การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในโถงเอเตรียมเพื่อสร้างสภาวะน่าสบาย

Natural Ventilation in Atrium for Comfort

จารุณี โรจน์สวัสดิ์สุข
Jarunee Rojsawadsuk

การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในโถงเอเตรียมเพื่อสร้างสภาวะน่าสบาย
Natural Ventilation in Atrium for Comfort

จารุณี โรจน์สวัสดิ์สุข
Jarunee Rojsawadsuk

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์และการผังเมือง มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
Faculty of Architecture and Planning, Thammasat University

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการนำความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์ มาช่วยผลักดันการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติในโถงเอเตรียมที่มีด้านหนึ่งเป็นผนังกระจกแนวตั้งเพื่อรับแสงธรรมชาติจากภายนอก ด้านอื่นถูกปิดล้อมด้วยพื้นที่ส่วนอื่นของอาคาร โดยมีความร้อนผ่านผนังกระจกมาจากการแผ่รังสีอาทิตย์และบริเวณพื้นโถงที่มาจากคน อุปกรณ์ไฟฟ้าหรือรังสีอาทิตย์ที่พื้นโถงดูดซับไว้ภายในโถงเอเตรียมมีช่องเปิดสองช่อง ช่องหนึ่งอยู่ด้านบน อีกช่องหนึ่งอยู่ด้านล่าง งานวิจัยนี้อาศัยการทดลองในห้องทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเน้นไปที่ปัจจัยหลักของการเกิดการระบายอากาศด้วยวิธีดังกล่าว จากผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิภายในโถงเอเตรียมมีความแตกต่างกันตามระดับความสูงภายในโถง กล่าวคือ เมื่อโถงเอเตรียมมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก อุณหภูมิต่ำสุดจะอยู่ที่ระดับพื้นภายในโถง โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความร้อนที่ได้รับผ่านผนังและบริเวณพื้น กับความสูงต่ำของอุณหภูมิและความมากน้อยของอัตราการระบายอากาศ ผลที่ได้เหล่านี้นำไปสู่การออกแบบโถงเอเตรียมที่มีการกำหนดความสูงและขนาดช่องเปิดที่แตกต่างกัน เพื่อควบคุมอุณหภูมิและอัตราการระบายอากาศให้มีความเหมาะสมกับโถงเอเตรียมในสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ

Abstract

This research investigates the natural ventilation of an occupied glass atrium subjected to solar radiation. The solar gain through a glass wall of the atrium serves as uniform vertical heating the occupants and equipment distributed across the floor of the atrium serves as uniform horizontal heating. The atrium vents to the exterior through two openings, one at the top and one at the base. Laboratory experiments reveal that these conditions lead to vertical thermal stratification within the space. The atrium is warmer than the outside air, with the lowest interior temperature at the floor level. A mathematical model is developed to describe the inter-relationship between the vertical and horizontal heating and the consequential thermal stratification and ventilation rate. Theoretical analysis shows that to achieve ventilation and thermal comfort within the space, the amount of solar gain should be controlled in relation to the sizes and heights of the vents. These findings are then applied to explore the control strategies for atria in range of climates.

คำสำคัญ (Keywords)

การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ (Natural Ventilation)
การแผ่รังสีอาทิตย์ (Solar Radiation)
โถงเอเตรียม (Atrium)
การระบายอากาศแบบใช้ปล่อง (Stack Ventilation)
การแบ่งชั้นความร้อน (Thermal Stratification)
สภาวะน่าสบายเชิงอุณหภาพ (Thermal Comfort)

