

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาเรื่องการไหลเวียนของอากาศใต้อาคารในผนังทอมบ์แบบปรับปรุงเพื่อลดการถ่ายเทความร้อน และเหนี่ยวนำให้เกิดการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ จำเป็นต้องศึกษาแนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

1. การใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิอากาศใต้อาคาร
2. ผนังทอมบ์แบบปรับปรุง
3. การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และการป้องกันความร้อนผ่านกรอบอาคาร

2.1 การใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิอากาศใต้อาคาร

อุณหภูมิอากาศใต้อาคารสามารถนำมาใช้ประโยชน์ โดยเป็นแหล่งกักเก็บอุณหภูมิ (thermal reservoir) ที่ระบายความร้อนสำหรับอากาศใต้อาคาร ในการศึกษาวิจัยนี้เป็น การนำอากาศเย็นใต้อาคารมาเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิในช่องว่างอากาศของผนัง 2 ชั้น ทำให้เกิดการไหลของอากาศภายในผนัง อากาศเย็นใต้อาคารนั้นเป็นผลที่เกิดขึ้นจากความเย็นของดิน มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ประโยชน์ของดิน

ดินมีประโยชน์ คือสามารถเป็นแหล่งทำความเย็นให้กับอาคารได้โดยธรรมชาติทั้งทางตรงและทางอ้อม ดินที่อยู่ใต้อาคารเป็นดินที่ได้รับร่มเงาซึ่งจะทำให้ผิวดิน และดินมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากไม่ได้รับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ เมื่อดินมีอุณหภูมิต่ำมากพอจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ดินเป็นแหล่งทำความเย็นให้กับอาคาร (Givoni, 1994, pp. 191-192)

2.1.2 อุณหภูมิผิวดิน

อุณหภูมิผิวดินมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงรายวัน และช่วงรายปี เนื่องจากการดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ และค่าอุณหภูมิอากาศ (Givoni, 1994, p. 193)

- 1) อุณหภูมิผิวดินในช่วงรายวัน ขึ้นอยู่กับ
 - (1) สีของดิน ที่แสดงถึงค่าการสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ (Albedo) ของดิน
 - (2) สิ่งปกคลุมดิน
 - (3) น้ำ และความชื้นในดิน
- 2) อุณหภูมิผิวดินในช่วงรายปี ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในแต่ละท้องถิ่น

อุณหภูมิผิวดินที่ระดับความลึก 30 เซนติเมตร อุณหภูมิผิวดินจะต่ำลง 2 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิผิวดินที่คงที่ตั้งแต่ความลึก 60 เซนติเมตร เป็นต้นไป ซึ่งจะสามารถประมาณค่าได้จากอุณหภูมิอากาศในรอบปี (Givoni, 1994, p. 196)

2.1.3 สมการทำนายอุณหภูมิผิวดิน

เมื่อศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิผิวดิน และการถ่ายเทความร้อนของดิน จะได้สมการทำนายอุณหภูมิที่ผิวดิน ดังนี้

$$-k \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = h_c(T_{atm} - T_s) + \alpha_0 S - \varepsilon \Delta R - LE \quad \text{สมการที่ (2.1)}$$

สมการที่ (2.1) คือ สมดุลความร้อนของผิวดิน ที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวดิน เท่ากับการพาความร้อนจากอากาศสู่ผิวดิน และการดูดซับความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ ลบออกด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากผิวดินสู่บรรยากาศ และการระเหย

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิผิวดินตอนกลางวันขึ้นอยู่กับปริมาณ ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์เป็นหลัก และตอนกลางคืนขึ้นอยู่กับ ความเร็วลม อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิท้องฟ้า (El-Din, 1999)

2.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอาคารและดิน

ประเทศในเขตร้อนชื้นที่เคยเกิดน้ำท่วม ก่อให้เกิดอาคารที่มีการยกพื้นสูงขึ้นเพื่อหนีน้ำ เช่น ประเทศไทย เรือนไทยมีการยกพื้นสูงทั้งหลัง ซึ่งการยกพื้นสูงนั้นนอกจากจะเป็นการออกแบบเพื่อการหลีกเลี่ยงภavnน้ำท่วมแล้ว ยังมีประโยชน์ในเรื่องการระบายอากาศในอาคาร และส่งผลให้พื้นที่ใต้อาคารที่ยกสูงขึ้นนั้นมีอากาศเย็นเนื่องจากดินที่ได้รับร่มเงาตลอดเวลา (Givoni, 1998, p. 390)

ภาพที่ 2.1

เรือนไทยที่มีลักษณะการยกพื้นสูง



ที่มา: Givoni, 1998.

ในการศึกษาดินที่อยู่ใต้อาคารในประเทศในเขตร้อนชื้น อาคารส่วนใหญ่มีการยกพื้นสูงเหนือพื้นดิน ซึ่งทำให้มีพื้นที่ใต้อาคาร (crawl space) ซึ่งอาคารประเภทนี้ก่อให้เกิดร่มเงาตลอดเวลากับดินที่อยู่ข้างใต้ ซึ่งอาคารที่ยกสูงและมีการเปิดให้ลมพัดผ่าน และดินที่มีความชื้นนั้น ก่อให้เกิดการระเหย ทำให้อุณหภูมิดินลดลงต่ำกว่าดินที่ไม่มีสิ่งปกคลุม ซึ่งอุณหภูมิผิวดินที่อยู่ใต้อาคารมีค่าเท่ากับอุณหภูมิอากาศต่ำสุดของวัน หรือประมาณ 26 องศาเซลเซียส และที่ระดับความลึก ลงไป 1 เมตร มีอุณหภูมิ 24.3 องศาเซลเซียส (Givoni, 1994, p. 207)

ในประเทศไทย ลักษณะอาคารดังกล่าวมีมาตั้งแต่อดีต คือ เรือนไทยและในปัจจุบัน บ้านพักอาศัยมีการยกพื้นสูงเหนือดิน ประมาณ 40-50 เซนติเมตร ดินที่อยู่ใต้อาคารจึงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิอากาศต่ำสุดเฉลี่ยในฤดูหนาว ฤดูร้อน และฤดูฝน ดังนี้

ตารางที่ 2.1

อุณหภูมิอากาศต่ำสุดเฉลี่ย ในคาบ 27 ปี (พ.ศ. 2524-2550)

ภาค	ค่าอุณหภูมิอากาศต่ำสุด เฉลี่ย (องศาเซลเซียส)
เหนือ	21.29
ตะวันออกเฉียงเหนือ	22.38
กลาง	24.59
ตะวันออก	24.23
ใต้ (ฝั่งตะวันออก)	23.84
ใต้ (ฝั่งตะวันตก)	23.88

ที่มา: กรมอุตุนิยมวิทยา, 2551 (ดัดแปลง)

