิอากาศหลังผ่านแผงระเหยน้ำเท่ากับ

$$T_o = T_i - \left(\frac{h_p A_{pt} \Delta T_m}{\rho A_{ct} V_i C_p} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ ΔT_m คือ Logarithmic mean temperature difference ซึ่งเท่ากับ

$$\Delta T_m = \frac{T_i - T_o}{\ln[(T_i - T_s)/(T_o - T_s)]}$$

V_i คือ ความเร็วอากาศก่อนผ่านแผงระเหยน้ำ และคุณสมบัติของอากาศหาที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิอากาศก่อนผ่านแผงระเหยน้ำกับอุณหภูมิผิวแผงระเหยน้ำ (T_s)

2.7 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผงระเหยน้ำ

การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผงระเหยน้ำ ในสมการ 2.11 และ 2.12 จะพิจารณาว่าการไหลของอากาศที่ไหลผ่านแผงระเหยน้ำเป็นการไหลในท่อแบบบังคับ (Forced convection inside duct) โดยผนังท่อมีอุณหภูมิคงที่ (Constant wall temperature) การไหลเป็นแบบพัฒนาสมบูรณ์แล้ว (Fully-developed) และเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) คุณสมบัติของอากาศที่ไหลผ่านมีค่าคงที่ซึ่ง $Re = u_m D/V$ สำหรับท่อหน้าตัดกลม และ $Re = u_m D_h/V$ สำหรับท่อที่มีหน้าตัดไม่กลม เมื่อ u_m คือ ความเร็วอากาศเฉลี่ยที่ไหลในท่อ และ D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) โดยคุณสมบัติของอากาศหาที่อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิอากาศก่อนผ่านกับหลังผ่านแผงระเหยน้ำ

การหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของแผงระเหยน้ำแต่ละชนิดที่ใช้ในการทดลองแบ่งได้ดังนี้

2.7.1 แผงระเหยน้ำแบบกระสอบป่าน พิจารณาเป็นการไหลแบบบังคับผ่านแผ่นเรียบวางขนานกัน โดยกำหนดให้อัตราส่วนระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นกับความยาวแผ่นเรียบเท่ากับศูนย์ (Bayazitoglu and Özişik, 1988) โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ

$$h_p = \frac{7.541k}{D_h} \quad (2.13)$$

เมื่อ D_h เท่ากับสองเท่าของระยะห่างระหว่างแผ่นเรียบ

2.7.2 แผงระเหยน้ำแบบคอนกรีตมีรูพรุน พิจารณาเป็นการไหลแบบบังคับในท่อกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ D (Bayazitoglu and Özişik, 1988) โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ

$$h_p = \frac{3.657k}{D} \quad (2.14)$$

2.7.3 แผงระเหยน้ำแบบเยื่อกระดาษ พิจารณาเป็นการไหลแบบบังคับในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่ว (Bayazitoglu and Özişik, 1988) โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ

$$h_p = \frac{2.47k}{D_h} \quad (2.15)$$

เมื่อ $D_h = 4A_c/P_c$ โดย A_c คือ พื้นที่หน้าตัดท่อ และ P_c คือ เส้นรอบรูปหน้าตัดท่อ

2.8 สมดุลความร้อนของโรงเรือน

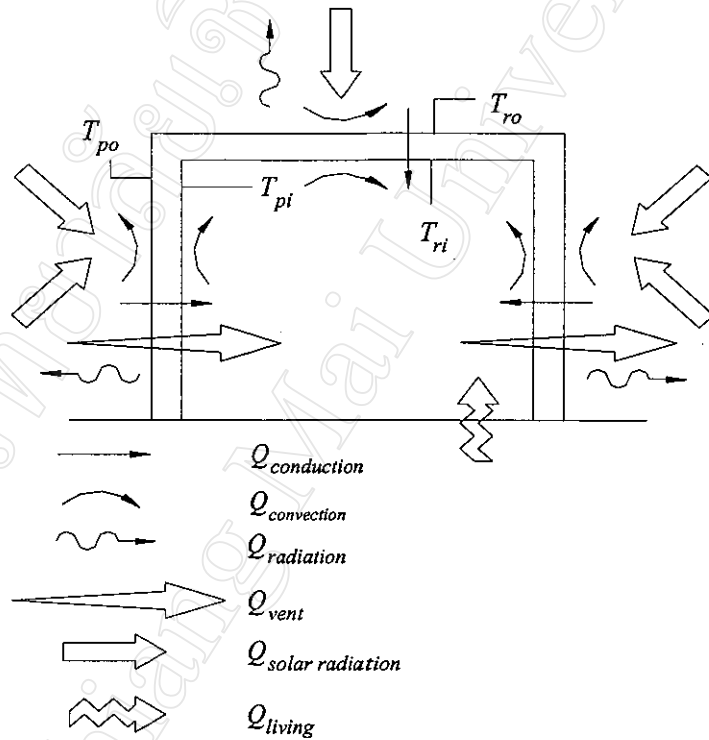
ความร้อนที่โรงเรือนได้รับจะประกอบด้วยความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝงซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น

