

การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการระบายอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

Research and Development on Solar-Induced Ventilation

ดร. สุดาภรณ์ จุ่งลู้

Sudaporn Chungloo, Ph.D.

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University

E-mail: chungloo@tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงพัฒนาการด้านเทคโนโลยีแบบพาสซีฟ (passive technology) เกี่ยวกับการระบายอากาศ โดยวิธีธรรมชาติเฉพาะกรณีอาศัยการลอยตัว (buoyancy effect) เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศ และอากาศมีความเร็วต่ำ การวิจัยและพัฒนาสามารถแบ่งออกเป็นการวิจัยด้านผนังทอมบ์ซึ่งไม่เป็นที่นิยมในประเทศไทย และการวิจัยด้านปล่องรังสีดวงอาทิตย์ที่มีการวิจัยอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาด้านรูปลักษณะและวัสดุที่ใช้ในการสร้างเทคโนโลยีนี้ไม่แตกต่างไปจากเดิมมากนักในช่วงประมาณ 15 ปีที่ผ่านมา การพัฒนาและวิจัยมุ่งเน้นการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ และศึกษาด้านอุณหภูมิอากาศเกี่ยวกับ stack effect โดยการทดลองในห้องที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดห้องจริงกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในปัจจุบันอัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์มีค่าน้อย โดยมีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (air change rate, ACH) ประมาณ 3 ACH ในระบบเดิมและ 10-15 ACH ในระบบที่ปรับปรุงแล้ว ค่าอุณหภูมิภายในห้องที่ติดกับปล่องรังสีดวงอาทิตย์ยังคงมีค่าสูงเกินขอบเขตสภาวะสบาย การวิจัยในช่วงหลังจึงมีการปรับใช้ระบบปล่องรังสีดวงอาทิตย์ร่วมกับระบบลดหรือเพิ่มความร้อนเพื่อให้เข้าสู่สภาวะน่าสบายด้านอุณหภูมิมากยิ่งขึ้น

Abstract

This article shows the research and development on passive technology of natural ventilation, especially those relate to the buoyancy effect, the temperature difference and the low air velocity. The research in this field can be classified as the Trombe wall and the solar chimney. The Trombe wall is less popular than the solar chimney, which has been researched continuously. For 15 years, it is found no major difference in appearance and the material used in constructing this technology. The research and development focus on increasing of air ventilation rate and the study of air temperature concerning the stack effect. Usually, the full scale model of experimental room were built and used with the analytical model. Presently, the ventilation around 3 air-change rate and 10 to 15 air-change rate are found for the model with original components and for the model with modified components, respectively. The air temperature in the room is too high to reach the comfort. Therefore, recent researches aim at approaching thermal comfort by integrating of solar chimney with other systems that can increase or decrease the heat energy.

คำสำคัญ (Keywords)

การระบายอากาศวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation)

ปล่องรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Chimney)

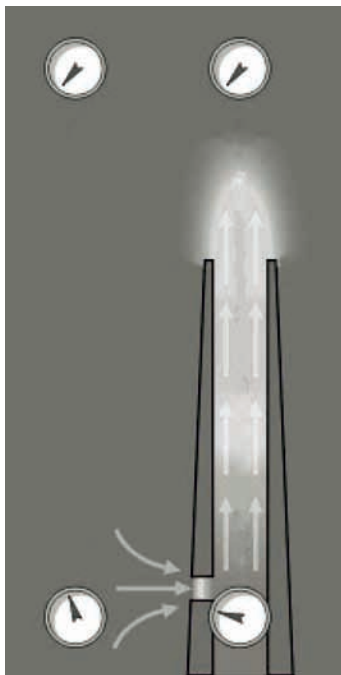
ผนังทროมบี (Trombe Wall)

ระบบพาสซีฟ (Passive System)

สภาวะสบายด้านอุณหภูมิ (Thermal Comfort)

1. กลไกการเกิดการระบายอากาศด้วย การลอยตัวของอากาศร้อน

การลอยตัวของอากาศเกิดจากอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ความดันอากาศที่แตกต่างกันเนื่องมาจากความหนาแน่นที่ต่างกันนี้ ส่งผลให้อากาศที่ร้อนเคลื่อนที่ขึ้นและมีการแทนที่ด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ในกรณีนี้บางส่วนของอาคารรับความร้อนจากภายนอกมาก ๆ เช่น ห้องใต้หลังคา ห้องกระจก ปล่อยควัน อากาศภายในห้องหรือปล่อยนั้นจะมีอุณหภูมิสูง และการเปิดช่องเปิดที่เหมาะสมจะทำให้อากาศร้อนไหลออกจากห้องและมีอากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่าเข้ามาแทนที่ในห้องได้ นอกจากนี้ยังมีการไหลของอากาศย้อนกลับในกรณีที่อากาศภายในห้องหรือภายในปล่องมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศแวดล้อม เช่น ในเวลากลางคืน ในกรณีนี้อากาศแวดล้อมจะไหลเข้ามาในห้อง การระบายอากาศด้วยการลอยตัวของอากาศร้อนเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ stack effect ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเกิด stack effect ในปล่องรังสีดวงอาทิตย์: หน้าปิดที่มีเข็มชี้แสดงความดันอากาศ และลูกศรสีเทาในปล่องแสดงทิศการไหลของอากาศ การหมุนของเข็มบนหน้าปิดในทิศตามเข็มนาฬิกาหมายถึงความดันที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าอากาศร้อนในปล่องมีความดันอยู่ระหว่างความดันของอากาศแวดล้อมและความดันอากาศที่ตำแหน่งสูงมีค่าน้อยกว่าที่ตำแหน่งต่ำ อากาศแวดล้อมจึงไหลเข้าสู่ปล่อง