1. บทนำ

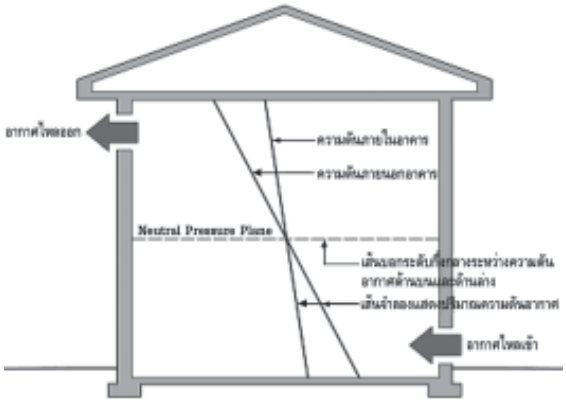
การแผ่รังสีอาทิตย์เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ปริมาณการได้รับความร้อนภายในอาคารสูงขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณที่มีสภาพภูมิอากาศร้อน หากว่าไม่มีการจัดการภายในอาคารที่ดีจะทำให้อาคารได้รับความร้อนมากเกินไป ส่งผลให้คนที่อาศัยอยู่ภายในอาคารรู้สึกไม่สบาย เพื่อให้เห็นภาพปริมาณความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่อาคารได้รับ เมื่อเทียบกับปริมาณความร้อนจากแหล่งอื่น สมมติให้อาคารหลังหนึ่งขนาด 12 x 20 เมตร มีผนังด้านหนึ่งทำด้วยกระจกรับแดดโดยตรง และมีคนภายในอาคาร 150 คน อาคารหลังนี้ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ในปริมาณ 700 วัตต์/ตร.ม. และคนที่อาศัยอยู่ภายในอาคารปล่อยความร้อนออกมาคนละ 100 วัตต์ [1] จะพบว่า ปริมาณความร้อนจากคนเท่ากับ 15,000 วัตต์ ขณะที่ปริมาณความร้อนจากดวงอาทิตย์เท่ากับ 168,000 วัตต์ ซึ่งปริมาณความร้อนที่ได้รับจากดวงอาทิตย์มีมากกว่าปริมาณความร้อนจากคนประมาณ 10 เท่า เพื่อลดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในอาคารและให้อาคารอยู่ในสภาวะน่าสบาย คนส่วนใหญ่จึงมักจะติดเครื่องปรับอากาศเพื่อควบคุมอุณหภูมิและอัตราการระบายอากาศภายในอาคาร อย่างไรก็ตาม การใช้เครื่องปรับอากาศในอาคารเป็นการเพิ่มภาระการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างมาก ได้มีรายงานการศึกษาของ USAID ที่ทำให้กับสำนักงานพลังงานแห่งชาติเรื่อง Energy Conservation in Building พบว่าอาคารประเภทสำนักงานมีความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจากการใช้เครื่องปรับอากาศมากถึงร้อยละ 50.00 โรงแรมร้อยละ 61.00 ศูนย์การค้า ร้อยละ 60.00 โรงพยาบาลร้อยละ 77.50 ภัตตาคาร ร้อยละ 27.80 และสถานศึกษาร้อยละ 22.20 [2]

ในอาคารที่ต้องการการประหยัดพลังงาน ความร้อนจากดวงอาทิตย์จึงเป็นส่วนสำคัญที่ควรนำมาพิจารณาในการออกแบบระบบควบคุมสภาวะแวดล้อมในอาคาร โดยเฉพาะในด้านอุณหภูมิและการระบายอากาศ วิธีที่สามารถนำมาใช้ได้คือการนำความร้อนจากดวงอาทิตย์มาช่วยผลักดันการระบายอากาศแบบธรรมชาติและระบายความร้อนส่วนเกินออกสู่ภายนอกอาคาร จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า โถงเอเตรียมมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการระบายอากาศด้วยระบบนี้ [3] เนื่องจากโถงเอเตรียมจะมีลักษณะเป็นโถงที่สูงและมีปัญหาเรื่องความร้อนสะสมภายในอาคารมาก การลดความร้อนและการระบายอากาศที่เหมาะสม จึงเป็นสิ่งสำคัญ ทั้งนี้ การระบายอากาศไปสู่ภายนอกโถง ปริมาณการรับความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ได้รับเข้าสู่อาคารโดยตรงผ่านกระจกของโถงเอเตรียม อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดที่เหมาะสม รวมทั้งปริมาณคนในอาคาร ล้วนส่งผลต่อการระบายอากาศภายในอาคารทั้งสิ้น

งานวิจัยนี้มุ่งหาความสัมพันธ์และอิทธิพลร่วมของความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ได้รับผ่านผนังกระจกแนวตั้งและความร้อนจากคน อุปกรณ์ไฟฟ้า หรือรังสีอาทิตย์ที่พื้นโถงดูดซับไว้ที่ระดับพื้นภายในโถงเอเตรียม โดยอาศัยการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ และใช้วิธีการคำนวณทางทฤษฎีควบคู่ไปกับการทดลองในห้องทดลอง เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาการออกแบบโถงเอเตรียมที่มีความถูกต้องและเหมาะสม ทั้งนี้จะมีการศึกษาพื้นที่ช่องเปิดและการติดตั้งแผงกันแดดภายนอกโถงเอเตรียม เพื่อช่วยในการออกแบบเพื่อสร้างสภาวะน่าสบายของคนที่เข้ามาใช้งานในอาคารที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ โดยจะได้มาซึ่งหลักการพื้นฐานที่เหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารที่มีลักษณะเป็นโถงสูง โดยสามารถบ่งชี้ได้ถึงอิทธิพลที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการระบายอากาศที่ดี มีอุณหภูมิที่เหมาะสม และช่วยในการออกแบบให้เกิดสภาวะน่าสบาย

2. การศึกษาการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติจากภายในสู่ภายนอกอาคาร

วิธีหนึ่งของการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติจากภายในสู่ภายนอกอาคารคือ การระบายอากาศแบบใช้ปล่อง (stack ventilation) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากความดันที่แตกต่างกันระหว่างภายในกับภายนอกอาคาร ดังแสดงในรูปที่ 1 ถ้าอากาศภายในมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอก ความดัน



รูปที่ 1 ความดันที่แตกต่างกันระหว่างภายในกับภายนอกอาคาร

ภายในอาคารที่ระดับช่องเปิดที่อยู่สูงกว่าจะมีมากกว่าความดันภายนอก ส่งผลให้อากาศร้อนไหลออกจากอาคาร ความดันภายในอาคารที่ระดับช่องเปิดที่ต่ำกว่าจะน้อยกว่าความดันภายนอก ส่งผลให้อากาศเย็นจากภายนอกไหลเข้าสู่อาคาร

จากปรากฏการณ์ที่เกิดจากความดันที่แตกต่างกันนั้น เป็นผลอันเนื่องมาจากอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างภายในและภายนอก ซึ่งอุณหภูมิที่ร้อนกว่าในอาคารมักเกิดจากแหล่งกำเนิดความร้อนจากที่บริเวณผนัง เช่น ความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์หรือที่พื้นของอาคาร เช่น ผู้ใช้อาคารและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งอาคารที่พบเห็นได้โดยทั่วไปของการเกิดปรากฏการณ์นี้คือ โถงเอเตรียม มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องหลายประเภทเกี่ยวกับปรากฏการณ์นี้ ได้แก่ การมีความร้อนที่ผนังหรือพื้นอย่างใดอย่างหนึ่งในลักษณะกระจาย (uniform source) หรือการมีความร้อนเป็นจุด (point source) และเป็นเส้น (line source) ที่ระดับพื้นของอาคาร

Cooper and Hunt [4] ได้ศึกษาหลักการของการเกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันในแต่ละระดับชั้นของความสูงของอาคาร อันเกิดจากความร้อนที่ผนังแนวตั้ง (uniform vertical source) ภายในพื้นที่ที่ต้องการการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ เช่น ความร้อนจากการแผ่รังสีอาทิตย์หรือความร้อนที่เกิดจากแหล่งอื่น โดยศึกษาจากห้องที่มีการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ และมีสองช่องเปิดที่ระดับต่างกัน ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลกับทฤษฎี จากผลการทดลองพบว่า ความร้อนจะถูกแบ่งเป็นชั้น ๆ ภายในอาคาร (thermal stratification) กล่าวคือที่บริเวณด้านบนสุดของห้องจะมีอุณหภูมิสูงสุดและลดลงเรื่อย ๆ ในที่ระดับต่ำลงมา จนถึงระดับหนึ่งอุณหภูมิภายในห้องจะเท่ากับนอกห้อง

Chenvidyakarn and Woods [5-6] ได้ศึกษาระบบระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติของอากาศที่มีช่องเปิดสองระดับที่มีการทำความเย็นแก่อากาศภายนอกที่จะไหลเข้าสู่อาคาร (pre-cooling) ทางช่องเปิดล่าง ส่วนหนึ่งของการทดลองได้จำลองรูปแบบการเกิดการระบายอากาศด้วยหุ่นจำลองโดยมีความร้อนภายในห้องที่ระดับความสูงหนึ่งที่บริเวณพื้น (uniform horizontal source) จากผลการทดลองพบว่าส่วนของห้องที่เหนือกว่าบริเวณแหล่งกำเนิดความร้อนหลักบริเวณพื้นจะมีอุณหภูมิอากาศอุ่นเท่ากันทุกจุด (thermally uniform) ส่วนบริเวณของห้องที่ระดับต่ำกว่าแหล่งกำเนิดความร้อนหลัก จะมีอุณหภูมิเท่ากับอากาศภายนอกหากไม่มีการทำความเย็น แต่ถ้าหากมีความเย็น อุณหภูมิในส่วนนี้จะต่ำกว่าอากาศภายนอก

