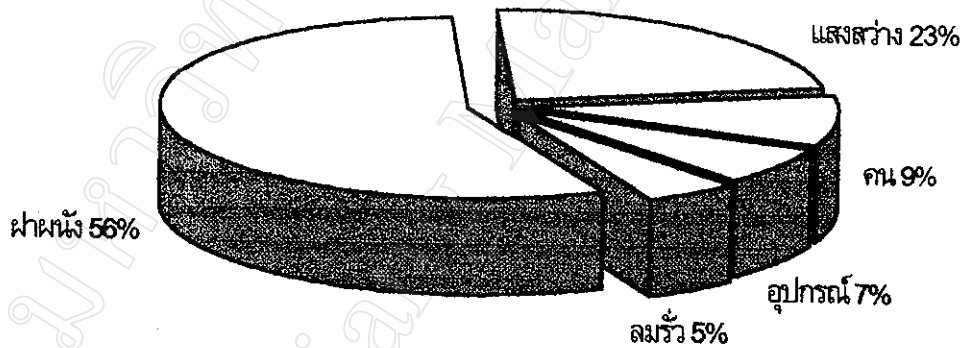


## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 การแทรกซึมของความร้อนเข้าไปในผนังอาคาร

ความร้อนที่ผ่านฝาผนังเข้าสู่อาคารมีผลทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าสูง หากความร้อนเข้าสู่ภายในอาคารมากเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศ จากข่าวสารประหยัคพลังงาน [3] กล่าวว่า ความร้อนที่ผ่านเข้ามาภายในอาคารมาจาก 5 แหล่งด้วยกันคือ ความร้อนที่ผ่านผนังเข้ามา ความร้อนที่เกิดจากระบบแสงสว่าง ความร้อนที่เกิดจากคนที่อยู่ในอาคาร ความร้อนจากอุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ในอาคาร และความร้อนจากลมร้อนที่รั่วเข้าไปในอาคาร แต่ความร้อนที่ฝาผนังของอาคารมีผลมากกว่าแหล่งอื่นๆ เพราะสามารถให้ความร้อนเข้ามาได้มากที่สุด จึงมีความจำเป็นที่ต้องให้ความสำคัญมาก ในส่วนของผนังอาคารสามารถแยกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นผนังกระจกและส่วนที่เป็นผนังทึบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 แหล่งที่มาของความร้อนภายในอาคาร  
ที่มา : ข่าวสารประหยัคพลังงาน [3]

#### 2.1.1 ความร้อนผ่านผนังกระจก

ข่าวสารประหยัคพลังงาน [3] กล่าวว่า ความร้อนที่ผ่านกระจกเข้าสู่อาคารจะมี 2 ลักษณะคือ ความร้อนของรังสีอาทิตย์ ซึ่งเมื่อแสงแดดส่องผ่านกระจกเข้าไปในห้องจะมีรังสีในช่วงคลื่นของความร้อนเข้าไปด้วยทำให้ห้องร้อนขึ้น และความร้อนอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการนำความร้อนของตัวกระจก ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนผ่านกระจกแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นการป้องกันความร้อนผ่านกระจกเข้ามาอาจทำได้ดังนี้

##### 2.1.1.1 การป้องกันไม่ให้แสงแดดส่องกระทบกระจก

รังสีแสงอาทิตย์จะมีรังสีในช่วงคลื่นความร้อนพามาด้วย ดังนั้นเราจะต้องป้องกันไม่ให้แสงแดดส่องถูกกระจก อาจทำได้โดยใช้อุปกรณ์บังแดด (Shading)

อุปกรณ์บังแดดที่ดีจะต้องมีขนาดเหมาะสม เพราะถ้ามีขนาดเล็กเกินไปจะทำให้บังแดดไม่หมด แต่ถ้ามีขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้แสงสว่างเข้ามาในห้องได้น้อยทำให้ต้องเปิดไฟตลอดเวลา การหาขนาดของอุปกรณ์บังแดดที่เหมาะสมนั้นทำได้ค่อนข้างยาก เพราะทิศทางของแสงอาทิตย์จะเปลี่ยนไปตามเวลาและตามฤดูกาล



รูปที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนผ่านกระจก  
ที่มา : ชาวสารประหยัคพลังงาน[3]

#### 2.1.1.2 การใช้กระจกกันแสง

กระจกที่ทึบแสงเช่นกระจกติดฟิล์มกรองแสง จะช่วยลดปริมาณรังสีความร้อนของแสงแดดให้เข้าสู่ห้องได้น้อยลง กระจกกันแสงนี้มี 2 ประเภทคือ

ประเภทกระจกพิเศษที่ผลิตขึ้นมาเพื่อกันแสงโดยเฉพาะ กระจกประเภทนี้จะมีสีไม่ทึบมากนัก แต่มีคุณสมบัติกันไม่ให้รังสีความร้อนของแสงแดดผ่านได้

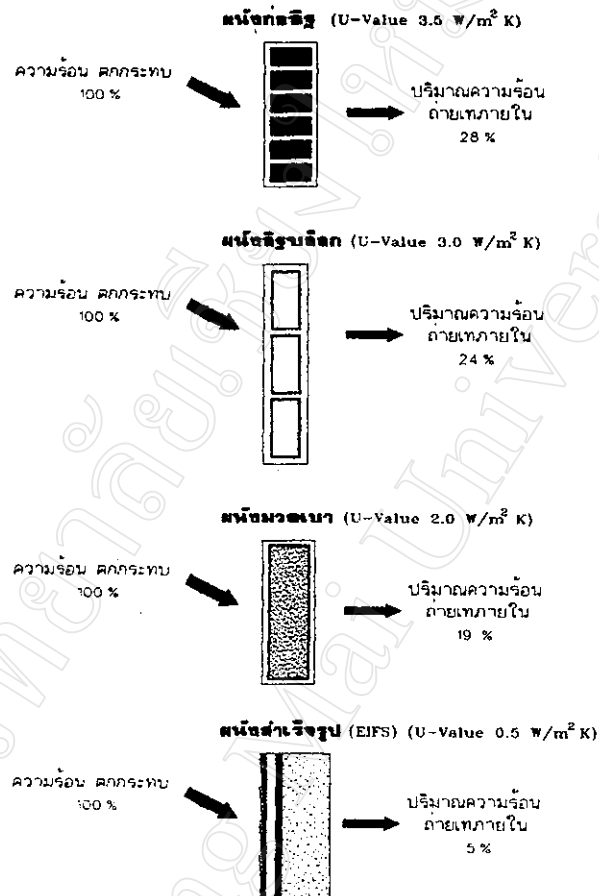
ประเภทกระจกใสธรรมดาติดฟิล์มกรองแสง เช่น กระจกหน้าต่างรถยนต์ การติดฟิล์มกรองแสงที่มีสีทึบจะช่วยกรองให้รังสีความร้อนของแสงแดดผ่านเข้าไปในห้องได้น้อยลง แต่ข้อเสียของกระจกแบบนี้คือ ตัวแผ่นกระจกเองจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เพิ่มภาระความร้อนให้แก่ห้องได้