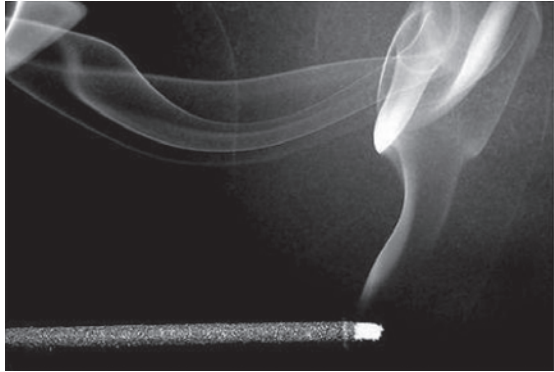
การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติเฉพาะที่อาศัยการลอยตัว (buoyancy effect) เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศที่ไม่รวมถึงการระบายอากาศที่อาศัยลมตามธรรมชาติมีลักษณะค่อยเป็นค่อยไป ดังนั้นความเร็วของอากาศในจุดที่มีการไหลของอากาศจะมีค่าไม่เกิน 1 เมตรต่อวินาที และมีความเป็นไปได้น้อยที่จะเกิดการระบายอากาศที่เพียงพอต่อสภาวะสบาย (thermal comfort) อย่างไรก็ตาม สภาวะอับลมหรือมีลมผ่านเข้าในพื้นที่น้อยก็พบได้บ่อยในอาคารที่มีผนังทึบ โรงงาน โรงเลี้ยงสัตว์ โรงเก็บของ หรืออาคารที่อยู่อาศัยในเขตประชากรหนาแน่นและการปิดประตูหน้าต่าง

2. ทฤษฎีการระบายอากาศแบบอาศัย การลอยตัวของอากาศร้อน

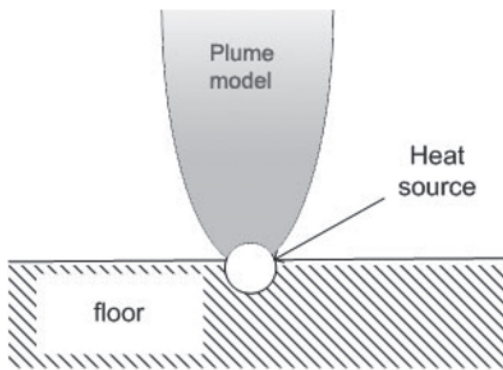
ทฤษฎีเกี่ยวกับการระบายอากาศแบบอาศัยการลอยตัวของอากาศร้อน อาจแบ่งได้สองกรณีตามแหล่งกำเนิดความร้อน ได้แก่ แหล่งกำเนิดความร้อนจากภายใน และแหล่งกำเนิดความร้อนจากภายนอก การผสมระหว่างผลจากแหล่งความร้อนภายในและภายนอกมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก จึงพบว่ามี การแยกการวิจัยออกจากกัน และใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างต่างกัน ในบทความนี้จะเน้นอภิปราย พัฒนาการและผลการศึกษาในกรณีหลัง คือ เมื่อมีแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ภายนอก

กรณีแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ภายในห้อง เช่น คน เครื่องถ่ายเอกสาร เครื่องคอมพิวเตอร์ หลอดไฟ เครื่องจักร สัตว์เลี้ยงในฟาร์ม ความร้อนจากพื้นห้องที่โดนแดดและคายออกมาในเวลาที่เหมาะสม เป็นต้น การวิเคราะห์รายละเอียดเรื่องการลอยตัวของของไหลจะวิเคราะห์ตามทฤษฎีที่ยอมรับในวงการวิชาการ เช่น ทฤษฎีทางด้าน plume (Csanady, 1973) ของการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent) ซึ่งนำมาใช้อธิบายปรากฏการณ์ พยากรณ์ และประยุกต์ใช้เมื่อแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่บนพื้นและมีการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนหรืออากาศเย็นขึ้นขึ้นไปตรง ๆ ในอากาศแวดล้อม

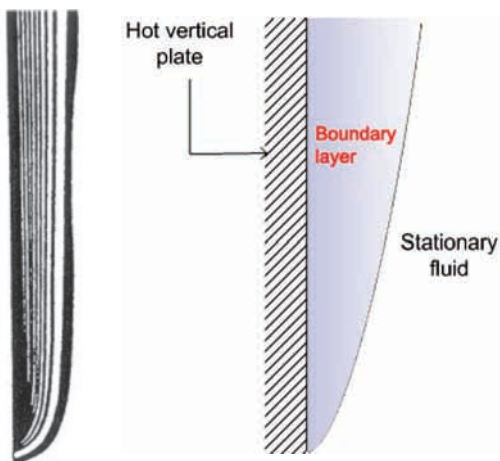
(ambient air) ที่มีอุณหภูมิต่างกัน ในปัจจุบันทฤษฎีเกี่ยวกับ plume นำมาใช้สำหรับการระบายอากาศด้วยแรงลอยตัวโดยมีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้อง (Chenvidyakarn, 2005) และมีการใช้อย่างกว้างขวางในวงการการปรับอากาศแบบพ่นจากพื้น (รูปที่ 2ก และ 2ข)



(ก)



(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 2 ก) ตัวอย่างการไหลแบบ plume ข) การจำลองการไหลแบบ plume ค) การไหลเนื่องจากการพาความร้อนแนวตั้ง ง) การจำลองการไหลเนื่องจากการพา

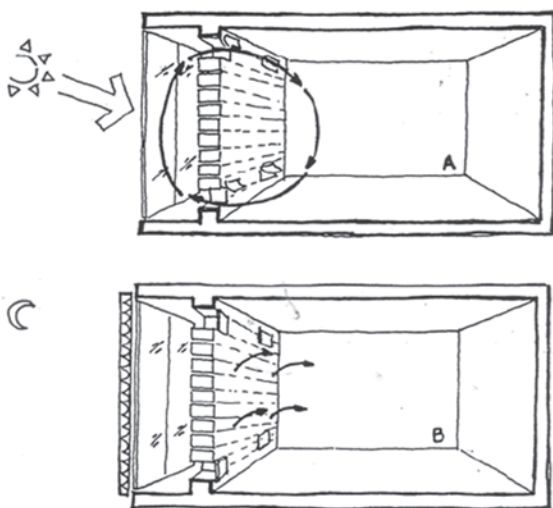
กรณีแหล่งกำเนิดความร้อนอยู่ภายนอกห้อง เช่น พลังงานจากดวงอาทิตย์ที่มากกระทบผนังที่บิแนวตั้ง และหลังคาที่บิที่มีมุมเอียงตั้งแต่ 0-60 องศา กับแนวระนาบ ก่อให้เกิดแหล่งความร้อนเข้าสู่อาคารในแนวตั้งแนวนอน และแนวเอียง ซึ่งเป็นกรณีที่อธิบายในบทความนี้ กรณีแหล่งความร้อนภายนอกประกอบด้วยการวิเคราะห์ พยากรณ์ และประยุกต์ใช้ทฤษฎีการพาความร้อนแบบอิสระและแบบบังคับ (free and forced convection) ระหว่างอากาศกับแผ่นระนาบกับแผ่นเอียงแผ่นตั้งฉาก และในช่องแคบ ๆ โดยเน้นการถ่ายเทความร้อนและผลของสิ่งแวดล้อมต่อการระบายอากาศ