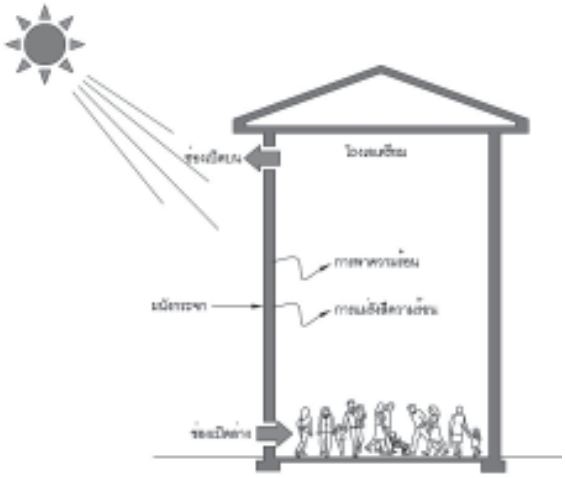
Yuguo Li [7] ได้ศึกษาการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติภายในห้องที่มีช่องเปิดสองช่อง ซึ่งมีส่วนหนึ่งของงานวิจัยได้ทำการทดลองเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดความร้อนที่พื้นเป็นจุด และแหล่งกำเนิดความร้อนที่พื้นเป็นเส้นที่ส่งผลต่อการแบ่งชั้นความร้อนในอากาศและมีอิทธิพลต่ออัตราการระบายอากาศ โดยศึกษาจากห้องที่มีการระบายอากาศ (ventilated room) และมีช่องเปิดสองระดับต่างกัน ได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลกับทฤษฎีที่ใช้วิธีการทดลองแบบฟองของไฮโดรเจน (the fine bubble technique) ซึ่งใช้ฟองของไฮโดรเจนแทนอากาศ และใช้น้ำแทนสภาพแวดล้อมภายนอก โดยการทดลองได้ติดตั้งแหล่งกำเนิดความร้อนที่พื้นเป็นจุด และแหล่งกำเนิดความร้อนเป็นเส้น จากผลการทดลองพบว่า ความร้อนถูกแบ่งออกเป็นสองชั้น ชั้นบนอุณหภูมิอากาศจะเท่ากันทุกจุด ส่วนบริเวณชั้นล่างอุณหภูมิภายในจะเท่ากับอุณหภูมิภายนอก

จากผลการวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า ได้มีการทดลองและศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการจำลองผนังร้อนและพื้นร้อนที่มีผลต่อการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติในอาคารแล้ว แต่ยังไม่มีการจำลองการนำผนังร้อนและพื้นร้อนมาใช้ด้วยกันอย่างผสมผสาน ทั้ง ๆ ที่ในอาคารมีความร้อนสะสมที่พื้นและผนัง โดยที่ความร้อนส่วนใหญ่นั้นจะถูกส่งผ่านผนังกระจกของอาคารเข้าไปในอาคารด้วยการนำความร้อนและการแผ่รังสี ทำให้มีการสะสมที่เปลือกอาคารในสภาพที่มีการเคลื่อนของอากาศมาก เช่น อาคารที่ระบายอากาศแบบธรรมชาติ ความร้อนจะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นการพาและการแผ่รังสีความร้อนที่เพิ่มอุณหภูมิภายในอาคารให้สูงกว่าอากาศภายนอก หากอาคารใดมีช่องเปิดที่มีสองระดับต่างกัน อากาศเข้าทางช่องเปิดที่ต่ำกว่า และจะถูกแทนที่ด้วยอากาศจากภายนอก อากาศที่ร้อนกว่าภายในอาคารจะลอยตัวขึ้นไปสู่ด้านบนของอาคาร โดยที่ความร้อนที่ผนังนั้นอาจเกิดจากความร้อนที่มาจากรังสีอาทิตย์หรือจากแหล่งอื่น ส่วนความร้อนที่พื้นจะเป็นความร้อนที่มาจากคน อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ รวมถึงความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่พื้นดูดซับไว้ภายในอาคาร ซึ่งหากมีการจำลองสถานการณ์และถูกใช้ควบคู่กันอย่างผสมผสาน จะทำให้เข้าใจสถานการณ์ภายในอาคารที่ตั้งอยู่ในความเป็นจริงมากขึ้น โดยอาศัยการคาดการณ์สภาพอุณหภูมิและการระบายอากาศในอาคาร