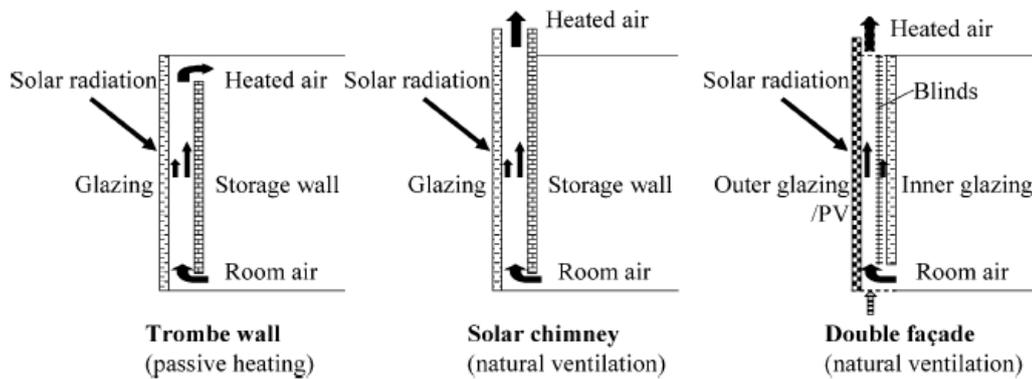
ดังนั้น สำหรับอาคารบ้านพักอาศัยในประเทศไทยที่มีการยกพื้นสูงเหนือพื้นดิน ทำให้เกิดพื้นที่ใต้อาคารที่มีดินเป็นแหล่งความเย็นทำให้อากาศใต้อาคารมีอุณหภูมิต่ำ ในการศึกษา งานวิจัยนี้เป็นการใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิอากาศใต้อาคารโดยการนำอากาศเย็นใต้อาคารมาใช้ในการเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิในช่องว่างอากาศของผนัง 2 ชั้น ทำให้เกิดการไหลของอากาศภายในผนัง เพื่อทำให้เกิดการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ การป้องกันความร้อนผ่านกรอบอาคาร

2.2 ผนังทროมบ์แบบปรับปรุง

ผนังทროมบ์แบบปรับปรุง คือ ผนังที่ประกอบด้วยผนังชั้นนอก ช่องว่างอากาศ และผนังชั้นใน ซึ่งเป็นผนังที่มีการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศในรูปแบบต่าง ๆ เนื่องจากแรงลอยตัวของอากาศ เพื่อก่อให้เกิดการทำความร้อน ทำความเย็น หรือการระบายอากาศของอาคาร เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เช่นนี้สามารถพบได้ในระบบผนังแบบปล่องรังสีดวงอาทิตย์ (solar chimney) ระบบผนัง 2 ชั้น (double façade) และผนังทროมบ์ (Trombe wall) ซึ่งทั้ง 3 รูปแบบจะประกอบด้วยผนังชั้นนอก ช่องว่างอากาศ และผนังชั้นใน ดังภาพที่ 2.2 และ 2.3

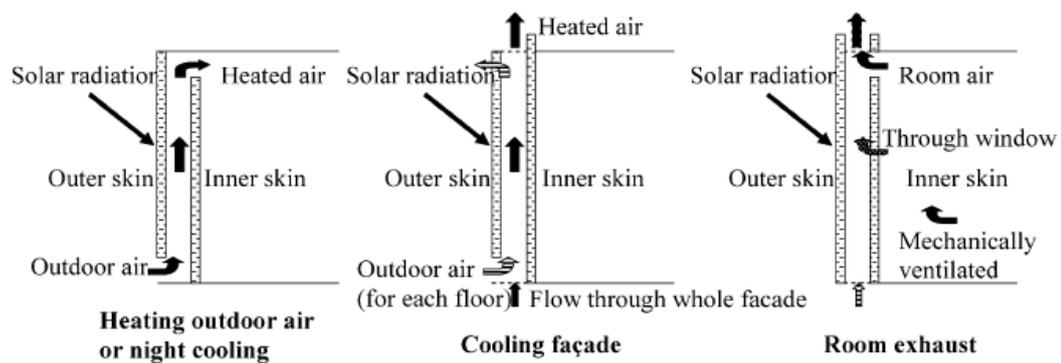
ภาพที่ 2.2

ลักษณะช่องว่างอากาศสำหรับการทำความร้อน
และการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ



ภาพที่ 2.3

การประยุกต์ใช้ผนัง 2 ชั้น สำหรับการควบคุมอุณหภูมิ



ที่มา: Gan, 2006, p. 411

2.2.1 หลักการทำงานของผนังทროมบี

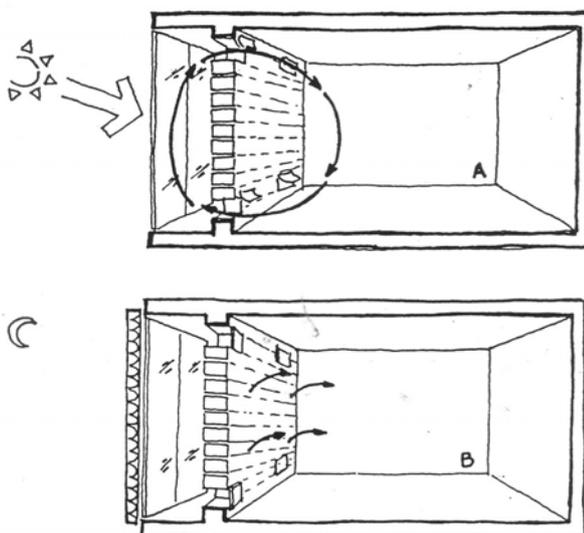
ผนังทროมบี คือ ผนังที่มีการสะสมความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ กักเก็บความร้อน และส่งผ่านความร้อนสู่พื้นที่ภายในอาคาร (Givoni, 1998, pp. 159-160) ประกอบด้วยกระจก ช่องว่างอากาศ และผนังมวลสาร เช่น ผนังคอนกรีต หรือผนังก่อ

หลักการทำงานของผนังทროมบี คือ รังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นกระจกจะถูกดูดซับด้วย ผนังมวลสารทำให้อุณหภูมิที่ผิวผนัง และอากาศในช่องว่างอากาศเพิ่มสูงขึ้น ความร้อนส่วนที่ผนัง ดูดซับไว้จะถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในด้วยคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity)

และการหน่วงความร้อนของวัสดุมวลสารมาก พื้นที่ภายในจะร้อนขึ้นด้วยการแผ่รังสีความร้อน (long-wave radiation) และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) และความร้อนอีกส่วนหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างอากาศจะทำให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นแล้วไหลเข้าสู่พื้นที่ภายในผ่านช่องเปิดด้านบน และอากาศในห้องที่เย็นกว่าจะผ่านช่องเปิดด้านล่างเข้าสู่ช่องว่างอากาศระหว่างกระจกและผนังมวลสารเพื่อทำให้อากาศร้อนขึ้น ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศในอาคาร ดังภาพที่ 2.4