ทั้งทฤษฎีเรื่อง plume และทฤษฎีเรื่องการพาความร้อนมีสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องแบบเฉพาะของตนเองเรียกว่า analytical model เช่น model การคำนวณค่าความแตกต่างอุณหภูมิ และการคำนวณค่าอัตราการระบายอากาศของ Fitzgerald and Woods (2008) สำหรับการระบายอากาศที่มีช่องเปิดสองช่อง มีการเรียงของชั้นอากาศร้อนในห้องและมีแหล่งกำเนิดความร้อนภายในห้อง ส่วนทฤษฎีด้านการพาความร้อนอิสระในช่องอากาศแคบ ๆ ที่เอียงระหว่าง 0-45° สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U-value) และอัตราการระบายอากาศได้โดยผ่านเลขนัสเซล (Nusselt number) โดยทั่วไป analytical model จะใช้ควบคู่กับการทดลอง ในปัจจุบันสมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนมากกว่า analytical model สามารถนำมาสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์บางโปรแกรม เช่น โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics, CFD) โปรแกรมคำนวณตามระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ในของไหล (finite element method) เป็นต้น เพื่อช่วยการคำนวณและการแสดงผล อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ยังต้องมีการสอบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลองเสมอ เนื่องจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น โปรแกรม CFD จะ “ประมาณคำตอบ” ของสมการของ Navier-Stokes ออกมาเป็นเวกเตอร์การไหล ซึ่งสมการ Navier-Stokes นี้เป็นหนึ่งในหกสมการที่ยังไม่มีผู้ใดหาคำตอบทางคณิตศาสตร์ได้ และรางวัลมูลค่าหนึ่งล้านเหรียญสหรัฐ (millennium prize problems) สำหรับคำตอบของสมการเหล่านี้ก็ยังไม่ผู้ใดพิชิตได้ในปัจจุบัน

3. เทคโนโลยีด้านการระบายอากาศด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

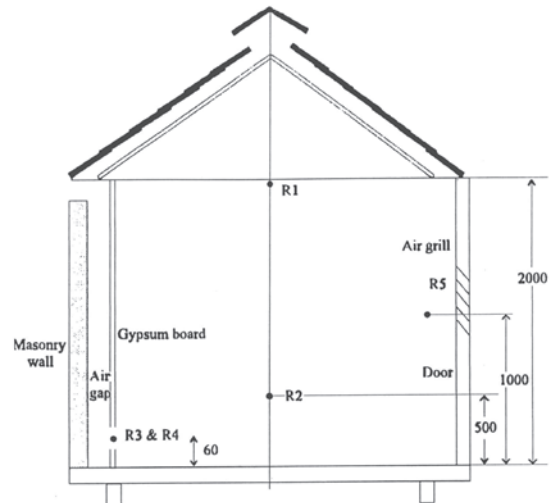
3.1 การพัฒนาผนังทอมบ์และผนังทอมบ์แบบปรับปรุง

ผนังทอมบ์ คือ ผนังที่มีการสะสมความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ กักเก็บความร้อนและส่งผ่านความร้อนสู่พื้นที่ภายในอาคาร (Givoni, 1998) ผนังทอมบ์ประกอบด้วยกระจก ช่องว่างอากาศ และผนังมวลสาร เช่น ผนังคอนกรีต หรือผนังก่อ หลักการทำงานของผนังทอมบ์ คือ รังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นกระจกจะถูกดูดซับด้วยผนังมวลสาร ทำให้อุณหภูมิที่ผิวผนังและอากาศในช่องว่างอากาศเพิ่มสูงขึ้น ความร้อนส่วนที่ผนังดูดซับไว้จะถ่ายเทสู่พื้นที่ภายในด้วยคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุ (thermal conductivity) และการนำความร้อนของวัสดุมวลสารมาก พื้นที่ภายในจะร้อนขึ้นด้วยการแผ่รังสีความร้อน (long-wave radiation) และการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (natural convection) และความร้อนอีกส่วนหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างอากาศจะทำให้อากาศลอยตัวสูงขึ้นแล้วไหลเข้าสู่พื้นที่ภายในผ่านช่องเปิดด้านบน และอากาศในห้องที่เย็นกว่าจะผ่านช่องเปิดด้านล่างเข้าสู่ช่องว่างอากาศระหว่างกระจกและผนังมวลสารเพื่อทำให้อากาศร้อนขึ้นทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศในอาคาร ประเทศที่มีอากาศหนาวจะใช้ระบบนี้เพื่อสร้างความอบอุ่นให้กับพื้นที่ใช้สอย ดังรูปที่ 3

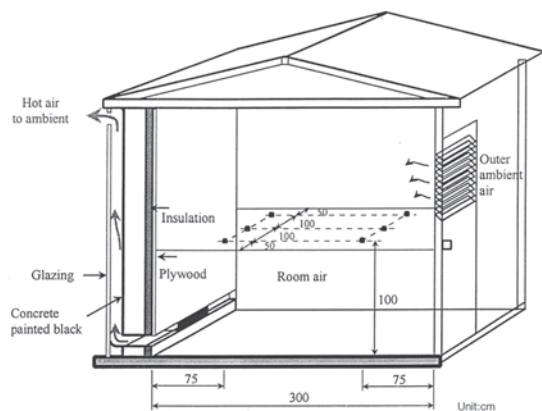


รูปที่ 3 ระบบการทำงานของผนังทอมบ์ (Givoni, 1998)

อย่างไรก็ตามประเทศที่อยู่ในเขตร้อนที่มีอุณหภูมิอากาศภายนอกที่สูง ระบบนี้จะเป็นการนำความร้อนเข้าสู่พื้นที่ใช้สอย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแผ่รังสีความร้อนเข้าสู่พื้นที่ใช้สอยในเวลากลางวัน หากผนังมวลสารไม่หนามากพอ และในเวลากลางคืนที่ความร้อนสะสมแผ่ออกมาสู่พื้นที่ สร้างความไม่สบายในพื้นที่ใช้สอย จึงเป็นที่มาของผนังทอมบ์แบบปรับปรุง ผนังทอมบ์แบบปรับปรุงที่พบในการวิจัยในประเทศไทยได้แก่งานวิจัยของ Joseph Khedari et al. (1998, 1999) และ Maniporn Pichaisak and Sudaporn Chungloo (2009) การเปรียบเทียบผนังทอมบ์และผลการทดลองด้านอัตราการระบายอากาศและอุณหภูมิภายในห้อง ในการทดลองทั้งสามครั้งแสดงในตารางที่ 1 รูปที่ 4 และ 5 การทดลองทั้งสามทดลองในช่วงเวลาที่ต่างกัน