#### 2.1.2 ความร้อนผ่านผนังทึบ

เนื่องจากแสงแดดไม่สามารถส่องผ่านผนังทึบได้ ดังนั้นจึงไม่มีการพาความร้อนติดเข้าไปกับแสงแดดเหมือนกับกระจก แต่การที่ผนังถูกแสงแดดส่องตลอดเวลา อาจทำให้อุณหภูมิผิวภายนอกของผนังสูงได้ถึง  $50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งการที่อุณหภูมิสูงขนาดนี้จะทำให้มีความร้อนไหลผ่านผนังเข้าสู่ห้องได้มาก ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.3 การป้องกันไม่ให้ความร้อนผ่านทำได้ 3 ทางคือ

### 2.1.2.1 ใช้วัสดุที่กันความร้อนได้ดีมาทำเป็นผนัง

วัสดุที่กันความร้อนได้ดีนั้นจะป้องกันไม่ให้ความร้อนผ่านตัวเนื้อวัสดุได้ง่ายๆ ดังนั้นถึงแม้ที่ผิวด้านนอกของผนังจะถูกแสงแดดส่องทำให้อุณหภูมิสูง แต่ความร้อนจะผ่านตัวผนังเข้ามาในห้องได้ยาก



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังต่างๆ

ที่มา : ข่าวสารประหยัดพลังงาน [3]

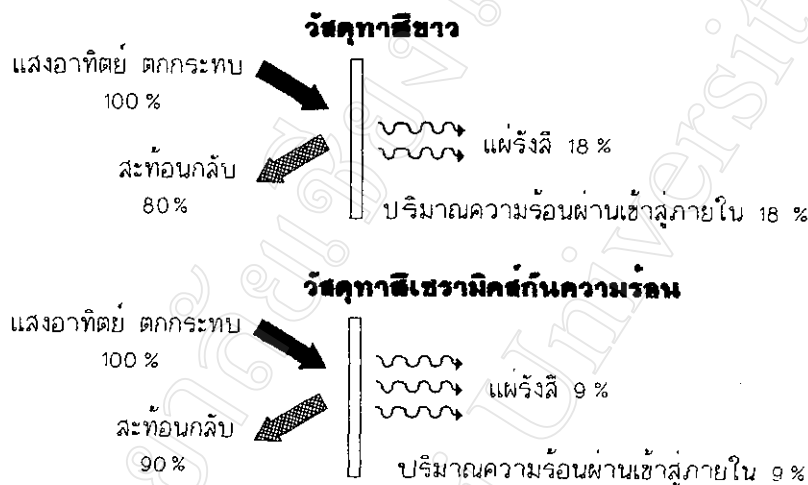
- หมายเหตุ : 1. U-Value เป็นค่าวัดการนำความร้อนของผนัง ผนังที่มีค่า U-Value ต่ำ จะเป็นผนังที่กันความร้อนได้ดี
2. ผนัง EIFS ( Exterior Insulation Finish System) ผนังภายนอกชนิดนี้มีระบบกันความร้อนจากภายนอก

ผนังแบบก่ออิฐฉาบปูนที่เรานิยมใช้กันอยู่ทั่วไปเป็นผนังที่กันความร้อนได้ไม่ดี เพราะผนังชนิดนี้ยอมให้ความร้อนผ่านได้ดี และยังเก็บความร้อนไว้ภายในเนื้อของผนังได้เป็นจำนวนมาก ห้องที่ผนังเป็นแบบก่ออิฐฉาบปูนจึงจะยังร้อนอยู่แม้ว่าดวงอาทิตย์จะตกไปนานแล้วก็ตาม

ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นวัสดุที่นำมาใช้ทำผนังได้หลายๆ ชนิด เช่นผนังมวลเบา ผนังสำเร็จรูปที่มีการป้องกันความร้อนจากภายนอก ( Exterior Insulation Finish System , EIFS ) เป็นต้น ซึ่งบางชนิดก็เป็นฉนวนที่กันความร้อนได้ดี และแข็งแรงจึงสามารถนำมาทำเป็นผนังที่ดีได้

### 2.1.2.2 การใช้วัสดุฉนวนผิวกันความร้อน

ในกรณีที่ผนังต้องถูกแสงแดดตลอดเวลาอย่างเลี่ยงไม่ได้นั้น เราอาจแก้ไขได้โดยการใช้ชนิดพิเศษมาฉนวนผิวของผนังไว้ สีพิเศษเหล่านี้จะมีคุณสมบัติในการสะท้อนรังสีความร้อนและกันไม่ให้ความร้อนผ่านเนื้อสี ดังนั้นผนังก็จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าผนังที่ทำสีธรรมดามาก ลักษณะของการป้องกันความร้อนโดยผนังที่มีการทาสีต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุทาสีต่างๆ  
 ที่มา : ข่าวสารประหยัดพลังงาน [3]

### 2.1.2.3 การป้องกันไม่ให้ผนังถูกแสงแดด

ในระหว่างการออกแบบอาคาร ถ้ามีการนำหลักการทางสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมมาใช้ เช่น การปลูกต้นไม้รอบๆ บริเวณเพื่อกันไม่ให้แสงแดดส่องถูกผนังได้ตรงๆ ก็จะเป็นวิธีที่ช่วยลดความร้อนของผนังลงได้มาก

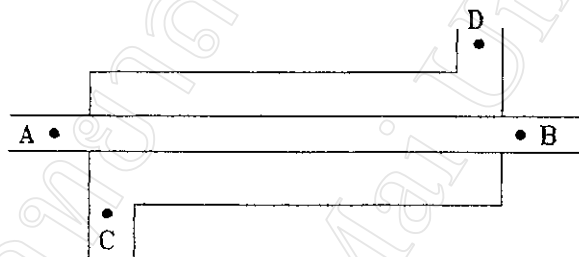
การป้องกันความร้อนที่ผ่านฝาผนังเข้าสู่อาคาร มีวิธีป้องกันได้หลายวิธี เช่น การบังเงา การใช้กระจกกันแสง และการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดี จะช่วยให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเครื่องปรับอากาศในอาคารได้มากที่สุดทีเดียว

## 2.2 การถ่ายเทความร้อนของผนังเย็น

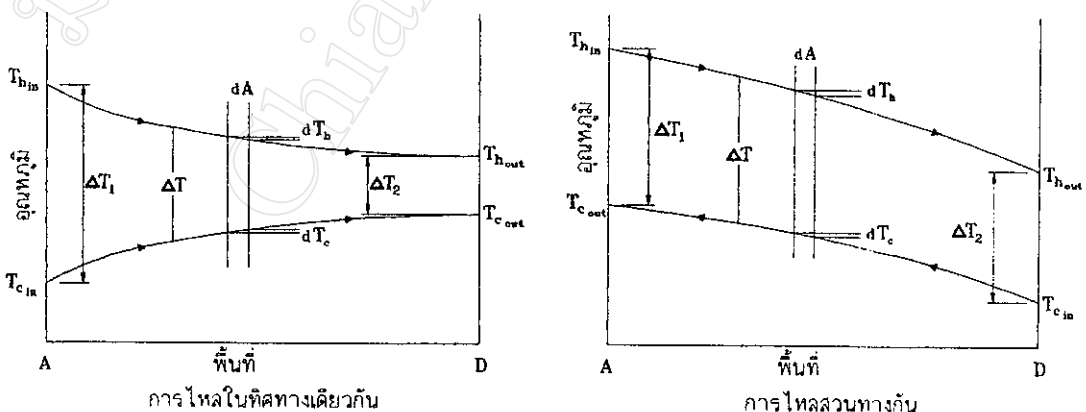
ผนังเย็นที่ใช้ในการศึกษาจะเป็นผนังที่มีท่อฝังที่ผนังด้านนอกโดยมีน้ำไหลภายในท่อ เมื่อน้ำไหลผ่านเข้าไปในผนังที่ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์น้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น หากสามารถทราบค่าอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากผนังก็สามารถคำนวณความร้อนที่น้ำรับมาจากผนังอาคารได้ วิธีการคำนวณอัตราความร้อนที่น้ำรับมาจากผนังสามารถประยุกต์ใช้ทฤษฎีของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

การคำนวณสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่นิยมใช้กันมีอยู่ 2 วิธี [7] คือ วิธีค่าความแตกต่างอุณหภูมิแบบ ล็อกมีน ( Logarithmic Mean Temperature Different ) หรือวิธี แอลเอ็มทีดี ( LMTD method ) และวิธีจำนวนของหน่วยถ่ายเท ( Number of Transfer Unit ) หรือวิธี เอ็นทียู ( NTU method ) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้วิธี แอลเอ็มทีดี

สำหรับวิธีแอลเอ็มทีดีอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่ายที่สุดที่ใช้ในการพิจารณา จะเป็นแบบท่อซ้อนท่อ ( Double Pipe or Annulus Heat Exchanger ) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลชนิดหนึ่งจะไหลในท่อและมีของไหลอีกชนิดหนึ่งไหลในท่อวงแหวน อุปกรณ์ดังกล่าวจะมีการไหลแบบขนาน ( Parallel Flow ) เมื่อของไหลทั้งสองกระแสไหลเข้าที่ตำแหน่ง A และ C ไหลออกที่ B และ D ตามลำดับ และไหลแบบสวนทางกัน ( Counter Flow ) เมื่อของไหลไหลเข้าที่ A และ D ไหลออกที่ B และ C ตามลำดับหรือไหลเข้าที่ B และ C ไหลออกที่ A และ D ตามลำดับ ซึ่งลักษณะการกระจายของอุณหภูมิในแต่ละกระแสเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสจะแสดงในรูปที่ 2.6 ในรูปที่ 2.7 แสดงการกระจายอุณหภูมิในอีแวปอเรเตอร์ ( Evaporator ) และในคอนเดนเซอร์ ( Condenser ) เมื่อไม่มีช่วงไอคง ( Superheat ) และไม่มีช่วงความเย็นยิ่งยวด ( Subcooling )



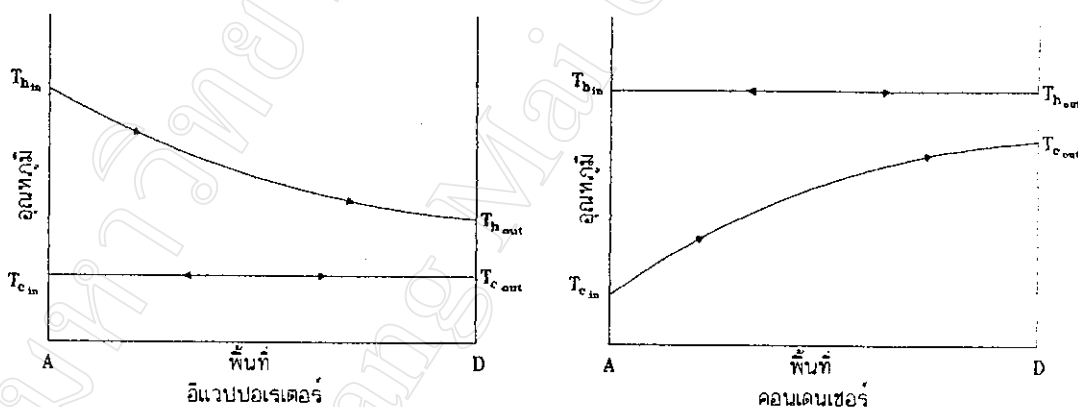
รูปที่ 2.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนท่อ  
ที่มา : การออกแบบระบบพลังงานความร้อน [7]



รูปที่ 2.6 การกระจายอุณหภูมิของของไหล ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส  
ที่มา : การออกแบบระบบพลังงานความร้อน [7]

ในการคำนวณโดยใช้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิแบบล็อกมีนในอุปกรณ์แบบท่อซ้อนท่อ จะมีสมมติฐานในการวิเคราะห์ดังนี้

- ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ระหว่างของไหลทั้งสองกระแสที่แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีค่าคงที่ตลอดในอุปกรณ์
- อุปกรณ์จะถือว่าเป็นอะเดียแบติก (Adiabatic) ความร้อนจะแลกเปลี่ยนกันระหว่างของไหลทั้งสองกระแสเท่านั้น
- การทำงานของอุปกรณ์อยู่ในสภาพคงตัว ( Steady State Conduction ) นั่นคืออัตราการไหลมีค่าคงที่ และคุณสมบัติต่างๆ มีค่าคงที่
- ความเร็วและอุณหภูมิของของไหลในอุปกรณ์ จะมีค่าสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัด ( Cross Section ) ในการไหลของของไหลที่ไหลในอุปกรณ์ และสามารถแทนได้ด้วยค่าเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด ( Bulk Velocity, Bulk Temperature )
- ค่าความจุความร้อน ( Specific Heat ) ของของไหลมีค่าคงที่
- ไม่มีการนำความร้อนตามแนวแกน ในของไหลและในผนัง
- ไม่มีแหล่งกำเนิดพลังงาน ( Thermal Energy Source ) ภายในอุปกรณ์



รูปที่ 2.7 การกระจายอุณหภูมิของของไหลในอีแวปอเรเตอร์ และในคอนเดนเซอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเฟส

ที่มา : การออกแบบระบบพลังงานความร้อน [7]

จากรูปที่ 2.6 การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลร้อนและเย็นในช่วงพื้นที่เล็กๆ  $dA$  จะอยู่ในรูป

$$dq = U(T_h - T_c)dA \quad (2.1)$$

เมื่อ  $T_h - T_c$  คืออุณหภูมิแตกต่างระหว่างกระแสน้ำร้อนและกระแสน้ำเย็นในพื้นที่  $dA$  และ  $dq$  ในแต่ละกระแสอาจคำนวณจาก

$$dq = (wc)_c dT_c = -(wc)_h dT_h$$

หรือ  $dq = C_c dT_c = -C_h dT_h$  (2.2)

เมื่อ  $C=(wc)$  คือ ผลคูณของอัตราของไหลและค่าความจุความร้อน อักษรย่อยท้าย  $c$  และ  $h$  หมายถึง กระแสเย็นและกระแสนร้อน