ภาพที่ 2.4

ระบบการทำงานของผนังทออมป์



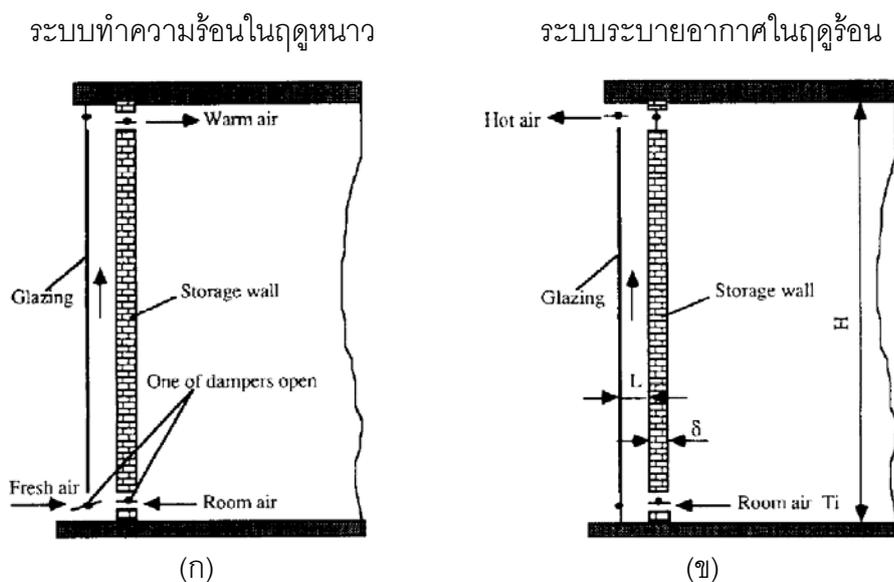
ที่มา: Givoni, 1998

การเคลื่อนที่ของอากาศ หรือการระบายอากาศนี้เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ควบคู่กับหลักการการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติโดยอาศัยความแตกต่างของอุณหภูมิ และความหนาแน่นของอากาศ (stack effect) ประเทศที่มีอากาศหนาวจะใช้ระบบนี้เพื่อสร้างความอบอุ่นให้กับพื้นที่ใช้สอย (passive solar heating) ดังภาพที่ 2.5 (ก) แต่ประเทศที่อยู่ในเขตร้อนที่มีอุณหภูมิอากาศภายนอกที่สูง ระบบนี้จะเป็นการนำความร้อนเข้าสู่พื้นที่ใช้สอยที่สร้างความไม่สบายในพื้นที่แต่อย่างไรก็ตามผนังมวลสารที่อยู่ชั้นในก็สามารถทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนได้ และใช้ระบบระบายอากาศในเวลากลางวันที่ตั้งอากาศภายนอกที่มีอุณหภูมิต่ำเข้า

มาแทน เป็นการทำความเย็นให้กับพื้นที่ใช้สอย (passive solar cooling) ดังภาพที่ 2.5 (ข) ซึ่งระบบทำความเย็นให้กับพื้นที่ใช้สอยนั้นมีการศึกษาจำนวนไม่มากนัก (Gan, 1998)

ภาพที่ 2.5

การทำงานของผนังทออมป์



ที่มา: Gan, 1998

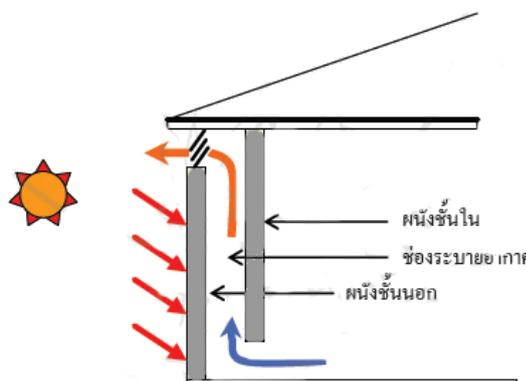
2.2.2 หลักการทำงานของผนังทออมป์แบบปรับปรุง

หลักการทำงานของผนังทออมป์แบบปรับปรุงมีลักษณะเหมือนกับผนังทออมป์ คือ มีการเคลื่อนที่ของอากาศที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ แต่วัสดุผนังภายนอกเปลี่ยนจากกระจกเป็นผนังทึบ ซึ่งการพัฒนาเป็นผนังทออมป์แบบปรับปรุงนั้นเกิดขึ้นเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนที่สูงเกินไป และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพความเป็นฉนวนป้องกันความร้อนของผนัง ดังภาพที่ 2.6

เนื่องจากความเย็นของอากาศในช่องอากาศใต้อาคารนั้นไม่สามารถนำเข้ามาใช้สร้างภาวะน่าสบายในพื้นที่ใช้สอยได้โดยตรงด้วยเหตุผลของคุณภาพอากาศที่ไม่เหมาะสม ดังนั้น จึงทำการศึกษาระบบผนังทออมป์แบบปรับปรุงเนื่องจากมีความเหมาะสมกับสภาพอากาศในเขตร้อนชื้นมากกว่า เพื่อนำหลักการมาประยุกต์ใช้กับการนำอุณหภูมิอากาศจากช่องว่างใต้อาคารมาใช้ประโยชน์ในระบบผนัง เพื่อก่อให้เกิดการระบายอากาศ และการลดอุณหภูมิผิวผนังของอาคาร

ภาพที่ 2.6

หลักการการทำงานของผนังทროมบ์แบบปรับปรุง (Modified Trombe wall)



ที่มา: วีรวัฒน์ เทศเกตุ, 2549, น. 16

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการระบายอากาศของผนังทროมบ์

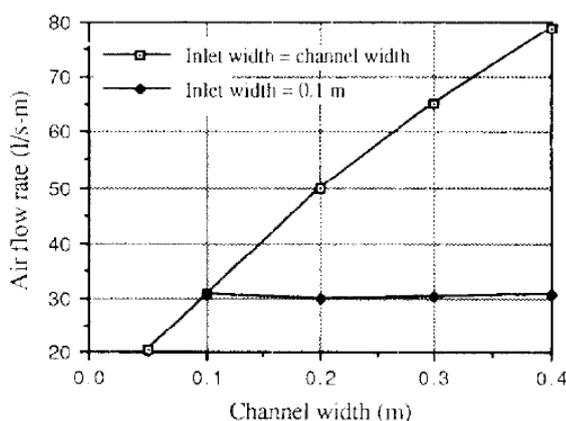
ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการระบายอากาศ มีดังต่อไปนี้ (Gan, 1998)

1) ความกว้างช่องว่างอากาศ (channel width) สำหรับขนาดช่องอากาศเข้า-ออก (inflow-outflow) ที่มีความสูง 10 เซนติเมตร ความกว้างช่องว่างอากาศจะไม่มีผลกับอัตราการระบายอากาศ เนื่องจากแรงต้านทานการไหลของอากาศส่วนมากเกิดจากความสูงช่องอากาศเข้า-ออก และแรงต้านทานอีกส่วนหนึ่งเกิดจากความกว้างช่องว่างอากาศ ซึ่งแรงต้านทานนี้จะน้อยลงเมื่อเพิ่มความกว้างช่องว่างอากาศ แต่ก็ยังเป็นส่วนน้อยเมื่อเทียบกับแรงต้านทานที่ช่องอากาศเข้า-ออก และนอกจากนี้ พบว่า ความกว้างช่องว่างอากาศที่มากกว่าชั้นขอบเขตการไหลของอากาศบริเวณผิวผนัง (boundary layer) ทำให้เกิดการวนของอากาศ ส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศที่ลดลง (Gan & Riffat, 1998) ดังภาพที่ 2.7