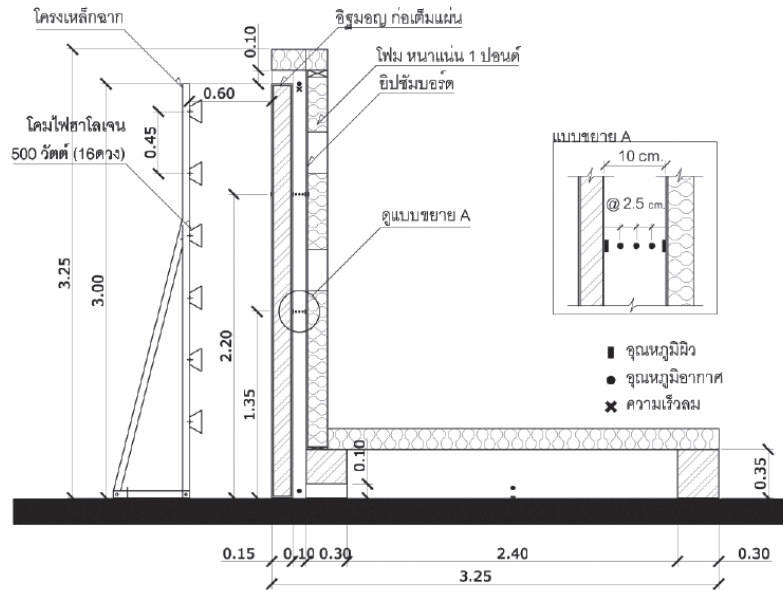


(ก) ผนังทอมบ์แบบปรับปรุง



(ข) ผนังทอมบ์

รูปที่ 4 ห้องทดลองผนังทอมบ์แบบดั้งเดิมและแบบปรับปรุงของ Joseph Khedari et al. (1998, 1999)



รูปที่ 5 การทดลองผนังทროมบีแบบปรับปรุงของ Maniporn Pichaisak and Sudaporn Chungloo (2009)

ตารางที่ 1 ลักษณะของผนังทროมบีและผลการทดลอง (ค่าสูงสุด) ในงานวิจัยของ Khedari et al. (1998, 1999) และงานวิจัยของ Maniporn Pichaisak and Sudaporn Chungloo (2009)

ชั้นวัสดุเรียงจากด้านนอกไปด้านใน	ความหนา (m)	ขนาดพื้นที่ผิวผนังทროมบี (m ²)	พื้นที่ช่องเปิด (m ²)	อัตราการระบายอากาศ (ค่าสูงสุด) (m ³ /s)	อุณหภูมิห้อง-อุณหภูมิอากาศ (°C)
ผนังทროมบีแบบปรับปรุงโดย Khedari et al. (1998)					
อิฐก่อทาสีด้านนอก	0.07	2.0	0.0125	0.02	3
ช่องอากาศ	0.14				
แผ่นยิปซัม	0.09				
รวม	0.30				
ผนังทროมบีแบบดั้งเดิมโดย Khedari et al. (1999)					
กระจกใส	0.005	2.0	0.0125	0.014	3
ช่องอากาศ	0.14				
อิฐก่อทาสีด้านนอก	0.08				
ฉนวนใยแก้ว	0.025				
แผ่นไม้อัด	0.004				
รวม	0.26				
ผนังทროมบีแบบปรับปรุงโดย Maniporn Pichaisak and Sudaporn Chungloo (2009)					
อิฐก่อฉาบปูน 1 ด้าน	0.15	3.1	0.010	0.006-0.008	N/A
ช่องอากาศ	0.10				
แผ่นยิปซัม	0.09				
โฟม	0.15				
รวม	0.49				

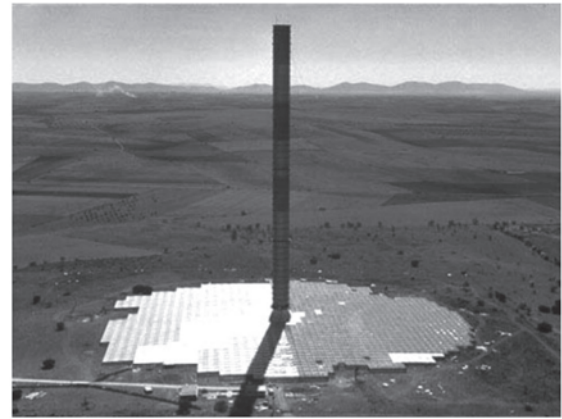
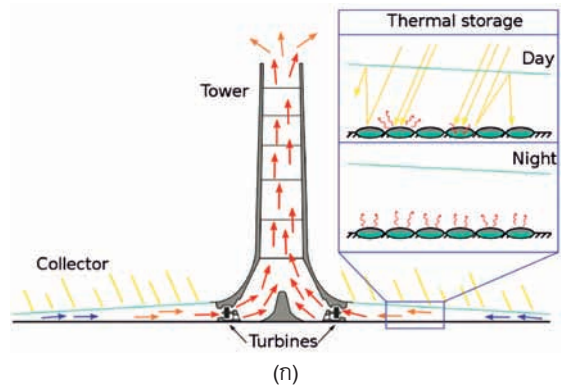
3.2 การพัฒนาปล่องรังสีอาทิตย์และเทคโนโลยีการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

ปล่องรังสีดวงอาทิตย์ (solar chimney) มีลักษณะและจุดประสงค์การใช้งานใกล้เคียงกับผนังทროมบี แต่คำว่า ปล่องรังสีดวงอาทิตย์ มีความหมายกว้างกว่าคำว่าผนังทროมบี เนื่องจากปล่องรังสีดวงอาทิตย์หมายถึงรวมถึงช่องอากาศรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ทั้งแบบติดตั้งกับผนัง หลังคา และแบบตั้งเดี่ยว ๆ ไม่ติดกับอาคาร และปล่องรังสีดวงอาทิตย์นี้ก็ได้จำกัดรูปแบบว่าผนังของปล่องจะมีมวลสารมากหรือน้อย ในปัจจุบันปล่องรังสีดวงอาทิตย์ที่ติดตั้งเดี่ยวขนาดใหญ่อยู่ในขั้นทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้า (Schlaich et al., 2005) หลักการของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยปล่องรังสีดวงอาทิตย์ใช้หลักการเดียวกับปล่องรังสีดวงอาทิตย์ที่ติดกับอาคาร คือใช้การเคลื่อนที่ของอากาศไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า (รูปที่ 6) ในบทความนี้จะไม่กล่าวถึงปล่องรังสีดวงอาทิตย์แบบที่ผลิตกระแสไฟฟ้า แต่จะกล่าวถึงเฉพาะแบบที่ติดตั้งกับอาคารเท่านั้น