2.8.1 ความร้อนสัมผัส เป็นความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนเพิ่มขึ้น แต่จะไม่ทำให้ความชื้นของอากาศภายในเพิ่มขึ้นแบ่งเป็น ความร้อนที่เกิดจากรังสีแสงอาทิตย์

ความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนผ่านโครงสร้างของโรงเรือน ความร้อนที่นำเข้ามากับอากาศภายนอกเนื่องจากกระแสของอากาศ และความร้อนจากสิ่งมีชีวิตในโรงเรือน

2.8.2 ความร้อนแฝง เป็นความร้อนที่ไม่ทำให้อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนเพิ่มขึ้น แต่จะทำให้ความชื้นของอากาศภายในเพิ่มขึ้น โดยจะอยู่ในรูปของไอน้ำ คือ ความร้อนจากอากาศภายนอก และความร้อนจากสิ่งมีชีวิตในโรงเรือน

โดยคำว่าความร้อนและอุณหภูมิที่จะกล่าวถึงหลังจากนี้จะหมายถึงความร้อนสัมผัส และอุณหภูมิแห้งตามลำดับ

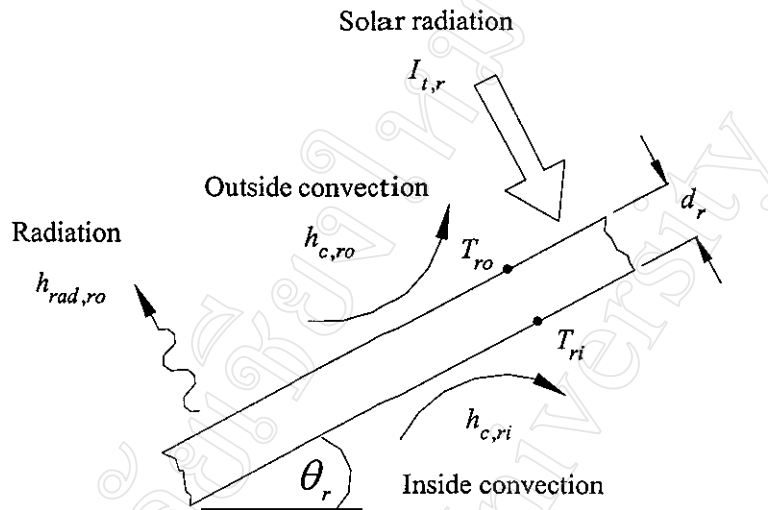


รูป 2.3 ความร้อนที่ถ่ายเทผ่านโรงเรือนรูปแบบต่างๆ

การศึกษาอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนจะศึกษาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านโรงเรือนทั้งหมด (Q_{total}) ซึ่งอยู่ในรูปของการนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน ความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยแสดงออกมาในลักษณะของอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคา (Q_r) อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนัง (Q_p) อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการระบายอากาศ (Q_{vent}) และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งมีชีวิตในโรงเรือน (Q_{living}) ดังรูป 2.3 ซึ่งสามารถแสดงในรูปสมการได้

$$Q_{total} = \Sigma Q_r + \Sigma Q_p + Q_{vent} + Q_{living} \quad (2.16)$$

2.9 สมดุลความร้อนของหลังคา



รูป 2.4 สมดุลความร้อนของหลังคาโรงเรียน

จากรูป 2.4 พิจารณาผิวหลังคาด้านนอก พบว่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหลังคาเป็นผลรวมของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวหลังคาด้านนอกกับท้องฟ้า การพาความร้อนระหว่างผิวหลังคาด้านนอกกับอากาศภายนอก และความร้อนที่หลังคาดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหลังคา ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