2) ความร้อนของผนัง (wall heat gain) ผนังมีอุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นทำให้อากาศในช่องว่างอากาศมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิมากขึ้น ส่งผลให้เกิดอัตราการระบายอากาศที่เพิ่มมากขึ้น

ภาพที่ 2.7

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการระบายอากาศ
และความกว้างช่องว่างอากาศ



ที่มา: Gan, 1998, p. 40

3) ความสูงผนัง (wall height) เกี่ยวข้องกับแรงลอยตัวของอากาศที่ส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ และการเพิ่มขึ้นของความสูงผนัง 1/4 เทียบเท่ากับการเพิ่มขึ้นของความร้อนที่ได้รับ 3/4 ส่วน

4) การป้องกันความร้อนของผนัง (thermal insulation) เนื่องจากความหนาของผนังมวลสารที่มีความสามารถในการจุความร้อนจะส่งผลต่อการปล่อยความร้อนสู่ช่องว่างอากาศ ซึ่งความหนาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิผนังเพิ่มสูงขึ้น และอัตราการระบายอากาศที่สูงขึ้น 19%

5) ตำแหน่งช่องเปิด (opening position) ตำแหน่งช่องอากาศเข้า-ออกสามารถอยู่ตำแหน่งใดก็ได้ในผนังด้านกระจก หรือมวลสารก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบการระบายอากาศที่ต้องการ

2.2.4 ทฤษฎีและสมการคำนวณ

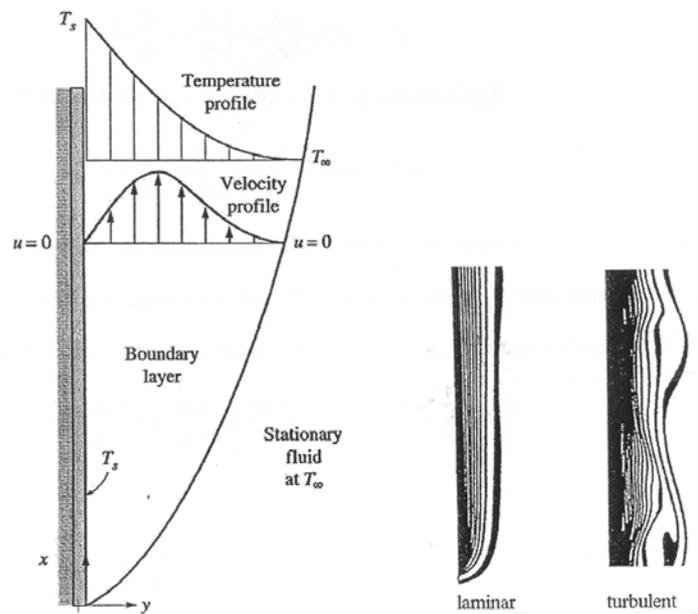
1) ทฤษฎีทางพลศาสตร์ของไหล และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

ในการศึกษาการไหลของอากาศภายในปล่อง และผนังทอมนับระบายอากาศ นั้นเกิดจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติที่อาศัยแรงลอยตัว (buoyancy force) ที่เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศ อากาศที่มีความหนาแน่นน้อย อุณหภูมิสูงลอยตัวอยู่เหนือ

อากาศที่มีความหนาแน่นมาก อุณหภูมิต่ำช่วยให้ของไหลหรืออากาศเกิดการเคลื่อนที่ โดยเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิผิวแผ่นเรียบวางในแนวตั้งมากกว่าอุณหภูมิของของไหล (Çengel, 2003)

ภาพที่ 2.8

ลักษณะทั่วไปของความเร็วและอุณหภูมิอากาศของการไหลที่เกิดจากการพาความร้อนจากแผ่นเรียบแนวตั้งที่มีความร้อน



ที่มา: Çengel, 2003, p. 463

โดยการไหลสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของกลุ่มตัวแปรที่เป็นสัดส่วนระหว่างแรงลอยตัวกับแรงต้านเนื่องจากความหนืดของของไหล ได้ว่า

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad \text{สมการที่ (2.2)}$$

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่ชั้นขอบเขตอากาศไหลที่ติดกับผนังราบ เงื่อนไขการถ่ายเทความร้อนที่ผิว จะได้การพาความร้อนจากของไหลสู่ของไหล เท่ากับการนำความร้อนจากแผ่นราบสู่ของไหล สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$h_c(T_s - T_\infty) = -k_f \frac{\partial T}{\partial y}_{y=0} \quad \text{สมการที่ (2.3)}$$

ดังนั้น เมื่อต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$h_c = \frac{-k_f \partial T / \partial y}{T_s - T_\infty} \quad \text{สมการที่ (2.4)}$$

จากสมการที่ (2.4) เมื่อคูณสมการให้เป็นตัวแปรไร้มิติ จะได้อัตราส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อผลต่างอุณหภูมิ และพิจารณา เมื่อ $\partial y = L$ จะได้ค่าที่บ่งบอกถึงอัตราส่วนการพาความร้อนต่อการนำความร้อนของของไหล เรียกว่า ตัวเลขนัสซัลท์ (Nusselt Number) เขียนได้ดังสมการที่ (2.5)

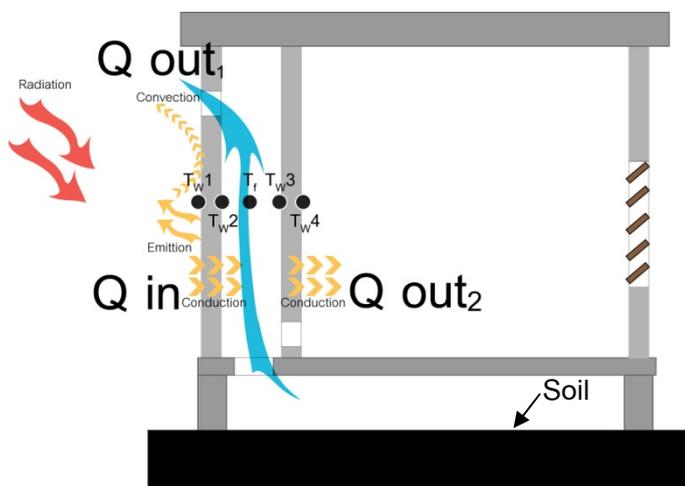
$$\frac{\partial T}{(T_s - T_\infty)} = \frac{hL}{k_f} = Nu_L \quad \text{สมการที่ (2.5)}$$

2) สมดุลพลังงานของระบบผนังทออมป์แบบปรับปรุงระบายนอากาศ

การสมดุลพลังงานของผนังทออมป์แบบปรับปรุงสามารถอธิบายได้ ดังภาพที่ 2.9

ภาพที่ 2.9

การถ่ายเทพลังงานความร้อนของระบบผนังทออมป์แบบปรับปรุง



ที่มา: โดยผู้วิจัย

หมายเหตุ: ประยุกต์จากทฤษฎีที่ศึกษา

สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q_{in} = Q_{out1} + Q_{out2} \quad \text{สมการที่ (2.6)}$$

พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์เข้าสู่ระบบ และออกจากระบบด้วยการพาความร้อนแบบธรรมชาติในผนังทอมน้ำ และส่งผ่านเข้าสู่ภายในผ่านการนำความร้อนของผนัง ซึ่งในการศึกษานี้สนใจทั้งในส่วนการพาความร้อนออกดังสมการที่ (2.7) สมการที่ (2.8) และอุณหภูมิผิวผนังภายใน ดังสมการที่ (2.9)

$$Q_{out1} = \rho A v c_p (T_{A_{outflow}} - T_{A_{inflow}}) \quad \text{สมการที่ (2.7)}$$

หรือ
$$Q_{out1} = \dot{m} c_p (T_{A_{outflow}} - T_{A_{inflow}}) \quad \text{สมการที่ (2.8)}$$

โดยที่	ρ	= ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
	A	= พื้นที่หน้าตัดช่องอากาศ (m^2)
	V	= ความเร็วอากาศในช่องอากาศ (m/s)
	\dot{m}	= อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
	C_p	= ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)
	$T_{A_{inflow}}$	= อุณหภูมิอากาศเข้าในช่องอากาศ ($^\circ\text{C}$)
	$T_{A_{outflow}}$	= อุณหภูมิอากาศออกจากช่องอากาศ ($^\circ\text{C}$)

$$-k_{int} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=x_2} \right) = h_c w_{4,int} (T_{w4} - T_{int}) + h_r m_{4,int} (T_{w4} - T_{int}) \quad \text{สมการที่ (2.9)}$$

โดยที่	k_{int}	= ค่า Thermal Conductivity ของผนังชั้นใน ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)
	X_2	= ความหนาของผนังชั้นใน (m)
	h_c	= ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากผนังชั้นในสู่ห้อง
	h_r	= ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผนังชั้นในสู่ห้อง
	T_{w4}	= อุณหภูมิผิวผนังชั้นใน ($^\circ\text{C}$)
	T_{int}	= อุณหภูมิอากาศในห้อง ($^\circ\text{C}$)

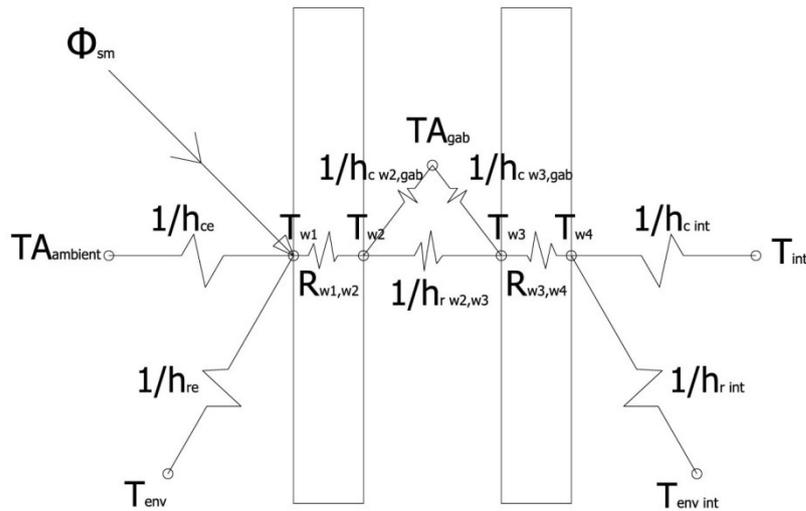
3) ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) และการหาค่าอุณหภูมิจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การศึกษาระบบผนังทอมน้ำแบบปรับปรุงนอกจากการทดลอง ยังมีการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณอัตราการไหลของอากาศ ค่าอุณหภูมิ และนำมา

เปรียบเทียบกับผลการทดลอง โดยมีรายละเอียด สมดุลพลังงาน และสมการการถ่ายเทความร้อน ดังนี้

ภาพที่ 2.10

การถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ที่มา: Shen, Lassue, Zale, & Huang, 2007 (ดัดแปลง)

สมดุลพลังงานการถ่ายเทความร้อนบริเวณผิวผนังภายนอก

$$-k_{\text{ext}} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=0} \right) = \left(\frac{h_r + h_c}{2} \right) (T_{\text{ambient}} - T_{W1}) + \phi_{\text{sm}} \quad \text{สมการที่ (2.10)}$$

โดยที่

$$h_r = \sigma \varepsilon_{W1} (T_{\text{ambient}}^2 + T_{W1}^2) (T_{\text{ambient}} + T_{W1}) \quad \text{สมการที่ (2.11)}$$

และ

$$h_c = 5.7 + 3.8v_{\text{wind}} \quad \text{สมการที่ (2.12)}$$

การถ่ายเทความร้อนในผนังชั้นนอก

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{สมการที่ (2.13)}$$

สมดุลพลังงานที่ผิวผนังชั้นนอก และชั้นในด้านช่องว่างอากาศ

$$-k_{\text{ext}} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=x1} \right) = h_c w_{2,\text{gab}} (T_{W2} - T_{\text{gab}}) + h_r w_{2,W3} (T_{W2} - T_{W3}) \quad \text{สมการที่ (2.14)}$$

$$-k_{\text{int}} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=0} \right) = h_{c, \text{gab}, W_3} (T_{A, \text{gab}} - T_{W_3}) + h_{r, W_2, W_3} (T_{W_2} - T_{W_3}) \quad \text{สมการที่ (2.15)}$$

สมดุลพลังงานในช่องว่างอากาศ

$$Q_{\text{out1}} = \dot{m} c_p \frac{(T_{\text{outflow}} - T_{\text{inflow}})}{A} \quad \text{สมการที่ (2.16)}$$

$$\dot{v}_f = C_D A \sqrt{\frac{gH(T_{\text{outflow}} - T_{\text{inflow}})}{T_{\text{outflow}} + T_{\text{inflow}}}} \quad \text{สมการที่ (2.17)}$$

การถ่ายเทความร้อนในผนังชั้นใน

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{สมการที่ (2.18)}$$

สมดุลพลังงานที่ผิวผนังชั้นใน

$$-k_{\text{int}} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=x_2} \right) = h_{c, W_4, \text{int}} (T_{W_4} - T_{\text{int}}) + h_{r, W_4, \text{int}} (T_{W_4} - T_{\text{int}}) \quad \text{สมการที่ (2.19)}$$

2.2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) การศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อนแบบธรรมชาติในผนังทอมน้ำแบบปรับปรุงที่ส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ และการลดการสะสมความร้อน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ควบคู่กับการทดลอง