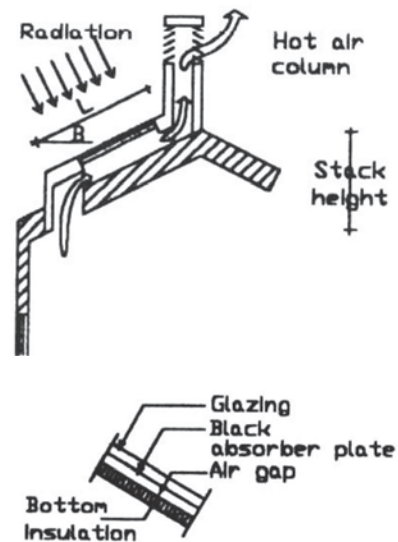
งานวิจัยด้านการระบายอากาศสำหรับอาคารด้วยปล่องรังสีดวงอาทิตย์โดย Bansal et al. (1994) ในรูปที่ 7 แสดงรูปแบบดั้งเดิมของปล่องรังสีดวงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคาของอาคาร และได้เสนอ analytical model ที่เป็นที่ยอมรับมากที่สุดแบบหนึ่งในงานวิจัยช่วงหลัง นั่นคือ

$$Q = KA \sqrt{\frac{2gh \sin \beta \left(\frac{\Delta T_f}{T_a} \right)}{(1 + A_r^2)}} \quad (1)$$

โดยที่ Q คืออัตราการระบายอากาศ (m^3/s), K คือค่าสัมประสิทธิ์การไหลของปล่อง, A คือพื้นที่หน้าตัดของปล่อง (m^2), g คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ $9.8 m/s^2$, h คือความสูงของปล่อง (m), β คือมุมเอียงของปล่อง, ΔT_f คือความต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออกจากปล่อง ($^{\circ}C$), T_a คืออุณหภูมิอากาศ ($^{\circ}C$) และ A_r คืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ช่องเปิดทางเข้าและทางออก ในปี 1998 Hamdy and Fikry (1998) เสนอเพิ่มเติมจาก analytical model ของ Bansal et al. (1994) ว่าอัตราการระบายอากาศ



รูปที่ 6 ก) หลักการการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยปล่องรังสีดวงอาทิตย์เรียกว่า solar updraft ข) prototype หอคอยผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 50 kW ในประเทศสเปน (Jürg Schlaich et al., 2005)

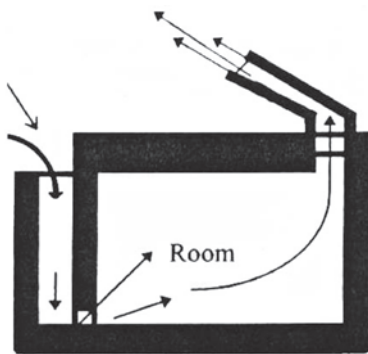


รูปที่ 7 ปล่องรังสีดวงอาทิตย์ของ Bansal et al. (1994)

(Q) ที่มากที่สุดตามแบบจำลองของ Bansal ขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Heat Gain Factor, SHGF) และความสูงของปล่องดังนี้

$$Q \propto \sin \beta \cdot \sqrt{SHGF}$$

โดยที่ β คือมุมเอียงของปล่อง และพบว่ามุมที่เหมาะสมคือ 60° งานวิจัยที่แสดงการพัฒนาผสมผสานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการระบายอากาศของปล่องรังสีดวงอาทิตย์ เช่น Aboulnaga (1998) ผสมระหว่างปล่องรังสีดวงอาทิตย์กับช่องพักอากาศ ดังรูปที่ 8 โดยช่องพักอากาศมีหน้าที่ทำให้อากาศเย็นก่อนที่เข้าสู่อาคาร



รูปที่ 8 ปล่องรังสีดวงอาทิตย์ของ Aboulnaga (1998)

งานวิจัยด้านปล่องรังสีอาทิตย์ติดตั้งบนหลังคาในประเทศไทยมีมากกว่าผนังทროมบี้ซึ่งอาจเป็นเพราะหลังคาเป็นพื้นที่ที่ไม่ได้ใช้งานและได้รับรังสีดวงอาทิตย์มากกว่าผนัง จึงมีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้การติดตั้งปล่องรังสีดวงอาทิตย์แบบเอียงไปกับโครงสร้างหลังคา สามารถทำได้โดยการปิดด้านล่างของจันทันด้วยไม้หรือแผ่นยิปซัม และด้านบนของจันทันมุงด้วยกระเบื้องหลังคา ทำให้เกิดช่องอากาศเอียงและมีความหนาเท่ากับไม้จันทันคือ $0.14 - 0.16$ m การศึกษาวิจัยด้านนี้ ได้แก่ การทดสอบกลางแจ้งและมีการปรับเปลี่ยนเพื่อศึกษาตัวแปร ดังนั้นจึงมีการเก็บข้อมูลในช่วงเวลาต่างกัน การเปรียบเทียบอัตราการระบายอากาศเมื่อตัวแปรต่างกัน และในช่วงเวลาทดสอบที่ต่างกัน อาจจะไม่ได้อ้างอิงความรู้ใหม่มากนัก อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนตัวแปรได้พยายามเพิ่มอัตราการระบายอากาศ โดยการเพิ่มพื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์ เพิ่มความแตกต่างอุณหภูมิอากาศระหว่างทางเข้า ทางออก และอากาศ