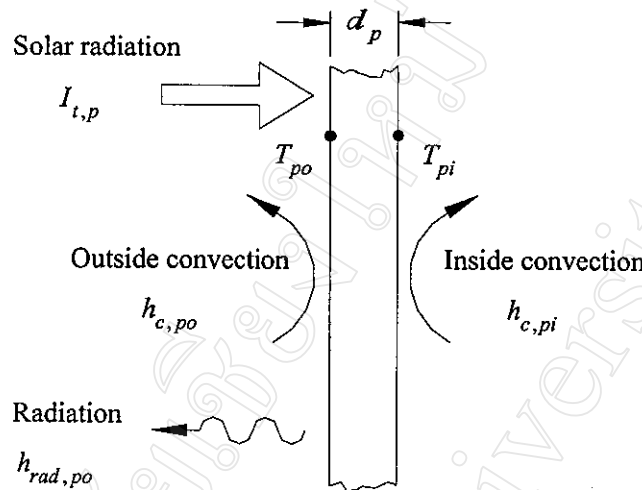
$$Q_r = \left[h_{rad,ro} (T_{sky} - T_{ro}) + h_{c,ro} (T_{am} - T_{ro}) + \frac{I_{t,r} \alpha_r}{3600} \right] A_r \quad (2.17)$$

เมื่อ $T_{sky} = 0.0552 T_{am}^{1.5}$ (Duffie and Beckman, 1980) $I_{t,r}$ คือ รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนหลังคา และ α_r คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ของหลังคา

พิจารณาผิวหลังคาด้านใน โดยให้การถ่ายเทความร้อนผ่านหลังคาเป็นสภาวะคงตัว (Steady state) พบว่าปริมาณความร้อนที่ผ่านหลังคาเท่ากับความร้อนจากการนำความร้อนผ่านหลังคา และเท่ากับความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างผิวหลังคาด้านในกับอากาศภายในโรงเรียน แสดงเป็นสมการได้

$$Q_r = \frac{k_r}{d_r} (T_{ro} - T_{ri}) A_r = h_{c,ri} (T_{ri} - T_{in}) A_r \quad (2.18)$$

2.10 สมดุลความร้อนของผนัง



รูป 2.5 สมดุลความร้อนของผนังโรงเรือน

จากรูป 2.5 พิจารณาผิวผนังด้านนอก พบว่าปริมาณความร้อนที่ผ่านผนังเป็นผลรวมของการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวผนังด้านนอกกับท้องฟ้า การพาความร้อนระหว่างผิวผนังด้านนอกกับอากาศภายนอก และความร้อนที่ผนังดูดกลืนรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงบนผนัง โดยสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_p = \left[h_{rad,po} (T_{sky} - T_{po}) + h_{c,po} (T_{am} - T_{po}) + \frac{I_{t,p} \alpha_p}{3600} \right] A_p \quad (2.19)$$

เมื่อ $I_{t,p}$ คือ รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนผนัง และ α_p คือ ค่าการดูดกลืนรังสีแสงอาทิตย์ของผนัง

พิจารณาผิวผนังด้านใน โดยให้การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเป็นสภาวะคงตัว พบว่าปริมาณความร้อนที่ผ่านผนังเท่ากับ ความร้อนจากการนำความร้อนผ่านผนัง และเท่ากับความร้อนจากการพาความร้อนระหว่างผิวผนังด้านในกับอากาศภายในโรงเรือน แสดงเป็นสมการได้

$$Q_p = \frac{k_p}{d_p} (T_{po} - T_{pi}) A_p = h_{c,pi} (T_{pi} - T_{in}) A_p \quad (2.20)$$