(เจริญพร เลิศสถิตธนกร, 2540) ได้ศึกษาการลดการสะสมความร้อน และการระบายอากาศภายในบ้าน โดยทำการสร้างผนังทอมน้ำแบบปรับปรุง ประกอบด้วยอิฐมวลเบาปูเป็นผนังชั้นนอก ช่องว่างอากาศ และแผ่นยิปซัมเป็นผนังชั้นใน ผลที่ได้คือ ผนังทอมน้ำขนาด กว้าง 1 เมตร สูง 2 เมตร ช่องอากาศเข้า-ออกสูง 5 เซนติเมตร ช่องว่างอากาศ 14 เซนติเมตร ทาสีดำให้อัตราการระบายอากาศสูงสุด 0.06-0.023 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดีกว่าผนังที่ทาสีขาว แต่มีปัญหาที่ไม่สามารถทำให้เกิดภาวะน่าสบายในอาคารได้ แต่ก็มีศักยภาพที่เป็นฉนวนกันความร้อนให้กับอาคารได้ ช่วยลดความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ตัวบ้านได้ 75%

(วีรวัฒน์ เทศเกตตุ, 2549) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ผนังทอมน้ำแบบปรับปรุงเพื่อลดอุณหภูมิในอาคาร และลดภาระการปรับอากาศ โดยศึกษาอัตราส่วนระหว่างความกว้างช่องอากาศต่อความสูงผนัง ที่มีช่องอากาศเข้า-ออกสูง 15 เซนติเมตร พบว่าที่อัตราส่วน 0.105 จะ

ทำให้เกิดการระบายอากาศที่ดีที่สุดในการเปิดเครื่องปรับอากาศ และที่อัตราส่วน 0.053 ทำให้เกิดการระบายอากาศที่ดีที่สุดในการปิดเครื่องปรับอากาศ ทั้งนี้การศึกษาในการเปิดเครื่องปรับอากาศยังเป็นการทดลองที่มีข้อผิดพลาด คือ การศึกษาเครื่องปรับอากาศการปรับอากาศควรศึกษาเมื่อเป็นระบบปิดมากกว่าที่จะเปิดให้เกิดการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ ควบคู่กับการเปิดเครื่องปรับอากาศ เพราะเป็นการใช้งานของระบบผนังทอมนบีที่ผิดวัตถุประสงค์ และการนำประสิทธิภาพที่ได้มาเทียบกันระหว่างการเปิดและปิดเครื่องปรับอากาศไม่สามารถนำมาเทียบกันได้ เนื่องจากมีตัวแปรควบคุมที่ไม่ตรงกัน เช่น ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ควรจะเกิดจากอุณหภูมิอากาศ และความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ไม่ใช่ความแตกต่างของอากาศที่เกิดจากระบบปรับอากาศ หรือมีการเปิดและปิดหน้าต่างทำให้อากาศที่เข้ามาแทนที่อากาศที่ระบายออกไปมีอัตราส่วนที่ไม่สอดคล้องกันอัตราการระบายอากาศที่เกิดขึ้น ทำให้ผลที่เกิดขึ้นมาจากตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุมที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาเกี่ยวกับผนังทอมนบีแบบปรับปรุงพบว่าระบบที่จะทำให้เกิดการลดภาระการปรับอากาศด้วยการลดการสะสมความร้อน และลดอุณหภูมิผิวผนังสามารถเป็นไปได้ เพียงแต่ต้องมีการแยกระบบของการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และการป้องกันความร้อนของผนังของพื้นที่ปรับอากาศออกจากกัน

2) การศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อนแบบธรรมชาติในผนังทอมนบีที่ส่งผลต่ออัตราการระบายอากาศ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ควบคู่กับการทดลอง

(วรากร คงด้วง, 2540) ทดลองใช้ผนังทอมนบีที่ใช้วัสดุเป็นโลหะ ประกอบด้วยผนังด้านนอกเป็นกระจก มีช่องอากาศ ผนังด้านในมีแผ่นโลหะดักกั้นด้วยฉนวนกันความร้อน และไม่อัดกว้าง 1 เมตร สูง 2 เมตร ขนาดช่องอากาศเข้า-ออกสูง 5 เซนติเมตร พบว่า อุณหภูมิที่วัสดุโลหะลดลงเมื่อความกว้างช่องว่างอากาศเพิ่มมากขึ้น และอัตราการระบายอากาศเพิ่มมากขึ้นเมื่อความกว้างช่องว่างอากาศเพิ่มมากขึ้น โดยช่องอากาศ 14.5 เซนติเมตร มีอัตราการไหลของอากาศประมาณ 0.1-0.2 กิโลกรัมต่อวินาที และเปรียบเทียบการทดลองกับการจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้ดี

(สิริศักดิ์ แก้วเรือง, 2540) ศึกษาการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติของบ้านที่ใช้ผนังแบบทอมนบีในประเทศไทย โดยออกแบบห้องทดลองขนาด กว้าง 3.12 เมตร ยาว 3.20 เมตร และสูง 2.18 เมตร ขนาดช่องอากาศเข้า-ออกสูง 5 เซนติเมตร มีประตู หน้าต่างอยู่ทิศเหนือ ผนังทอมนบีด้านทิศใต้ประกอบด้วยผนังชั้นนอกเป็นกระจกหนา 5 มิลลิเมตร ผนังชั้นในเป็นผนังคอนกรีตหนา

8 เซนติเมตร ฟันสีดำด้านนอก และฉนวนกันความร้อน คีษาช่องว่างอากาศ 2 ค่า คือ 10 เซนติเมตร และ 14.5 เซนติเมตร ผลการศึกษาพบว่าการใช้ผนังทอมน้ำที่มีช่องว่างอากาศ 14.5 เซนติเมตร ทำให้เกิดการไหลของอากาศดีกว่าช่องว่างอากาศขนาด 10 เซนติเมตร ประมาณ 5-30%

(อัคคีภัทร์ สิริเศรษฐากร, 2549) ศึกษาประสิทธิภาพของผนังทอมน้ำเมื่อใช้กับบ้านที่มีการปรับอากาศโดยศึกษาความสัมพันธ์ของสัดส่วนความกว้างช่องอากาศต่อความสูง (Aspect Ratio) และอัตราการไหลพบว่า เมื่อเพิ่ม Aspect Ratio อัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีเปิดและปิดเครื่องปรับอากาศ เนื่องจากความเร็วในช่องอากาศขนาดต่าง ๆ มีความใกล้เคียงกัน แต่ด้วยปริมาตรช่องอากาศที่แตกต่างกันทำให้เกิดอัตราการไหลที่แตกต่างกัน

ซึ่งจากการศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง การสรุปเรื่องอัตราการไหลโดยอิทธิพลของ Aspect Ratio อย่างเดียวนั้นไม่ครอบคลุมผลที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพของระบบพบว่าที่ Aspect Ratio = 0.053 มีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งมีขนาดความสูง และความกว้างช่องอากาศที่เท่ากันสอดคล้องกับการทดลองของ Gan (1998)

นอกจากนี้ ประเด็นเรื่องการใช้ระบบระบายอากาศนี้ กับอาคารปรับอากาศยังคงไม่สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของผนังทอมน้ำ เนื่องจากเป็นการใช้การระบายอากาศแบบกลแล้ว การเพิ่มผนังทอมน้ำเข้าไปจะทำให้เกิดการพาอากาศที่เย็นแล้วออกจากห้อง ดังนั้นหากต้องการใช้ระบบปรับอากาศควบคู่กับผนังทอมน้ำควรแยกระบบออกจากกันให้ชัดเจน