แวดล้อม รวมทั้งปรับมุมเอียงของปล่องรังสีดวงอาทิตย์ด้วย

4. อภิปรายผลการศึกษา

4.1 การวิจัยผนังทროมบี้ในประเทศไทย

ตารางที่ 1 แสดงว่าผนังทროมบี้มีลักษณะใกล้เคียงกัน และมีผลการทดลองด้านการระบายอากาศแตกต่างกันเล็กน้อย โดยที่การทดลองผนังทროมบี้แบบปรับปรุงซึ่งทดลองในฤดูร้อน จะมีอัตราการระบายอากาศที่มากกว่าผนังทროมบี้แบบดั้งเดิมซึ่งทดลองในฤดูหนาวอยู่ 30% การคำนวณปริมาตรอากาศที่ผ่านช่องเปิดในหนึ่งชั่วโมงได้ $(0.02 \text{ m}^3/\text{s}) \times (3,600 \text{ s/hr}) = 72 \text{ m}^3/\text{hr}$ และด้วยปริมาตรห้องเท่ากับ 19 m^3 ดังนั้นอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเท่ากับ $(72 \text{ m}^3/\text{hr}) / 19 \text{ m}^3 = 3.8$ หรือ 3.8 ACH (air change per hour) ซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการอยู่อาศัยซึ่งกฎหมายกำหนดค่า ACH สำหรับคนหนึ่งคนเท่ากับ 7 อัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่ผิวเท่ากับ $0.01 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ และ $0.007 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ สำหรับผนังทროมบี้แบบปรับปรุงและผนังทროมบี้แบบดั้งเดิมตามลำดับ

ผนังทროมบี้ในประเทศไทยไม่เป็นที่แพร่หลายนัก ซึ่งอาจจะเป็นเพราะดวงอาทิตย์ในประเทศไทยส่วนมากจะอยู่ในมุมสูง ทำให้ผนังทროมบี้ไม่เป็นที่นิยม ประกอบกับการใช้สีดำทาที่ผนังซึ่งไม่สวยงาม จึงไม่มีการนำไปประยุกต์ใช้จริง การทดลองผนังทროมบี้แบบปรับปรุง (Pichaisak & Chungloo, 2009) ซึ่งประกอบด้วยผนังอิฐสองชั้นฉาบปูนไม่ทาสี ช่องว่างอากาศขนาดเล็ก แผ่นยิปซัม และฉนวนโฟม โดยที่ช่องเปิดทางเข้าของช่องอากาศในผนังทროมบี้ต่อกับช่องว่างอากาศแนวระนาบที่มีอากาศอุณหภูมิต่ำ ดังรูปที่ 5 การทดลองนี้เน้นการป้องกันความร้อนเข้าสู่อาคารโดยใช้คุณสมบัติของผนังทროมบี้แบบปรับปรุง และไม่มีเปรียบเทียบอุณหภูมิอากาศในห้องกับอุณหภูมิอากาศแวดล้อม จากตารางที่ 1 ซึ่งสรุปประสิทธิภาพการระบายอากาศของ Pichaisak and Chungloo (2009) พบว่ามีอัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่ผิวเท่ากับ $0.0026 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ ซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้ประกอบด้วยผนังที่หนามาก จึงมีการหน่วงความร้อนได้มากและป้องกันความร้อนในเวลากลางวันได้เป็นอย่างดี

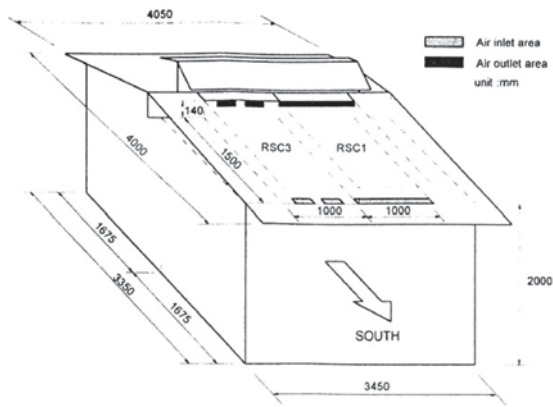
4.2 การวิจัยปล่องรังสีดวงอาทิตย์ในประเทศไทย

ผลสรุปและตัวแปรในการศึกษาของ Joseph Khedari et al. (1997, 2000a, 2000b) และการศึกษาของ Sudaporn Chungloo and Bundit Limmeechokchai (2007) แสดงในตารางที่ 2 รูปภาพห้องทดสอบกลางแจ้งของ Khedari et al. (2000a), Khedari et al. (2000b) และ Chungloo and Limmeechokchai (2007) เป็นดังรูปที่ 9, 10 และ 11 ตามลำดับ จากตารางที่ 2 จะพบว่าการใช้งานปล่องรังสีอาทิตย์แบบมุมเอียง

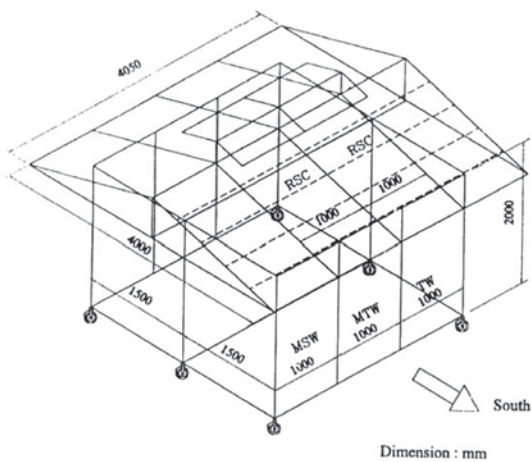
ระหว่าง 25-30° กับระนาบ จะมีอัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์ระหว่าง 0.016-0.018 m³/s·m² การใช้งานปล่องรังสีดวงอาทิตย์ร่วมกับผนังทროมบี้ มีอัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่รับรังสีเท่ากับ (0.125 m³/s) / (9 m²) = 0.14 m³/s·m² จะเห็นได้ว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวรับรังสีอาทิตย์ทำให้อัตราการระบายมากขึ้น แต่อัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่รับรังสีน้อยลง การใช้งานปล่องรังสีอาทิตย์มุมเอียง 45° มีอัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่รับรังสีเท่ากับ (0.038 m³/s) / (1.79 m²)

ตารางที่ 2 ลักษณะของปล่องรังสีดวงอาทิตย์และผลการทดลองจากงานวิจัยของ Khedari et al. (1997, 2000a, 2000b) และงานวิจัยของ Sudaporn Chungloo and Bundit Limmeechokchai (2007)