เมื่อกำหนด  $\Delta T = T_h - T_c$  จะได้

$$\begin{aligned} d(\Delta T) &= dT_h - dT_c = -\frac{dq}{C_h} - \frac{dq}{C_c} \\ &= -\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) dq \end{aligned} \quad (2.3)$$

จากสมการ 2.1 และ 2.3

$$\frac{d\Delta T}{\Delta T} = -U\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) dA \quad (2.4)$$

ในกรณีการไหลแบบขนานกัน ดังรูปที่ 2.6 จะได้

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -UA\left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\Delta T_1 = T_{hi} - T_{ci}$ ,  $\Delta T_2 = T_{ho} - T_{co}$  ในกรณีการไหลแบบขนาน

และ  $\Delta T_1 = T_{hi} - T_{co}$ ,  $\Delta T_2 = T_{ho} - T_{ci}$  ในกรณีการไหลแบบขนาน

จาก  $C_h = \frac{q}{T_{hi} - T_{ho}}$  และ  $C_c = \frac{q}{T_{co} - T_{ci}}$  เมื่อ  $i = in$ ,  $o = out$  จะได้

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -UA \frac{[(T_{hi} - T_{ho}) + (T_{co} - T_{ci})]}{q}$$

หรือ 
$$q = UA \left[ \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \right] \quad (2.6)$$

เมื่อกำหนดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิล็อกมีน LMTD โดย

$$LMTD = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (2.7)$$

จะได้ 
$$q = UA(LMTD) \quad (2.8)$$

สมการ 2.6 และ 2.7 ยังสามารถใช้กับของไหลที่ไหลแบบตามกันและสวนทางกัน ในอีแวปโปเรเตอร์และคอนเดนเซอร์ ซึ่งอุณหภูมิของกระแสหนึ่งที่มีค่าคงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ในกรณีของอินเวปเปอร์เตอร์ และคอนเดนเซอร์ซึ่งมีอุณหภูมิของของไหลกระแสหนึ่งมีค่าคงที่ เมื่อไม่เกิดช่วงไอคง และช่วงความเย็นยิ่งยวด ดังรูปที่ 2.7 สมมติอุณหภูมิของกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงมีค่าคงที่  $T_c$  อัตราการถ่ายเทความร้อนจะคำนวณได้จาก

$$q = UA \frac{[(T_c - T_i) - (T_c - T_o)]}{\ln[(T_c - T_i) - (T_c - T_o)]} = w c_p (T_o - T_i) \quad (2.9)$$

เมื่อ  $w$  คืออัตราการไหลในกระแสที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง  $T_i$  และ  $T_o$  เป็นอุณหภูมิของของไหลนี้ที่เข้าและออกจากอุปกรณ์ตามลำดับ สมการ 2.9 สามารถจัดได้ในรูป

$$\frac{U A}{w c_p} = \ln \left[ \frac{(T_c - T_i)}{(T_c - T_o)} \right] = - \ln \left[ \frac{(T_c - T_o)}{(T_c - T_i)} \right]$$

$$\text{หรือ } e^{\frac{U A}{w c_p}} = \frac{(T_c - T_o)}{(T_c - T_i)} = \frac{(T_c - T_o + T_i - T_i)}{(T_c - T_i)}$$

$$T_o = T_i + (T_c - T_i) \left( 1 - e^{-\frac{U A}{w c_p}} \right) \quad (2.10)$$

นั่นคืออุณหภูมิของของไหลที่ออกจากอุปกรณ์ในกระแสที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง สามารถคำนวณจากค่าอุณหภูมิที่เข้าอุปกรณ์ และจากค่าอุณหภูมิในอีกกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเกิดจากการเดือดและกลั่นตัวในอินเวปเปอร์เตอร์หรือคอนเดนเซอร์ตามลำดับ

จากที่กล่าวมาเราสามารถประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณหาอุณหภูมิของไหลที่ออกมาจากผนังอาคาร โดยใช้หลักการของการถ่ายเทความร้อนในอินเวปเปอร์เตอร์หรือคอนเดนเซอร์ กล่าวคือให้อุณหภูมิในกระแสที่คงที่ซึ่งเป็นกระแสร้อนเป็นอุณหภูมิของผนังอาคาร อุณหภูมิของน้ำที่ไหลหมุนเวียนผ่านผนังอาคารเป็นกระแสน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น สมการที่ 2.10 สามารถจะเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$T_{FO} = T_{FI} + (T_{WALL} - T_{FI}) \left( 1 - e^{-\frac{U A n}{\dot{m} c_{pw}}} \right) \quad (2.11)$$

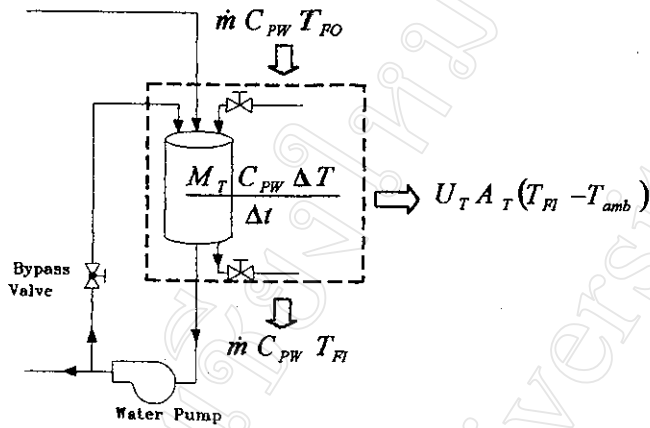
$T_{FO}$  คืออุณหภูมิของน้ำที่ออกจากผนัง  $T_{FI}$  คืออุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าสู่ผนัง  $T_{WALL}$  คืออุณหภูมิของผนังอาคาร  $\dot{m}$  คืออัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านผนัง  $n$  คือจำนวนท่อทองแดงที่ฝังในผนังด้านนั้นๆ  $c_{pw}$  คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ  $A$  หมายถึงพื้นที่ผิวท่อทองแดง 1 ท่อ

### 2.3 การสะสมความร้อนในถังเก็บน้ำ

น้ำร้อนที่ออกจากผนังอาคารไหลกลับคืนสู่ถังเก็บน้ำตลอดเวลา ทำให้น้ำในถังร้อนขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลาเย็นที่พระอาทิตย์ใกล้จะตกดินผนังอาคารจะค่อยๆ เย็นลงเนื่องจากได้รับแสงแดดน้อยลง ช่วงเวลาประมาณ 17.00 - 18.00 น. น้ำในถังเก็บน้ำจะเริ่มมีอุณหภูมิลดลง หากต้องการที่จะนำน้ำอุ่นไป



ใช้อาบในคอนเย็นก็ควรจะมีเวลาตั้งกล่าวนี้ ดังที่ใช้เก็บน้ำทำการหุ้มฉนวนไว้โดยรอบเพื่อต้องการเก็บรักษาอุณหภูมิได้จนถึงคอนเย็น