(Gan, 1998) ได้ศึกษาระบบการระบายความร้อนโดยวิธีธรรมชาติ โดยใช้ผนังทอมน้ำด้วยการใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหลในการทำนายอัตราการไหลของอากาศ โดยศึกษาขนาดช่องว่างอากาศ ความสูงผนัง ชนิดของกระจก และฉนวนกันความร้อน ผลการศึกษาพบว่าโปรแกรมสามารถทำนายการเพิ่มของอุณหภูมิผนังและความร้อนที่เก็บสะสมได้ดีเทียบเท่ากับการทดลองจริง และพบว่าขนาดช่องว่างอากาศที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดการระบายอากาศที่ดี แต่ทั้งนี้มีความสัมพันธ์กับขนาดช่องอากาศเข้า-ออกด้วย คือ อัตราการระบายอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อช่องอากาศเข้า-ออกมีขนาดเล็กกว่าความกว้างช่องว่างอากาศ เมื่อความกว้างช่องอากาศเข้า-ออกมีขนาดเท่ากับความกว้างช่องอากาศจะเกิดการระบายอากาศที่ดีที่สุด และเมื่อขนาดช่องอากาศเข้า-ออกจะไม่มีผลต่ออัตราการระบายอากาศเมื่อมีขนาดมากกว่าความกว้างช่องอากาศ

จากการศึกษางานวิจัยที่ทำมาแล้วข้างต้นพบว่า การศึกษาและทดลอง ได้ศึกษาเฉพาะช่วงเวลากลางวัน ไม่ได้ศึกษาถึงการระบายอากาศในช่วงเวลากลางคืน ทั้ง ๆ ที่ความเป็นจริงของสภาพอากาศในประเทศไทย การระบายอากาศในเวลากลางคืนจะสามารถทำให้เกิดประโยชน์ต่อ

ด้านอุณหภูมิในอาคารได้ดีกว่าเวลากลางวัน และนอกจากนี้การเลือกใช้ผนังทอมน้ำแบบปรับปรุง ยังเป็นการช่วยส่งเสริมคุณสมบัติของวัสดุเปลือกอาคารพักอาศัยในเมืองไทย ที่ควรมีคุณสมบัติในการกักเก็บความร้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาความเป็นไปได้ระบบระบายอากาศ และการป้องกันความร้อนของผนัง ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน และศึกษาความเหมาะสมของการนำไปใช้จริงของระบบแบบต่าง ๆ ในช่วงฤดูต่าง ๆ ของเมืองไทย ร่วมกับการใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิอากาศใต้อาคารในการเพิ่มความแตกต่างของอุณหภูมิภายในช่องอากาศผนังทอมน้ำแบบปรับปรุง

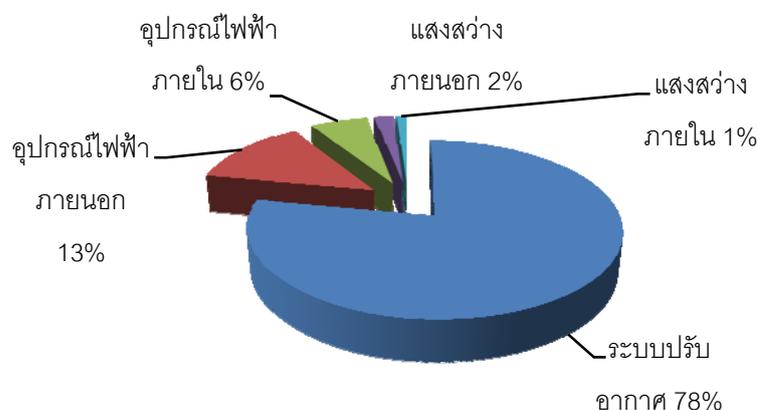
2.3 การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และการป้องกันความร้อนผ่านกรอบอาคาร

การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และการป้องกันความร้อนผ่านกรอบอาคาร สามารถเกิดขึ้นร่วมกันในรูปแบบของผนังทอมน้ำแบบปรับปรุง กล่าวคือ พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ผนังชั้นนอกได้รับ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศภายในช่องว่างอากาศผนังทอมน้ำแบบปรับปรุง ซึ่งการเคลื่อนที่ของอากาศนี้ทำให้เกิดการพาความร้อนแบบธรรมชาติภายในผนัง และเกิดการเหนี่ยวนำอากาศจากพื้นที่ใช้สอยภายในอาคารทำให้เกิดการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และการป้องกันความร้อนที่ดีขึ้นเนื่องจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ และการต้านทานความร้อนของวัสดุผนังที่ประกอบเป็นผนังทอมน้ำแบบปรับปรุง

2.3.1 การระบายอากาศ

ปัจจุบัน การระบายอากาศและการสร้างสภาวะน่าสบายในอาคารเกิดขึ้นด้วยระบบปรับอากาศที่มีสัดส่วนในการใช้พลังงานไฟฟ้าในอาคารพักอาศัยสูงถึง 78% ดังนั้น การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาตินับว่าเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดการใช้พลังงานในระบบปรับอากาศลงได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551) ดังภาพที่ 2.11

ภาพที่ 2.11
สัดส่วนการใช้พลังงานในภาคที่อยู่อาศัย



ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551 (ดัดแปลง)

ในพื้นที่ที่มีการใช้งาน การระบายอากาศนั้นจำเป็นในการระบายอากาศที่ปนเปื้อนออก และนำอากาศใหม่เข้าสู่ภายในพื้นที่ อากาศใหม่ประกอบด้วย ออกซิเจน 21% และคาร์บอนไดออกไซด์ 0.04% ในขณะที่อากาศปนเปื้อนที่อยู่ในพื้นที่ที่มีการใช้งานประกอบด้วยออกซิเจน 16% และคาร์บอนไดออกไซด์ 4% คนต้องการอากาศที่มีออกซิเจนเพียงพอมิเช่นนั้นจะส่งผลเสียต่อสุขภาพและชีวิต นอกจากนี้ การระบายอากาศยังเป็นการสร้างสภาวะน่าสบายให้กับคนได้ด้วยการถ่ายเทความร้อนออกจากอาคาร (McMullan, 2002, p. 69) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (natural ventilation)
- 2) การระบายอากาศโดยวิธีกล (mechanical ventilation)

โดยงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาเรื่องการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

(1) Air Pressure Difference การระบายอากาศที่เกิดจากแรงดันอากาศที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอากาศโดยรอบอาคาร

(2) Stack effect การระบายอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) ของอากาศร้อนที่ลอยตัวสูงขึ้นในอาคาร

ในการศึกษาผนังทอมป์แบบปรับปรุงเพื่อการระบายอากาศนี้ เป็นการระบายอากาศที่เกิดจากการพาความร้อนแบบธรรมชาติมีทฤษฎีดังที่กล่าวแล้วในข้อ 2.2.4

2.3.2 การป้องกันความร้อนผ่านกรอบอาคาร

ความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารประกอบด้วย ความร้อนผ่านกรอบอาคาร ความร้อนจากระบบแสงสว่าง ความร้อนที่เกิดจากการใช้งานของคน และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ในอาคาร และความร้อนที่เกิดจากการรั่วของอากาศภายนอกเข้าสู่อาคาร ซึ่งแหล่งความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และการใช้พลังงานไฟฟ้าด้านการปรับอากาศที่สูงที่สุดคือ ความร้อนที่ผ่านกรอบอาคาร