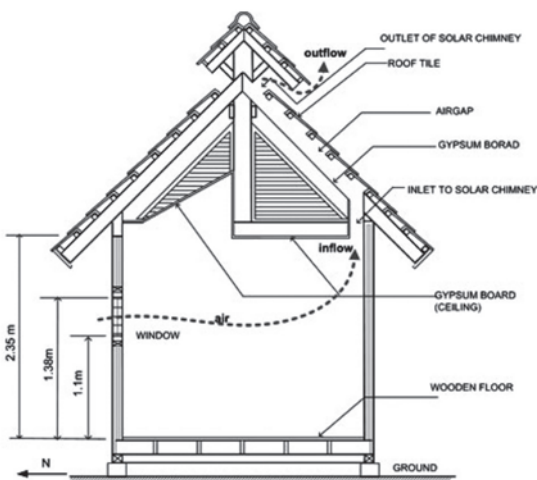
ชั้นวัสดุเรียงจาก ด้านบนไปด้านล่าง	ความหนา (m)	ขนาดพื้นที่ผิว ปล่องรังสีดวง อาทิตย์ (m ²)	พื้นที่ช่องเปิด (m ²)	มุมเอียง (องศา)	อัตราการระบาย อากาศ (ค่าสูงสุด) (m ³ /s)
Joseph Khedari et al. (1997)					
กระเบื้อง CPAC	0.015	2.0	0.14 x 1	30	0.032
ช่องอากาศ	0.14				
แผ่นยิปซัม	0.09				
รวม	0.25				
Joseph Khedari et al. (2000a)					
กระเบื้อง CPAC	0.015	1.5	0.14 x 1	25	0.027
ช่องอากาศ	0.14				
แผ่นยิปซัม	0.09				
Joseph Khedari et al. (2000b)					
ปล่องรังสีดวงอาทิตย์		3	0.14 x 1	25	0.125 (ใช้งาน พร้อมกัน)
- กระเบื้อง CPAC	0.015	2	0.005 x 0.25	90	
- ช่องอากาศ	0.14				
- แผ่นยิปซัม	0.09				
ผนังทროมบี้แบบที่ 1		2	0.005 x 0.25	90	
- กระจกใส	0.005				
- ช่องอากาศ	0.145				
- อิฐก่อ	0.08				
- โยแก้ว	0.025	2	0.005 x 0.25	90	
- ไม้อัด	0.004				
ผนังทროมบี้แบบที่ 2					
- อิฐก่อ	0.008	2	0.005 x 0.25	90	
- ช่องอากาศ	0.14				
- แผ่นยิปซัม	0.009				
ผนังทროมบี้แบบที่ 3		2	0.005 x 0.25	90	
- กระจก	0.005				
- ช่องอากาศ	0.145				
- แผ่นสังกะสี	0.007				
- โยแก้ว	0.025	2	0.005 x 0.25	90	
- ไม้อัด	0.004				
Sudaporn Chungloo and Bundit Limmeechokchai (2007)					
กระเบื้องลอนคู่	0.005	1.79	0.08 x 0.95	45	0.038
ช่องอากาศ	0.15				
แผ่นยิปซัม	0.09				



รูปที่ 9 ปล่องรังสีดวงอาทิตย์ในงานวิจัยของ Khedari et al. (2000a)



รูปที่ 10 ปล่องรังสีดวงอาทิตย์และผนังทอมบ์ 3 แบบ ในงานวิจัยของ Khedari et al. (2000b)



รูปที่ 11 ปล่องรังสีดวงอาทิตย์ในงานวิจัยของ Sudaporn Chungloo and Bundit Limmeechokchai (2007)

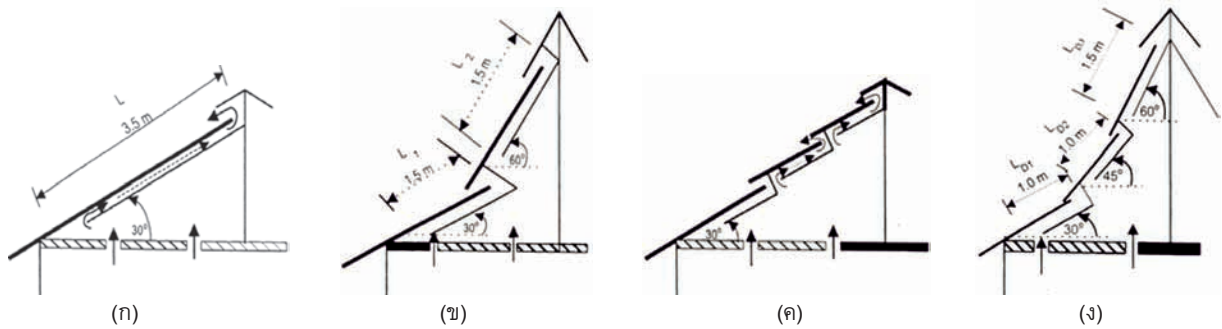
= $0.021 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ จึงมีความเป็นไปได้ว่ามุมเอียงที่มากขึ้นส่งผลให้อัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น

ผลของมุมเอียงที่มากขึ้นต่อการระบายอากาศที่มากขึ้นอาจเห็นได้จากงานวิจัยของ Jongjit Hirunlarbh et al. (2001) โดยการแก้สมการการถ่ายเทความร้อนหลายสมการด้วยระเบียบวิธี finite difference ผลการศึกษาแสดงว่าการผสมผสานมุมเอียงหลายมุมและให้มีมุมเอียงตั้งแต่ $30-60^\circ$ ดังรูปที่ 12 แบบ (ง) ทำให้อัตราการระบายอากาศสูงที่สุดโดยที่ปล่องรังสีดวงอาทิตย์แบบ (ง) มีลักษณะคล้ายคลึงกับบ้านทรงไทย

เนื่องจากการระบายอากาศโดยอาศัยการลอยตัวนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพอีกทางหนึ่ง ได้แก่ การเพิ่มความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิทางเข้าและทางออก งานวิจัยด้านนี้ ได้แก่ การใช้กระเบื้องใสมุงหลังคาบางส่วน (Waewsak et al., 2003) ส่งผลให้อุณหภูมิในช่องอากาศใต้หลังคาสูงขึ้นและมีการใช้แสงธรรมชาติในห้องที่อยู่อาศัย ในการศึกษาวิจัยนี้มีพื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์เท่ากับ 3 m^2 และมีพื้นที่กระเบื้องหลังคาโปร่งใส 0.45 m^2 (ประมาณ 15%) สามารถแลกเปลี่ยนอากาศได้ 10-15 ACH ในช่วงฤดูร้อน และมีแสงสว่างที่ระดับ 0.75 m จากพื้นห้องอยู่ระหว่าง 140-250 lux นอกจากนี้การลดอุณหภูมิอากาศที่ช่องเปิดเข้าปล่องโดยการพ่นละอองน้ำบนหลังคาส่วนที่ไม่ได้ติดตั้งปล่องรังสีดวงอาทิตย์ ทำให้เพดานห้องด้านหนึ่งเย็นลง และส่งผลให้อุณหภูมิอากาศภายในห้องและทางเข้าสู่ปล่องมีค่าลดลง (Chungloo & Limmeechokchai, 2007) เป็นการเพิ่มความต่างของอุณหภูมิมระหว่างทางเข้าและทางออกจากปล่อง