3. วิธีวิจัยและผลการวิจัย

การวิเคราะห์อิทธิพลของแรงผลักดันอากาศภายในอาคารจากรังสีดวงอาทิตย์ โดยมีความร้อนที่พื้นและผนังในปริมาณที่ต่างกัน ทำให้เกิดการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ เป็นการศึกษาวิจัยในเชิงปริมาณ (quantitative research) และเชิงคุณภาพ (qualitative research) โดยใช้การวิจัยเชิงทดลอง เปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี

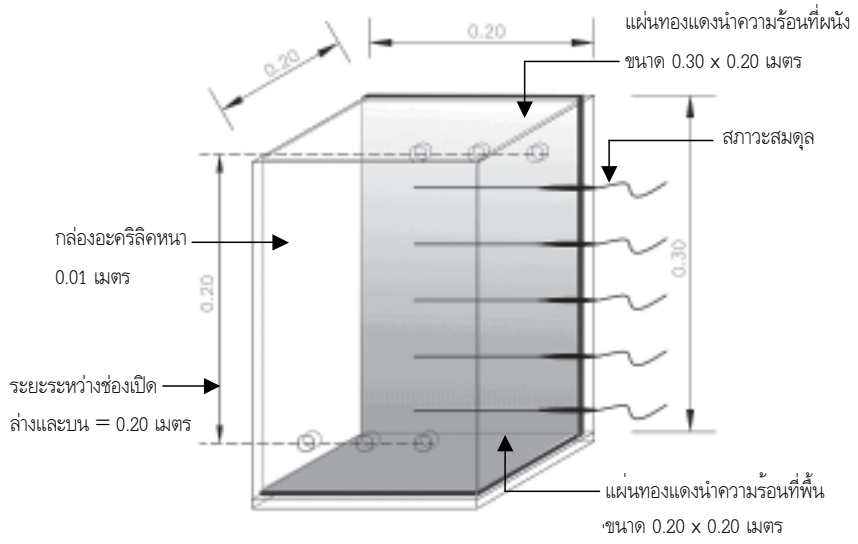
ตัวอย่างอาคารกรณีศึกษา เป็นอาคารที่มีลักษณะเป็นโถงสูง ดังแสดงในรูปที่ 2 มีช่องเปิดให้อากาศผ่านเข้าออกในสองระดับต่างกัน ผนังด้านหนึ่งเป็นกระจก ได้รับความร้อนจากรังสีอาทิตย์ ส่วนผนังด้านอื่นเป็นวัสดุที่สามารถกันความร้อนได้ดี ไม่มีการสูญเสียความร้อนระหว่างภายในและภายนอกอาคาร และมีคนอยู่ภายในอาคาร การทดลองได้ทำการจำลองกล่องทดลองที่เน้นเฉพาะปัจจัยสำคัญดังกล่าว โดยอ้างอิงจากตัวอย่างอาคารกรณีศึกษา เพื่อให้เข้าใจกลไกหลักของการเกิดการระบายอากาศ



รูปที่ 2 ตัวอย่างอาคารที่ใช้ในการทดลอง

3.1 การทดลอง

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วยกล่องอะคริลิกดังแสดงในรูปที่ 3 หนา 0.01 เมตร ขนาด 0.30 x 0.20 x 0.20 เมตร ซึ่งแทนห้องที่เลือกมาทำการศึกษา และเป็นความหนาที่เพียงพอต่อปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกไปนอกกล่องอะคริลิกในระยะเวลาทำการทดลอง 1–2 ชั่วโมง เนื่องจากความร้อนที่สูญเสียไปนั้นน้อยมาก และมีภาชนะสำหรับใส่น้ำขนาด 0.90 x 0.45 x 0.45 เมตร แทนสภาพแวดล้อมภายนอก โดยวางกล่องอะคริลิกไว้ในภาชนะนี้ ที่กล่องอะคริลิกเจาะช่องเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.015 เมตร จำนวน 3 ช่อง ที่บริเวณสูงจากแผ่นทองแดงนำความร้อน 0.03 เมตร ด้านหนึ่ง และ 0.23 เมตร อีกด้านหนึ่งตามลำดับ จากนั้นติดตั้งแผ่นทองแดงนำความร้อนที่ผนังแนวตั้งขนาด 0.30 x 0.02 เมตร แทนความร้อนที่มาจากรังสีดวงอาทิตย์ และติดตั้งแผ่นทองแดงบนพื้นขนาด 0.20 x 0.20 เมตร แทนความร้อนที่มาจากคน ทำการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิในน้ำ (Ungrounded Thermocouples Type K) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 มิลลิเมตร จำนวน 5 สาย บริเวณพื้นแผ่นทองแดงที่ระดับ 0.03, 0.08, 0.13, 0.18 และ 0.23 เมตร ตามลำดับ และอีก 1 สายใส่ไว้ในน้ำนอกกล่องอะคริลิกเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำ



รูปที่ 3 แบบจำลองอาคารที่เลือกศึกษา

ภายนอก บริเวณที่เจาะรูเพื่อติดตั้งสายวัดอุณหภูมิ มีการปิดรอยรั่วของน้ำด้วยดินน้ำมัน ทำการติดตั้งสายวัดอุณภูมิในน้ำเข้ากับเครื่องบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ (data locker) และเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อการอ่านข้อมูลอุณหภูมิในลักษณะตารางและกราฟ เริ่มทำการทดลองโดยเปิดเครื่องทำความร้อน เพื่อเพิ่มความร้อนที่แผ่นนำความร้อนที่พื้นและผนัง ซึ่งในการทดลองได้ปรับค่าความร้อนที่พื้นและผนังเป็น 2 ค่าคือ 100 และ 200 วัตต์ และกำหนดการเปิดช่องเปิดเป็น 2 และ 3 ช่องเปิด โดยแบ่งการทดลองดังแสดงในตารางที่ 1

3.2 ผลที่ได้จากการทดลอง

ผลการทดลองทุกกรณีมีแนวโน้มที่เหมือนกัน จึงอธิบายผลการทดลองที่ A-01 ผลที่ได้คือ อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนเข้าสู่สภาวะสมดุล (steady state) แต่ต่างกันตรงที่ค่าอุณหภูมิที่สภาวะสมดุลที่ระดับชั้นต่าง ๆ

จากการทดลองวัดอุณหภูมิน้ำ พบว่า ในแต่ละระดับมีอุณหภูมิเท่ากัน เมื่อเริ่มทดลองในชุดการทดลอง A-01 เปิดสวิตซ์ไฟและปรับค่าความร้อนที่แผ่นผนังทองแดง 100 วัตต์ และแผ่นพื้นทองแดง 200 วัตต์ พบว่า น้ำในกล่องทดลองมีอุณหภูมิสูงขึ้น จนถึงระยะเวลาหนึ่ง อุณหภูมิในแต่ละระดับชั้นจะคงที่ โดยอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยที่ระดับสูงกว่ามีค่ามากกว่าที่ระดับต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4

ผู้วิจัยได้หยดสีบริเวณใกล้กับช่องเปิดที่ระดับล่างในขณะที่น้ำเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อสังเกตเส้นทางการไหลของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 5 จะเห็นว่าน้ำมีการไหลเข้าไปทางช่องเปิดล่าง มีน้ำส่วนหนึ่งไหลขึ้นไปสู่ผนังด้านที่มีความร้อนที่เป็นแผ่นทองแดง ต่อจากนั้นน้ำจะไหลในลักษณะแนวนอนจากด้านดังกล่าวไปยังอีกด้านหนึ่ง และน้ำจากบริเวณพื้นด้านล่างจะเคลื่อนตัวขึ้นมา จนมาผสมกันด้านบน ต่อจากนั้นน้ำจะค่อย ๆ ไหลออกไปสู่ด้านนอกบริเวณช่องเปิดด้านบน และมีน้ำจากภายนอกไหลเข้าไปแทนที่บริเวณช่องเปิดด้านล่าง จนถึงสภาวะสมดุลจะมีอุณหภูมิคงที่ตลอดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นว่าที่ระดับชั้นบนจะมีสีเข้มและจางลงมาจนถึงระดับล่างที่มีสีจางที่สุด โดยในที่ระดับสูงจะมีอุณหภูมิสูง และมีอุณหภูมิไล่ต่ำลงมาในแต่ละระดับ