รูปที่ 2.8 สมดุลพลังงานที่ถังเก็บน้ำ

น้ำที่ไหลเข้าถังเก็บน้ำมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลาจึงต้องคำนวณซ้ำ ๆ กันหลายเที่ยว โดยแบ่งเป็นช่วงเวลา  $\Delta t$  สั้น ๆ เราสามารถที่จะคำนวณหาอุณหภูมิของน้ำในถังเมื่อเวลาผ่านไป  $\Delta t$  ได้ โดยการทำสมดุลพลังงานที่ถังเก็บน้ำดังรูปที่ 2.8 มีเทอมที่เกี่ยวข้องอยู่ 4 เทอม

เทอมแรกหมายถึงความร้อนในถังน้ำที่สูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป  $(M_T C_{PW} \Delta T) / \Delta t$  โดยที่  $M_T$  คือ มวลของน้ำในถังเก็บน้ำ  $C_{PW}$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ  $\Delta T$  คืออุณหภูมิของน้ำในถังที่เปลี่ยนแปลงไป  $\Delta t$  คือเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในรอบการคำนวณรอบหนึ่ง

เทอมที่สองคืออัตราพลังงานที่ไปกับน้ำอุ่นไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำ  $\dot{m} C_{PW} T_{FO}$  โดยที่  $\dot{m}$  คืออัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านผนัง  $T_{FO}$  คืออุณหภูมิของน้ำที่ไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำ

เทอมที่สามคืออัตราพลังงานที่น้ำอุ่นไหลออกจากถังเก็บน้ำ  $\dot{m} C_{PW} T_{FI}$  โดยที่  $T_{FI}$  คืออุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากถังเก็บน้ำ

เทอมสุดท้ายคืออัตราความร้อนที่ถังเก็บน้ำสูญเสียสู่สิ่งแวดล้อม  $U_T A_T (T_{FI} - T_{amb})$  อัตราจากทั้งสี่เทอมที่กล่าวมาสามารถเขียนสมดุลพลังงานที่ถังเก็บน้ำได้ดังนี้

$$\frac{M_T C_{PW} \Delta T}{\Delta t} = \dot{m} C_{PW} T_{FO} - \dot{m} C_{PW} T_{FI} - U_T A_T (T_{FI} - T_{amb})$$

$$\text{หรือ } \frac{M_T C_{PW} \Delta T}{\Delta t} = m C_{PW} (T_{FO} - T_{FI}) - U_T A_T (T_{FI} - T_{amb}) \quad (2.12)$$

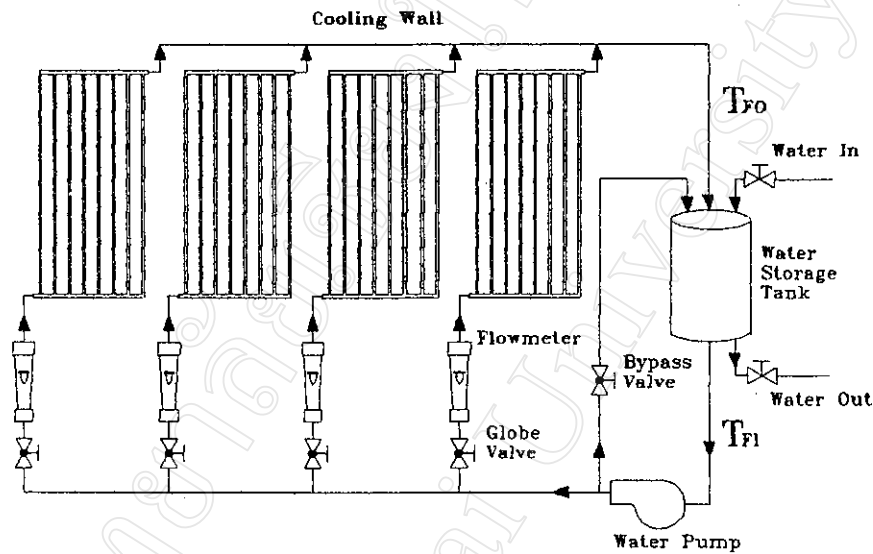
โดยที่  $U_T$  คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากถังเก็บน้ำสู่สิ่งแวดล้อม  $A_T$  คือ พื้นที่ผิวของถังเก็บน้ำ  $T_{FI}$  คืออุณหภูมิของน้ำในถังเก็บน้ำซึ่งจะถือว่ามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากถังเก็บน้ำ  $T_{amb}$  คืออุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

ค่า  $\Delta T$  คืออุณหภูมิของน้ำในถังที่เปลี่ยนแปลงไป เขียนสมการได้ใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{M_T C_{PW} (T_{FI}^{t+\Delta t} - T_{FI})}{\Delta t} = m C_{PW} (T_{FO} - T_{FI}) - U_T A_T (T_{FI} - T_{amb})$$

$$\text{หรือ } T_{FI}^{t+\Delta t} = T_{FI} + \frac{\Delta t}{M_T C_{PW}} [\dot{m} C_{PW} (T_{FO} - T_{FI}) - U_T A_T (T_{FI} - T_{amb})] \quad (2.13)$$

จากสมการที่ 2.13 เป็นสมการสำหรับใช้หาค่าอุณหภูมิน้ำในถังเมื่อเวลาผ่านไปได้ เมื่อ  $T_{FI}^{t+\Delta t}$  คืออุณหภูมิของน้ำในถังที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิน้ำที่ไหลออกจากถังถึงเก็บน้ำเมื่อเวลาผ่านไป



รูปที่ 2.9 การใช้ระบบผนังเย็นกับผนังอาคารทุกด้าน

ในการใช้ระบบผนังเย็นกับผนังมากกว่า 1 ด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งแต่ละด้านอาจมีอัตราการไหลที่แตกต่างกัน จะทำการหาค่าอุณหภูมิของน้ำเฉลี่ยที่ไหลกลับถึงเก็บน้ำดังสมการที่ 2.14 นี้

$$\dot{m}_{total} C_{PW} (T_{FO} - T_{FI}) = \dot{m}_N C_{PW} (T_{N_{FO}} - T_{FI}) + \dot{m}_E C_{PW} (T_{E_{FO}} - T_{FI}) + \dot{m}_S C_{PW} (T_{S_{FO}} - T_{FI}) + \dot{m}_W C_{PW} (T_{W_{FO}} - T_{FI})$$

หรือ

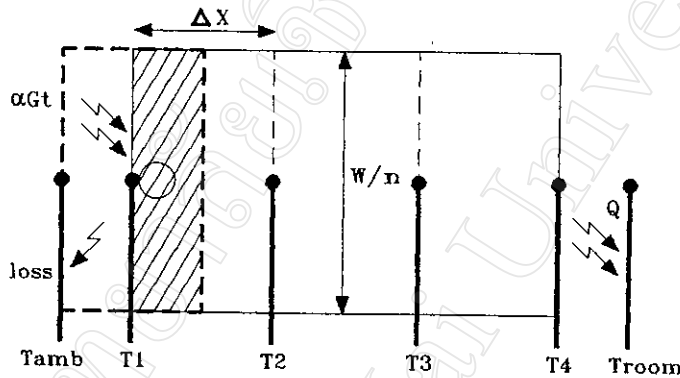
$$T_{FO} = T_{FI} + \frac{1}{\dot{m}_{total} C_{PW}} \left[ \dot{m}_N C_{PW} (T_{N_{FO}} - T_{FI}) + \dot{m}_E C_{PW} (T_{E_{FO}} - T_{FI}) + \dot{m}_S C_{PW} (T_{S_{FO}} - T_{FI}) + \dot{m}_W C_{PW} (T_{W_{FO}} - T_{FI}) \right] \quad (2.14)$$