5. สรุป

การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติเฉพาะที่อาศัยการลอยตัว (buoyancy effect) อันเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศ เป็นการระบายอากาศที่ไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า และสามารถนำไปใช้ได้ใสภาพแวดล้อมที่อับลม ความเร็วของอากาศในการระบายอากาศวิธีนี้มีค่าน้อยคือไม่เกิน 1 m/s จึงไม่เพียงพอต่อสภาวะสบาย (thermal comfort) การวิจัยและพัฒนาวิธีการมาจากทฤษฎีด้านการถ่ายเทความร้อน โดยเป็นการคิดผลกระทบบจากสภาวะแวดล้อม



รูปที่ 12 ปล่องรังสีดวงอาทิตย์ 4 แบบจากงานวิจัยของ Hirunlarbh et al. (2001)

ภายนอกต่อการกระจายความร้อนออกจากห้อง การวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น การวิจัยด้านผนังทอมป์ และการวิจัยด้านปล่องรังสีดวงอาทิตย์ การวิจัยด้านผนังทอมป์ไม่แพร่หลายในประเทศไทย แต่ในช่วงหลัง ได้มุ่งเรื่องความเป็นฉนวนของผนังมวลสารมากกว่า ส่วนการวิจัยด้านปล่องรังสีดวงอาทิตย์ มีการวิจัยอย่างต่อเนื่องทั้งในและต่างประเทศ

การพัฒนาด้านรูปลักษณะ ขนาด และวัสดุที่ใช้ในการสร้างเทคโนโลยีชนิดนี้ไม่แตกต่างจากรูปแบบเดิมมากนักในช่วงระยะเวลาประมาณ 15 ปีที่ผ่านมา การพัฒนาและวิจัยยังมุ่งเน้นการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ และศึกษาด้านอุณหภูมิกอากาศในตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ stack และอุณหภูมิกในห้อง

ที่อยู่ติดกับผนังทอมป์หรือปล่องรังสีดวงอาทิตย์ มีการสร้างแบบจำลองใกล้เคียงขนาดจริงร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองและการคำนวณบ้าง ในปัจจุบันพบว่าอัตราการระบายอากาศต่อพื้นที่รับรังสีดวงอาทิตย์มีค่าน้อย โดยคิดเป็นอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศประมาณ 3 ACH ในรูปแบบเดิม 10-15 ACH ในรูปแบบที่ปรับปรุงแล้ว นอกจากนี้ ค่าอุณหภูมิภายในห้องใช้งานกับปล่องรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูงเกินขอบเขตสภาวะสบาย การวิจัยในช่วงหลังจึงมีการปรับใช้ระบบปล่องรังสีดวงอาทิตย์ร่วมกับระบบลดหรือเพิ่มความร้อนเพื่อให้เพิ่มการระบายอากาศ และเพิ่มการเข้าถึงสภาวะน่าสบายด้านอุณหภูมิกมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- Aboulnaga, M. M. (1998). Roof solar chimney assisted by cooling cavity for natural ventilation in buildings in hot arid climate: An energy conservation approach in Al-Ain city. *Renewable Energy*, 14, 357-363.
- Bansal, N. K., Mathur, R., & Bhandari, M. S. (1994). A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. *Building and Environment*, 29, 495-500.
- Chenvidyakarn, T. (2005). The impact of pre-cooling on multiple steady states in stack ventilation. *Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 3, 1-20.
- Chungloo, S., & Limmeechokchai, B. (2007). Application of passive cooling systems in hot and humid climate: The case study of solar chimney and wetted roof in Thailand. *Building and Environment*, 42, 3341-3351.
- Csanady, G. T. (1973). *Turbulent diffusion in the environment*. Holland: D. Riedel Publishing.
- Fitzgerald, S. D., & Woods, A. W. (2008). The influence of stacks on flow patterns and stratification associated with natural ventilation. *Building and Environment*, 43(10), 1719-1733.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Canada: John Wiley & Sons.
- Hamdy, I. F., & Fikry, M. A. (1998). Passive solar ventilation. *Renewable Energy*, 14(1-4), 381-386.
- Hirunlabh, J., Wachirapuwadon, S., Pratinthong, N., & Khedari, J. (2001). New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. *Building and Environment*, 36, 383-391.
- Khedari, J., Boonsri, B., & Hirunlabh, J. (2000b). Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building. *Energy and Buildings*, 32, 89-93.
- Khedari, J., Hirunlabh, J., & Bunnag, J. (1997). Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new houses. *Energy and Buildings*, 26, 159-164.
- Khedari, J., Kaewruang, S., Pratinthong N., & Hirunlarbh, J. (1999). Natural ventilation of houses by a Trombe wall under the climatic conditions in Thailand. *Ambient Energy*, 20, 85-94.
- Khedari, J., Lertsatitthanakorn, C., Pratinthong, N., & Hirunlarbh, J. (1998). The modified Trombe wall: A simple ventilation means and an efficient insulating material. *Ambient Energy*, 19, 104-110.
- Khedari, J., Mansirisub, Chaima, S., Pratinthong, N., & Hirunlabh, J. (2000a). Field measurements of performance of roof solar collector. *Energy and Buildings*, 31, 171-178.
- Pichaisak, M., & Chungloo, S. (2009). Utilization of air in crawl space with a modified Trombe wall for natural ventilation and heat protection. *World Renewable Energy Congress 2009 - Asia: The 3rd International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2009)"*. Bangkok, Thailand.
- Schlaich, J., Bergemann, R., Schiel, W., & Weinrebe, G. (2005). Design of commercial solar updraft tower systems – Utilization of solar Induced convective flows for power generation. *Journal of Solar Energy*, 127(1), 117-124.
- Waewsak, J., Hirunlabh, J., Khedari J., & Shin, U. C. (2003). Performance evaluation of the BSRC multi-purpose bio-climatic roof. *Building and Environment*, 38, 1297-1302.