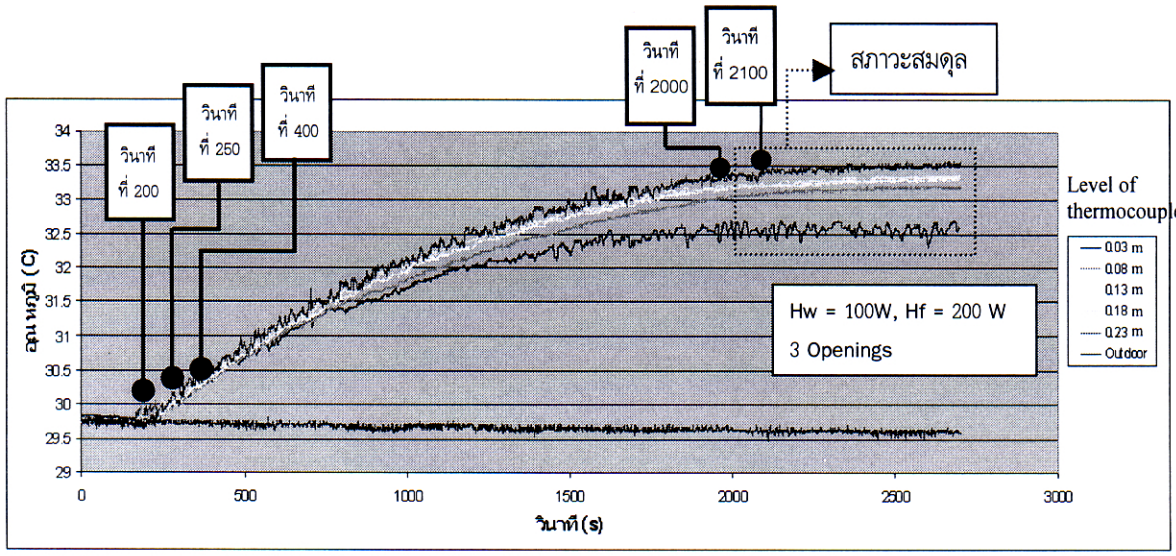
จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า อุณหภูมิภายในกล่องแบ่งตัวเป็นระดับชั้น คือที่ระดับความสูงต่าง ๆ จะมีอุณหภูมิที่ต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบการทดลองของ Cooper และ Hunt พบว่า ต่างกันตรงที่การทดลองนี้อุณหภูมิที่บริเวณด้านล่างไม่เท่ากับอุณหภูมิภายนอก อันเนื่องมาจากการมีความร้อนที่ระดับพื้น เมื่อเปรียบเทียบการทดลองกับ Chen-vidyakarn and Woods พบว่า ต่างกันตรงที่การทดลองนี้อุณหภูมิไม่เท่ากันทุกจุด และเมื่อเปรียบเทียบการทดลองกับ Yuguo Li พบว่า ต่างกันตรงที่การทดลองนี้ไม่ได้แบ่งชั้นความร้อนเป็นสองชั้นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งผนังร้อนกับพื้นร้อนพร้อมกัน อุณหภูมิบริเวณด้านล่างจะไม่เท่ากับด้านนอก และอุณหภูมิจะสูงที่บริเวณด้านบนของกล่องทดลองและอุณหภูมิจะต่ำลงเรื่อย ๆ เมื่อระดับต่ำลงมา สำหรับค่าอุณหภูมิจากการทดลองจะนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

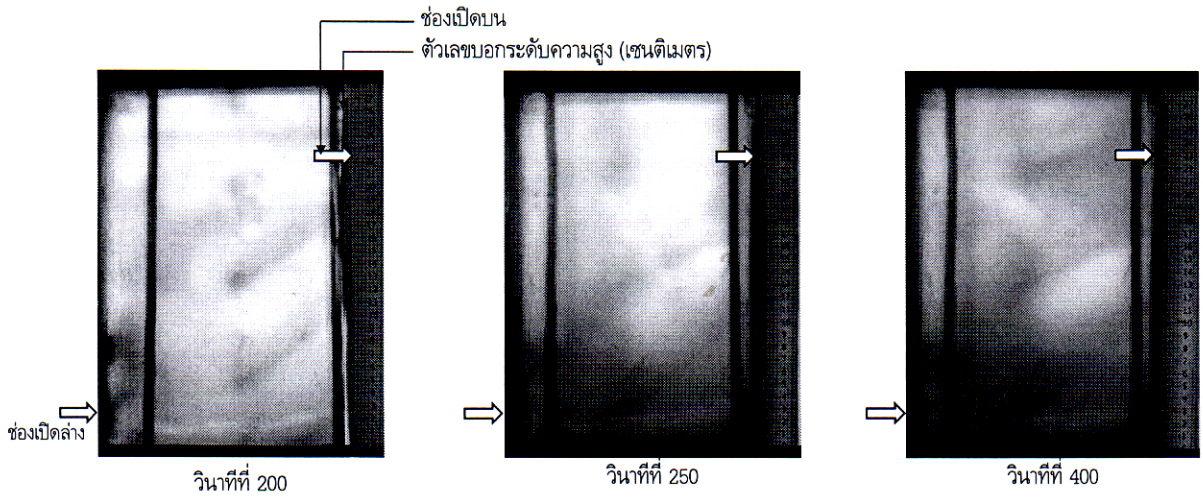
หลักการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอากาศที่มีลักษณะการแบ่งชั้นของความร้อนที่ระดับความสูงต่าง ๆ ภายในอาคาร มีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการระบายอากาศภายในอาคารอยู่ 3 ปัจจัย ได้แก่ พื้นที่ช่องเปิด ปริมาณความร้อนในอากาศจากแหล่งกำเนิดความร้อนทางตั้งและทางนอน และระยะห่างระหว่างช่องเปิดในที่ระดับต่ำกว่าและระดับสูงกว่า