เมื่อ  $T_{FO}$  คือ อุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากผนังทุกด้านกลับถึงน้ำ  $T_{FI}$  คืออุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากถังถึงเก็บน้ำ  $\dot{m}_{total}$  คืออัตราการไหลรวมของน้ำที่ไหลเข้าออกผนังทุกด้าน  $\dot{m}_N, \dot{m}_E, \dot{m}_S, \dot{m}_W$  คืออัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านผนังด้านทิศเหนือ ตะวันออก ได้ ตะวันตกตามลำดับ  $T_{N_{FO}}, T_{E_{FO}}, T_{S_{FO}}, T_{W_{FO}}$  คืออุณหภูมิของน้ำที่ไหลออกจากผนังด้านทิศเหนือ ตะวันออก ได้ ตะวันตกตามลำดับ

หลังจากที่ทราบค่าอุณหภูมิของน้ำที่ไหลกลับถึงเก็บน้ำ ก็จะนำ  $T_{FO}$  ไปแทนค่าในสมการที่ 2.13 ก็จะสามารถหาค่าอุณหภูมิน้ำในถังที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเวลาผ่านไปได้ ( $T_{FI}^{t+\Delta t}$ ) ซึ่งอุณหภูมินี้จะถือว่าเท่ากับอุณหภูมิน้ำที่ออกจากถังและเท่ากับอุณหภูมิน้ำที่ไหลเข้าผนังอาคารแต่ละด้านด้วย

## 2.4 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเย็น

ในการจำลองสถานการณ์การเพิ่มอุณหภูมิของผนังอาคารด้านในห้อง เมื่อผนังได้รับแสงอาทิตย์นั้นพบว่าอุณหภูมิผนังด้านนอกจะสูงขึ้นมาก และมีอุณหภูมิค่าลงไปเรื่อยๆ จนถึงผนังด้านในของอาคาร เนื่องจากความร้อนจะแทรกซึมเข้าไปเรื่อยๆ โดยใช้เวลาหลายชั่วโมง ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเลือกใช้วิธีแบ่งความหนาของผนังเป็นหลาย ๆ ชั้น ท่อทองแดงที่ฝังในผนังจะอยู่ในส่วนแรกสุดที่เป็นผนังด้านนอก แต่ระดับของผนังจะแบ่งให้มีความหนาเท่าๆ กัน เราจะพิจารณาผนังแยกเป็นส่วนเล็กๆ ที่มีพื้นที่รับแสงอาทิตย์  $A$  มีด้านยาวเท่ากับความยาวของท่อและด้านกว้างเท่ากับระยะระหว่างท่อ ท่อทองแดงอยู่ในแนวตรงกลางของพื้นที่รับแสงอาทิตย์นี้ ที่ผิวผนังด้านนอกสุดกำหนดให้เป็น node 1 แบ่งผนังเป็น 3 ชั้น ผิวผนังด้านในสุดให้เป็น node 4 ดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการสมดุลพลังงานที่ผนังอาคารด้านนอก ( node 1)

จากรูปที่ 2.10 โดยเหตุที่ผนังด้านนอกได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ ผนังด้านนอกจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเกิดความร้อนสะสมในผนัง ขณะเดียวกันผนังจะมีการระบายความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกอาคาร ความร้อนบางส่วนถูกถ่ายเทไปยังท่อน้ำและบางส่วนถ่ายเทเข้าสู่ผนังชั้นในถัดเข้าไปในอาคาร เราสามารถเขียนสมดุลพลังงานที่ผิวผนังชั้นนอก ที่ node 1 ได้ดังสมการที่ 2.15 ดังนี้

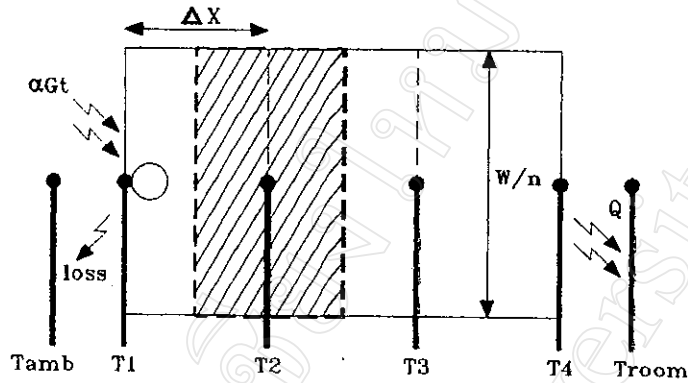
$$\rho C \frac{\Delta T_1}{\Delta t} \frac{\Delta x}{2} A = G_T \alpha A - h_o A (T_1 - T_{amb}) - \frac{\dot{m}}{n} C_{pw} (T_{FO} - T_{FI}) - k A \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \quad (2.15)$$

เทอมด้านซ้ายมือคือพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกลงบนผนังบนพื้นที่รับแสงของท่อทองแดงหนึ่งท่อ เทอมแรกด้านขวามือคือความร้อนระบายสู่บรรยากาศด้านนอกโดยการพาและแผ่รังสีความร้อน เทอมที่สองคือความร้อนที่ถูกระบายไปกับน้ำ เทอมที่สามคือความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ผนังชั้นใน เทอมสุดท้ายคือความร้อนที่สะสมอยู่ในผนังทำให้ผนังร้อนขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป สมการที่ 2.15 สามารถจัดใหม่ได้ดังนี้คือ

$$\Delta T_1 = \frac{2\Delta t}{\rho C \Delta x} \left[ G_T \alpha - h_o A (T_1 - T_{amb}) - \frac{\dot{m}}{n A} C_{pw} (T_{FO} - T_{FI}) - k \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \right]$$

$$T_1^{t+\Delta t} = T_1^t + \frac{2\Delta t}{\rho C \Delta x} \left[ G_T \alpha - h_o A (T_1 - T_{amb}) - \frac{\dot{m}}{n A} C_{pw} (T_{FO} - T_{FI}) - k \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \right] \quad (2.16)$$

สำหรับผนังชั้นที่ 2 ที่ตำแหน่ง node 2 สามารถเขียนสมดุลพลังงานและอุณหภูมิที่ตำแหน่ง node 2 ดังรูปที่ 2.11 ได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 แสดงการสมดุลพลังงานที่ตำแหน่ง node 2

$$\rho C \frac{\Delta T_2}{\Delta t} \Delta x A = k A \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} - k A \frac{(T_2 - T_3)}{\Delta x}$$

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta t}{\rho C \Delta x} \left[ k \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} - k \frac{(T_2 - T_3)}{\Delta x} \right]$$