2.11 อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการระบายอากาศ

การระบายอากาศจะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศที่เข้าโรงเรือน (อากาศที่ผ่านแผงระเหยน้ำ) ซึ่งถูกดูดด้วยพัดลมดูดอากาศกับอากาศภายในโรงเรือน โดยปริมาณความร้อนที่เกิดการแลกเปลี่ยนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการระบายอากาศ (F) ในหน่วยลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ผลต่างของอุณหภูมิอากาศที่เข้าโรงเรือนกับอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือน (T_{in}) ความหนาแน่นของอากาศ (ρ) และความร้อนจำเพาะของอากาศที่ความดันคงที่ (C_p) ดังสมการ

$$Q_{vent} = F\rho C_p (T_o - T_{in}) \quad (2.21)$$

2.12 อุณหภูมิอากาศในโรงเรือน

อุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนเมื่อเวลาเปลี่ยนไป (Δt) สามารถหาได้จากอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลง (ΔQ_{total}) ในช่วงเวลา Δt จากสมการ

$$\Delta Q_{total} = \frac{\rho V C_p}{\Delta t} (T_{in,2} - T_{in,1}) \quad (2.22)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่ได้

$$T_{in,2} = \frac{\Delta Q_{total} (\Delta t)}{\rho V C_p} + T_{in,1} \quad (2.23)$$

เมื่อ $T_{in,1}$ และ $T_{in,2}$ คือ อุณหภูมิอากาศที่สภาวะแรกและสภาวะสุดท้ายตามลำดับ

2.13 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient)

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน และสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของหลังคาและผนัง สามารถแยกออกเป็นแต่ละประเภทได้ดังนี้

2.13.1 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของหลังคาต้านนอก ($h_{c,ro}$) หาจาก

$$h_{c,ro} = \frac{Nu_k}{L_r} \quad (2.24)$$

2.13.1.1 หลังคาเป็นแผ่นเรียบแนวนอน (Bayazitoglu and Özişik, 1988)

กรณีการไหลแบบอิสระ (Free convection) ผ่านแผ่นเรียบแนวนอน (ด้านร้อนหงายขึ้น)

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

$$Nu = 0.54(Gr Pr)^{1/4} \quad [10^5 < Gr Pr < 2 \times 10^7] \quad (2.25)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

$$Nu = 0.14(Gr Pr)^{1/3} \quad [2 \times 10^7 < Gr Pr < 3 \times 10^{10}] \quad (2.26)$$

เมื่อ

$$Gr = \frac{g\beta(T_{ro} - T_{am})L_{rc}^3}{\nu^2}$$

$$\beta = \frac{1}{(T_{ro} + T_{am})/2}$$

2.13.1.2 กรณีหลังคาเป็นแผ่นเรียบแนวเอียง (Bejan, 1993)

กรณีการไหลแบบอิสระ ผ่านแผ่นเรียบแนวเอียง (ด้านร้อนหงายขึ้น)

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(Gr Pr)^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad [10^{-1} < Gr Pr < 10^{12}] \quad (2.27)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ กรณีหลังคาเป็นแผ่นเรียบแนวเอียง จะแตกต่างกับกรณีหลังคาเป็นแผ่นเรียบแนวนอน โดยเพิ่มผลของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ($g \cos \theta_r$) ใน Gr เข้าไปด้วย ดังสมการ

$$Gr = \frac{g \cos \theta_r \beta (T_{ro} - T_{am}) L_r^3}{\nu^2} \quad (2.28)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน จะตัดผลของความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงใน Gr ออกไป ดังสมการ

$$Gr = \frac{g \beta (T_{ro} - T_{am}) L_r^3}{\nu^2} \quad (2.29)$$

โดยคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศที่ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมกับอุณหภูมิผิวหลังคาด้านนอก

2.13.2 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของหลังคาด้านใน ($h_{c,ri}$) หากจาก

$$h_{c,ri} = \frac{Nu_k}{L_r} \quad (2.30)$$

กรณีการไหลแบบบังคับผ่านแผ่นเรียบ (Bayazitoglu and Özişik, 1988)

สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

$$Nu = 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2} \quad [0.6 < Pr < 10, Re < 5 \times 10^5] \quad (2.31)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

$$Nu = 0.0296 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad [5 \times 10^5 < Re < 10^7] \quad (2.32)$$

$$\text{เมื่อ} \quad Re = \frac{V_r L_r}{\nu}$$

โดยคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศที่ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนกับอุณหภูมิผิวหลังคาด้านใน