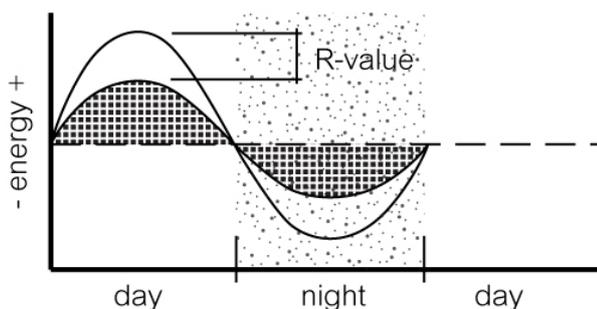
กรอบอาคารที่เป็นผนังทึบ ความร้อนที่ผ่านเข้าสู่อาคารนั้นเกิดจากการนำความร้อน (heat conduction) ของวัสดุ ซึ่งปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าสู่อาคารจะมาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (coefficient of heat transmission, U-value) ดังนั้นการป้องกันความร้อนผ่านกรอบอาคารสามารถเกิดขึ้นได้ด้วยการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนของวัสดุ

นอกจากนี้ ในการศึกษาวัสดุผนังเพื่อนำมาใช้ในผนังทออมบี้แบบปรับปรุงในภูมิอากาศเขตร้อนชื้น รูปแบบของระบบที่ควรพิจารณา และสามารถเกิดขึ้นได้มีดังนี้

1) ในช่วงเวลากลางวัน ผนังทออมบี้แบบปรับปรุงนี้ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนด้วยคุณสมบัติการต้านทานความร้อนของวัสดุ ดังภาพที่ 2.12 และการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในผนัง หรือในวันที่อุณหภูมิอากาศภายนอกต่ำพอก็สามารถทำให้เกิดการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติได้

ภาพที่ 2.12

อิทธิพลความเป็นฉนวนของวัสดุต่อการลดการเปลี่ยนแปลง
สูงสุด-ต่ำสุดของอุณหภูมิภายใน

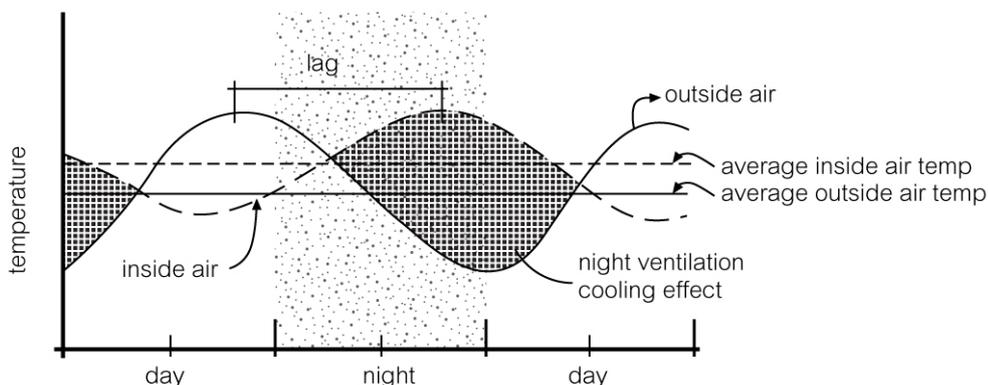


ที่มา: Moore, 1993, p. 210 (ดัดแปลง)

2) ในช่วงเวลากลางคืนที่อุณหภูมิอากาศภายนอกลดต่ำลงแล้วผนังทออมป์แบบปรับปรุงนี้จะสามารถก่อให้เกิดการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติได้ด้วยคุณสมบัติในการกักเก็บและหน่วงความร้อนของวัสดุ หรือเรียกว่าการระบายอากาศในเวลากลางคืน (nocturnal ventilation) เพื่อเป็นการพาความร้อนที่สะสมในอาคารออก และลดอุณหภูมิผนัง เพื่อทำให้อุณหภูมิภายในอาคารต่ำในช่วงเวลากลางวันของวันถัดไป (Moore, 1993, p. 210) ดังภาพที่ 2.13

ภาพที่ 2.13

อิทธิพลวัสดุมวลสาร และการระบายอากาศเวลากลางคืน



ที่มา: Moore, 1993, p. 210 (ดัดแปลง)

3) พิจารณาอาคารที่มีการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติควบคู่กับช่วงเวลาการใช้งานในด้านวัสดุมวลสารของระบบผนัง คือ การใช้งานอาคารในเวลากลางวันต้องการวัสดุมวลสารมาก การใช้งานอาคารในเวลากลางคืนต้องการวัสดุมวลสารน้อย และการใช้งานในทั้งสองช่วงเวลาของอาคารระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และอาคารปรับอากาศต้องการวัสดุมวลสารน้อย โดยที่ระบบผนังนี้จะต้องคำนึงถึงการก่อให้เกิดการเคลื่อนที่เนื่องจากการพาความร้อนของผนังทออมป์ และสามารถพิจารณาได้จากค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ ดังนี้

- (1) Thermal Conductivity (k) ค่าการถ่ายเทความร้อนจำเพาะ หน่วย $W/m \cdot ^\circ C$
- (2) Density (ρ) ความหนาแน่น หน่วย kg/m^3
- (3) Specific Heat (c) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ หน่วย $W \cdot hr/kg \cdot ^\circ C$
- (4) Thermal diffusivity (α) $\alpha = k / \rho \cdot c$ หน่วย m^2/hr

- (5) Thermal Resistance (R-value) ค่าการต้านทานความร้อน $R = x/k$
($m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$) ; $x = \text{thickness}$
- (6) Coefficient of Heat Transmission (U-value) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท
ความร้อน $U=1/R$ ($W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)
- (7) Time Lag ค่าเวลาการหน่วงเหนี่ยวความร้อนจำเพาะ หน่วย ชั่วโมง(hour)
- (8) Absorptivity (a) ค่าการดูดซับความร้อนของผิววัสดุ
- (9) Emissivity (E) ค่าการแผ่รังสีของผิววัสดุ

จากการพิจารณาข้างต้น ทำให้ระบบผนังทอรั่มแบบปรับปรุงที่ควรเกิดขึ้นเป็นการทำงานร่วมกันของความเป็นฉนวนของผนังวัสดุมวลสาร (thermal mass) การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และการระบายอากาศเวลากลางคืน ร่วมกับแนวความคิดในการใช้ประโยชน์จากอุณหภูมิอากาศใต้อาคาร โดยผลที่เกิดขึ้นคาดหวังว่าระบบจะสามารถทำให้เกิดการลดการเปลี่ยนแปลงสูงสุด และต่ำสุดของอุณหภูมิภายในผนังโดยที่ยังก่อให้เกิดการระบายอากาศทั้งกลางวัน-กลางคืน และลดอุณหภูมิผิวผนังภายในอาคารได้