หรือ

$$T_2^{t+\Delta t} = T_2^t + \frac{\Delta t k}{\rho C (\Delta x)^2} [T_1 - 2T_2 + T_3] \quad (2.17)$$

เช่นเดียวกันตำแหน่ง node 3 สามารถจะเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_3^{t+\Delta t} = T_3^t + \frac{\Delta t k}{\rho C (\Delta x)^2} [T_2 - 2T_3 + T_4] \quad (2.18)$$

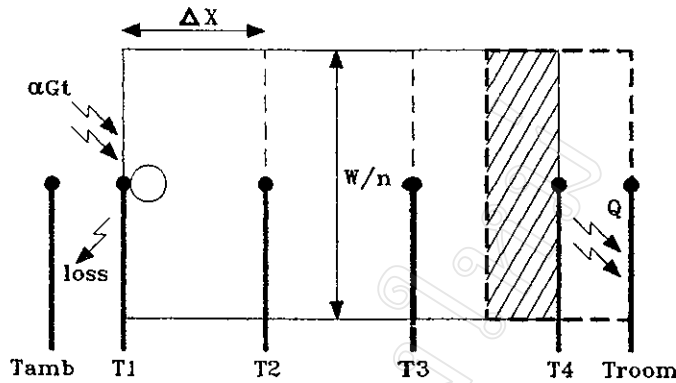
ตำแหน่ง node 4 เป็นตำแหน่งผิวผนังภายในอาคาร ผนังจะมีการถ่ายเทความร้อนสู่ภายในอาคารดังรูปที่ 2.12 สามารถเขียนสมดุลพลังงานและเขียนสมการได้ดังนี้

$$k A \frac{(T_3 - T_4)}{\Delta x} = h_i A (T_4 - T_i) + \rho C \frac{\Delta T_4 \Delta x}{\Delta t} A$$

$$\Delta T_4 = \frac{2 \Delta t}{\rho C \Delta x} \left[ k \frac{(T_3 - T_4)}{\Delta x} - h_i (T_4 - T_i) \right]$$

หรือ

$$T_4^{t+\Delta t} = T_4^t + \frac{2 \Delta t}{\rho C \Delta x} \left[ k \frac{(T_3 - T_4)}{\Delta x} - h_i (T_4 - T_i) \right] \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.12 แสดงการสมดุลพลังงานที่ผนังด้านใน (node 4)

จากสมการ (2.16), (2.17), (2.18), (2.19) สามารถคำนวณค่า  $T_4^{t+\Delta t}$  ก็จะสามารถทำให้ทราบค่าอุณหภูมิของผนังภายในอาคารเมื่อเวลาผ่านไปได้ ทำการคำนวณซ้ำๆ กันหลายๆ รอบในแต่ละชั่วโมงเช่นถ้ากำหนด  $\Delta t$  เป็น 1 นาที ก็จะมีการคำนวณชั่วโมงละ 60 รอบ เมื่อครบ 1 ชั่วโมงก็พิมพ์ค่าออกมา ทำให้ทราบค่าอุณหภูมิผนังด้านในในตอนท้ายชั่วโมงได้

### 2.5 การคำนวณปริมาณรังสีแสงอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศภายนอก

ปริมาณรังสีแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบสามารถหาได้จากข้อมูลทางสถิติเช่น Solar Radiation Tables for Architects in Thailand [20] ส่วนอุณหภูมิของอากาศในแต่ละวันสามารถประมาณค่าได้จากสมการของ Wachirapuvadon, S. [24] ดังสมการ

$$T_{amb}(t) = \frac{[(T_{max} + T_{min}) + (T_{max} - T_{min}) \cdot \sin(\frac{2\pi t}{24})]}{2} \tag{2.20}$$

โดยที่  $T_{amb}(t)$  คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม ณ เวลา  $t, (K)$   $T_{max}$  คืออุณหภูมิสูงสุดของอากาศแวดล้อมของวัน ณ เวลา  $t, (K)$   $T_{min}$  คืออุณหภูมิต่ำสุดของอากาศแวดล้อมของวัน ณ เวลา  $t, (K)$   $t =$  เวลาในชั่วโมงที่สนใจ - 9 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมในรอบสิบสองเดือนของเชียงใหม่สามารถหาได้จากตารางที่ 2.1 [23] ดังนี้

ตารางที่ 2.1 อุณหภูมิอากาศแวดล้อมในรอบสิบสองเดือนของจังหวัดเชียงใหม่

ที่มา : The Asean Users' Manual for The Asean Climatic Atlas and Compendium of Climatic Statistics [23]

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Extreme maximum	34.7	37.3	39.6	41.5	41.4	37.9	37.5	35.4	36.1	35.3	34.3	33.5	41.5
Mean daily max.	28.9	32.1	34.9	36.2	34.1	32.2	31.4	30.7	31	30.9	29.8	28.4	31.7
Mean daily min.	13	13.8	17.2	21.1	23.2	23.6	23.3	23.2	22.8	21.6	18.6	14.7	19.7
Extreme minimum	3.7	7.3	10	15.5	19.6	20	20.5	20.7	16.8	13.3	6	5	3.7

## 2.6 การคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้า

คำนวณปริมาณความร้อนที่ห้องได้รับโดยคิดจากผนังแต่ละด้านตามสมการที่ 2.21 ดังนี้

$$Q = h, A_w (\Delta T) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $A_w$  คือพื้นที่ผนังอาคารด้านนั้นๆ และ  $\Delta T$  คืออุณหภูมิแตกต่างระหว่างผนังกับภายในห้อง  $Q$  คือความร้อนซึ่งเมื่อนำไปอินทิเกรตกับเวลาจะได้ค่าพลังงานความร้อน ( $kWh$ ) การที่จะเปลี่ยนความร้อนที่เป็นภาระความเย็นของเครื่องปรับอากาศต้องทราบค่า  $COP$  ของเครื่องปรับอากาศซึ่งกรมพัฒนาส่งเสริมพลังงาน[14] ได้แนะนำค่า  $EER$  ของเครื่องปรับอากาศดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่า  $EER$  ของเครื่องปรับอากาศประเภทต่างๆ

ที่มา : กรมพัฒนาส่งเสริมพลังงาน[14]

ชนิดประสิทธิภาพ	ค่า $EER$ ของเครื่องปรับอากาศ ( $Btu / hr-W$ )		
	ชนิดหน้าต่าง	ชนิดติดฝ้าผนัง	ชนิดแยกส่วนตั้งพื้น
ประสิทธิภาพสูง	9 - 10	10 - 13	9 - 11
ประสิทธิภาพปานกลาง	8 - 9	8 - 9	8 - 9
ประสิทธิภาพต่ำ	7.5 - 8	7.5 - 8	6 - 8

จากตารางที่ 2.2 สามารถเปลี่ยนค่า  $EER$  เป็นค่า  $COP$  ได้ดังนี้ [13]

$$COP = \frac{EER \left( \frac{Btu}{hr-W} \right)}{3410 \left( \frac{Btu}{hr-kW} \right)} \times 1000 \quad (2.22)$$