2.13.3 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผนังด้านนอก ($h_{c,po}$) หาจาก

$$h_{c,po} = \frac{Nu_k}{L_p} \quad (2.33)$$

กรณีการไหลแบบอิสระผ่านแผ่นเรียบแนวตั้ง (Bayazitoğlu and Özişik, 1988)

สำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(GrPr)^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad [10^{-1} < GrPr < 10^{12}] \quad (2.34)$$

โดยคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมกับอุณหภูมิผิวผนังด้านนอก

2.13.4 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของผนังด้านใน ($h_{c,pi}$) หาจาก

$$h_{c,pi} = \frac{Nu_k}{L_p} \quad (2.35)$$

วิธีการเหมือนกับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของหลังคาด้านใน เนื่องจากเป็นกรณีการไหลแบบบังคับผ่านแผ่นเรียบ โดยคุณสมบัติต่างๆ ของอากาศหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศภายในโรงเรือนกับอุณหภูมิผิวผนังด้านใน

2.13.5 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของหลังคาด้านนอก ($h_{rad,ro}$) หาจาก

$$h_{rad,ro} = \sigma \epsilon_r (T_{sky} + T_{ro})(T_{sky}^2 + T_{ro}^2) \quad (2.36)$$

2.13.6 สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนของผนังด้านนอก ($h_{rad,po}$) หาจาก

$$h_{rad,po} = \sigma \epsilon_p (T_{sky} + T_{po})(T_{sky}^2 + T_{po}^2) \quad (2.37)$$

โดยอุณหภูมิในสมการ 2.36 และ 2.37 มีหน่วยเป็นเคลวิน

2.14 การคำนวณปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ (Duffie and Beckman, 1980)

รังสีแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนพื้นผิวโลกนั้น จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

รังสีตรง (Direct or beam radiation) เป็นรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และตกบนพื้นผิวรับแสง มีทิศทางที่แน่นอน ทิศทางจะอยู่ในแนวเส้นแสงดวงอาทิตย์

รังสีกระจาย (Diffuse radiation) เป็นรังสีส่วนที่ถูกสะท้อนจากบรรยากาศโลก และวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในแนวทางการเดินทางของแสงก่อนตกกระทบพื้นผิวรับแสง ทิศทางจะมาจากทุกทิศทางของท้องฟ้า

รังสีรวม (Total or global radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายที่ตกกระทบลงบนผิวรับแสง ในกรณีผิวรับแสงเป็นระนาบเอียง รังสีรวมจะประกอบด้วย รังสีตรง รังสีกระจายจากบนท้องฟ้า และรังสีกระจายที่สะท้อนจากผิวโลก รวมเรียกว่า Total radiation และในกรณีผิวรับแสงเป็นระนาบในแนวนอน จะไม่มีรังสีสะท้อนจากผิวโลก เรียกว่า Global radiation

โดยปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนแนวราบเหนือชั้นบรรยากาศโลก (H_o) ณ วันที่ใดๆ (n) ตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนพระอาทิตย์ตก สามารถคำนวณได้จาก (Duffie and Beckman, 1980)

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{SC} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \times \left[\cos \zeta \cos \delta \sin \varphi_s + \frac{2\pi\varphi_s}{360} \sin \zeta \sin \delta \right] \quad (2.38)$$

เมื่อ $\varphi_s = \cos^{-1}(-\tan \zeta \tan \delta)$

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \frac{(284 + n)}{365} \right]$$

2.14.1 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีกระจายกับรังสีรวม

ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีกระจายรายวันเฉลี่ยรายเดือน (Monthly mean daily diffuse radiation, \bar{H}_d) กับรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนแนวราบเหนือชั้นบรรยากาศโลกเฉลี่ยรายเดือน (Monthly mean extraterrestrial radiation, \bar{H}_o) สามารถแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างรังสีรวมรายวันเฉลี่ยรายเดือน (Monthly mean daily global radiation, \bar{H}) กับรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนแนวราบเหนือชั้นบรรยากาศโลกเฉลี่ยรายเดือน (Duffie and Beckman, 1980) ดังนี้

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}_o} = -4.6408 + 26.5495 \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} - 28.3422 \left(\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \right)^2 - 31.4546 \left(\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \right)^3 + 46.4421 \left(\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} \right)^4 \quad (2.39)$$