เมื่อทราบค่า  $COP$  สามารถจะคำนวณปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เป็นภาระของเครื่องปรับอากาศได้จากสมการที่ 2.23

$$W = \frac{Q}{COP} \quad (2.23)$$

$W$  คือปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องการทราบ ( $kWh$ )  $Q$  คือปริมาณความร้อนที่ห้องได้รับจากผนังอาคารแต่ละด้าน

## 2.7 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

Duffie, et al. [19] ได้แนะนำสมการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผนังด้านนอกของอาคาร สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.24 โดยที่  $V$  คือความเร็วลม ( $m/s$ ) ค่า  $h_o$  ที่คำนวณได้นำไปใช้ในสมการ 2.16

$$h_o = 5.7 + 3.8V \quad (2.24)$$

ตารางที่ 2.3 ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ  
ที่มา : พระราชกฤษฎีกากำหนดอาคารควบคุม [10]

ชนิดของผิววัสดุที่ทำผนัง	ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศ ( $m^2 \cdot ^\circ C / W$ )	
	ที่ผิวผนังด้านใน ( $R_i$ )	ที่ผิวผนังด้านนอก ( $R_o$ )
ผิววัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีสูง	0.120	0.044
ผิววัสดุมีค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีต่ำ	0.299	-

ค่าความต้านทานความร้อนของฟิล์มอากาศที่ผิวผนังด้านในของอาคาร ( $R_i$ ) สามารถหาได้จากพระราชกฤษฎีกากำหนดอาคารควบคุม [10] ดังตารางที่ 2.3

$R$  ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวผนังด้านในผนังอาคารหาได้จากสมการที่ 2.25

$$h_i = \frac{1}{R_i} \quad (2.25)$$

$$\text{ในที่นี้ } h_i = \frac{1}{R_i} = \frac{1}{0.12} = 8.33$$

ค่า  $h_i$  ที่คำนวณได้จะนำไปใช้ในสมการที่ 2.21

## 2.9 ค่าการเหนี่ยวนำความร้อนของช่องว่างอากาศ

การทดสอบผนังอาคารแบบไม้อัด 2 ชั้น ผนังอาคารทำด้วยไม้อัดหนา 6 ม.ม 2 แผ่น ติดตั้งประกบแผงท่อทองแดงตรงกลาง มีช่องว่างห่างกันประมาณ 2 ซม. จะหาค่าการนำความร้อนผ่านช่องว่างระหว่างไม้อัดทั้งสองได้จากที่ C.P. Arora [15] อธิบายไว้ดังนี้

โครงสร้างของอาคารหลายแห่งมักจะมีช่องว่างอากาศอยู่ในผนังอาคาร ช่องว่างอากาศนี้ช่วยลดการถ่ายเทความร้อนและมีสภาพคล้ายกับฉนวน ระดับของการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับ Emissivity ( $\epsilon$ ) ของพื้นผิว ความกว้าง และลักษณะการวางตัวของช่องว่าง การพาความร้อนแบบธรรมชาติของช่องว่างในแนวตั้งจะมีมากกว่าช่องว่างที่อยู่ในแนวนอน

เมื่อพื้นผิวอยู่ติดกันการเคลื่อนตัวของอากาศตามธรรมชาติจะเกิดขึ้นน้อย และการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้นจากการนำความร้อน (Conduction) อย่างเดียว ช่องว่างยิ่งแคบมากความต้านทานของช่องว่างก็ยิ่งต่ำและการเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal Conductance) ก็ยิ่งสูง ถ้าช่องว่างอากาศกว้างมากขึ้นการนำความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วจนอยู่ระดับที่ตัดทิ้งไปได้ ส่วนการพาความร้อน (Convection) จะเพิ่มขึ้นและทำให้การถ่ายเทความร้อนรวมไม่ลดลงมาก

ช่องว่างอากาศที่กว้างมากกว่า 2.5 ซม. จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงการถ่ายเทความร้อนมากนัก ทั้งนี้เพราะมีการพาความร้อนสูงขึ้น ค่าการนำความร้อนน้อยลงจนไม่มีผลและสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าเข้าใกล้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง สำหรับช่องว่างที่กว้างกว่า 3 ซม. ถือได้ว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดจากการพาและการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

พิจารณาผนังอาคารที่มีช่องว่างอากาศอยู่ภายใน ให้อุณหภูมิผิวผนังภายในเป็น  $t_1$  และ  $t_2$  และให้การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่ (Heat Flux) ระหว่างพื้นผิวทั้งสองเป็น  $q_c$  และ  $q_r$  ตามลำดับ การพาความร้อนจะเกิดที่พื้นผิวทั้งสองถ้าให้  $f_c$  เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของพื้นผิวหนึ่ง ค่าความต้านทานการพาความร้อนรวมจะเขียนได้ดังสมการที่ 2.26

$$\frac{1}{f_c} + \frac{1}{f_c} = \frac{2}{f_c} \quad (2.26)$$

ส่วนกลับของความต้านทานรวมคือ  $f_c/2$  เป็นสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนประสิทธิผล (Effective Convective Coefficient) ของพื้นผิวทั้งสอง และอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่เนื่องจากการพาความร้อนแสดงดังสมการที่ 2.27

$$q_c = \frac{f_c}{2} (t_1 - t_2) \quad (2.27)$$

อัตราการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวทั้งสองหาได้ดังสมการ

$$q_r = F_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = f_r (t_1 - t_2) \quad (2.28)$$

เมื่อ  $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  (Stefan - Boltzmann constant)

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

$F_{12}$  เป็น Shape Factor ซึ่งค่า  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  เป็นค่า Emissivity ของพื้นผิวผนังทั้งสอง วัสดุก่อสร้างทั่วไปมีพื้นผิวที่ไม่สะท้อนแสงจะมีค่า Emissivity ประมาณ 0.82 สมการที่ 2.28 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการแผ่รังสีความร้อน  $f_r$  เมื่อรวมสมการ 2.27 และ 2.28 เข้าด้วยกันก็จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างพื้นผิวทั้งสอง

$$q = q_c + q_r$$

$$q = \left( \frac{f_c}{2} + f_r \right) (t_1 - t_2)$$



$$q = C(t_1 - t_2) \quad (2.29)$$

C เป็นค่า Overall Thermal Conductance ระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ตาราง 2.4 แสดงค่า Thermal Conductance ของช่องว่างอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย 2 ค่า

ตาราง 2.4 ค่าการเหนี่ยวนำความร้อนของช่องว่างอากาศ

ที่มา : Refrigeration and Air - conditioning [15]

Position	Direction of Heat Flow	Width ( cm )	Conductances ( W/ m <sup>2</sup> ° C )
<b>Mean Temperature = 10 ° C</b>			
Horizontal	Up	2.1	6.7
		11.6	6.2
	Down	2.1	5.7
		4.2	5.1
Vertical	Horizontal	11.6	4.8
		2.1	5.8
	Vertical	11.6	5.8
		2.1	5.8
<b>Mean Temperature = 32 ° C</b>			
Horizontal	Up	2.1	7.7
		11.6	7.2
	Down	2.1	7.0
		4.2	6.2
Vertical	Horizontal	11.6	5.8
		2.1	7.0
		11.6	6.9