2.14.2 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมรายชั่วโมงกับรังสีรวมรายวัน

จากรังสีรวมรายวันเฉลี่ยรายเดือน สามารถนำมาหารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยรายเดือน (\bar{I}) โดยการกำหนดอัตราส่วนระหว่างรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยรายเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยรายเดือน (r_t) ดังนี้

$$r_t = \frac{\bar{I}}{\bar{H}} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \varphi) \frac{\cos \varphi - \cos \varphi_s}{\sin \varphi_s - \left(\frac{2\pi \varphi_s}{360} \right) \cos \varphi_s} \quad (2.40)$$

เมื่อ

$$a = a_1 + a_2 \sin(\varphi_s - 60)$$

$$b = b_1 + b_2 \sin(\varphi_s - 60)$$

a_1, a_2, b_1 และ b_2 คือ สัมประสิทธิ์ที่ความถดถอยระหว่างรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยรายเดือนกับรังสีรวมรายวันเฉลี่ยรายเดือน โดยที่เชิงใหม่มีค่าเท่ากับ 0.514, 0.228, 0.512 และ 0.083 ตามลำดับ

2.14.3 รังสีรวมรายชั่วโมงบนระนาบเอียง

รังสีแสงอาทิตย์บนระนาบเอียงจะมาจากรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีแสงอาทิตย์ที่สะท้อนมาจากสิ่งแวดล้อม ซึ่งคำนวณจาก

$$\bar{I}_t = r_t \bar{H}_t \quad (2.41)$$

เมื่อ \bar{I}_t คือ รังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยรายเดือนบนระนาบเอียง และ \bar{H}_t คือ รังสีรวมรายวันเฉลี่ยรายเดือนบนระนาบเอียง โดยคำนวณจาก

$$\bar{H}_t = \bar{H} \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \right) \bar{R}_b + \bar{H}_d \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right) + \lambda \bar{H} \left(\frac{1 - \cos \theta}{2} \right) \quad (2.42)$$

เมื่อ λ คือ อัตราการสะท้อนแสงของพื้นดินโดยมีค่าประมาณ 0.2 สำหรับพื้นที่ที่ไม่มีหิมะปกคลุม และ 0.7 สำหรับพื้นที่ที่มีหิมะปกคลุม θ คือ มุมเอียงของระนาบจากแนวระดับ และ \bar{R}_b คือ อัตราส่วนรังสีตรงบนระนาบเอียงต่อรังสีตรงบนพื้นราบ โดยคำนวณจาก

สำหรับระนาบเอียงในซีกโลกเหนือ และหันไปทางทิศใต้ ($\gamma = 0^\circ$)

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\zeta - \theta) \cos \delta \sin \varphi'_s + (\pi/180) \varphi'_s \sin(\zeta - \theta) \sin \delta}{\cos \zeta \cos \delta \sin \varphi_s + (\pi/180) \varphi_s \sin \zeta \sin \delta} \quad (2.43)$$

โดย φ'_s คือ มุมชั่วโมงพระอาทิตย์ตกดินรายวันเฉลี่ยรายเดือนของระนาบเอียง คำนวณจาก

$$\varphi'_s = \min[\cos^{-1}(-\tan \zeta \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\zeta - \theta) \tan \delta)] \quad (2.44)$$

โดย min คือ ค่าของพจน์ในวงเล็บที่น้อยกว่า

สำหรับระนาบเอียงในซีกโลกใต้ และหันไปทางทิศเหนือ ($\gamma = 180^\circ$)

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\zeta + \theta) \cos \delta \sin \varphi'_s + (\pi/180) \varphi'_s \sin(\zeta + \theta) \sin \delta}{\cos \zeta \cos \delta \sin \varphi_s + (\pi/180) \varphi_s \sin \zeta \sin \delta} \quad (2.45)$$

$$\text{เมื่อ } \varphi'_s = \min[\cos^{-1}(-\tan \zeta \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(\zeta + \theta) \tan \delta)]$$

นอกจากนี้ กรณีที่ระนาบเอียงมี $\gamma \neq 0^\circ$ และ $\gamma \neq 180^\circ$ ได้แสดงวิธีการหา \bar{R}_b ในภาคผนวก ก