ตารางที่ 1 แสดงการทดลองการวัดอุณหภูมิน้ำที่ผนังและพื้นแผ่นทองแดงในกล่องทดลอง

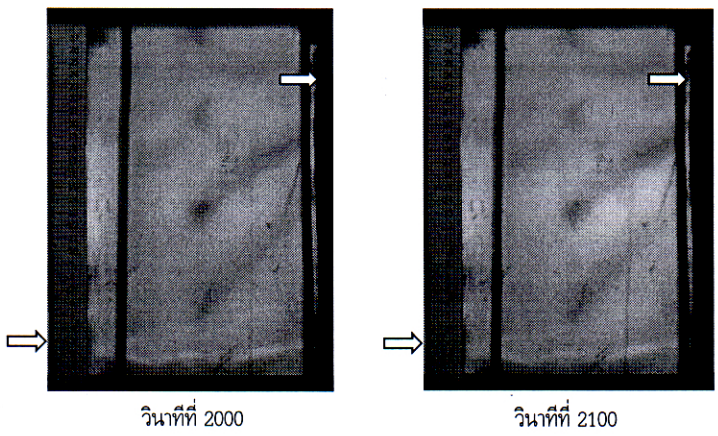
แบบการทดลอง	ค่าความร้อน (วัตต์)		จำนวนช่องเปิด		ความสูงของปล่อง (เมตร)
	ความร้อนที่ผนัง (Hw)	ความร้อนที่พื้น (Hf)	A1	A2	
A-01	100	200	3	3	0.20
A-02	200	200	3	3	
A-03	200	100	3	3	
A-04	100	200	2	2	
A-05	200	200	2	2	
A-06	200	100	2	2	



รูปที่ 4 ผลการทดลอง A-01



รูปที่ 5 การฉายภาพเงา (shadowgraph) แสดงการใส่สีขณะทำการทดลองในช่วงเริ่มการทดลอง



รูปที่ 6 การฉายภาพเงา (shadowgraph) แสดงการใส่สีขณะทำการทดลองในช่วงเข้าสู่สภาวะสมดุล

การที่มีอากาศไหลเข้าสู่ภายในอาคารและออกสู่ภายนอกอาคารทำให้มีการสูญเสียแรงดันในขณะที่ไหลผ่านช่องเปิด โดยที่ความดันทั้งหมดที่สูญเสียไป (total pressure loss) จะเท่ากับความดันรวมภายในอาคาร (driving hydro-static pressure) ดังแสดงในสมการ 1

$$P_1 + P_2 = \int_0^z P_{total} dz \qquad (1)$$

ความดันอากาศที่ช่องเปิดล่าง หมายถึง แรงที่อากาศถูกดันให้เข้าไปอยู่ภายในอาคาร หรือแรงที่เรียกว่าพลังงานจลน์ที่วิ่งผ่านช่องเปิด นั่นคือ

$$P_1 = \left(\frac{\rho}{2}\right) \times \left(\frac{Q_v^2}{A^2}\right)$$

สำหรับอากาศที่ถูกดันออกที่ช่องเปิดทางด้านบน (P_2) จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ความดันรวมของอากาศทั้งหมด (P_{total}) คือ การที่อากาศภายในอาคารที่อยู่นิ่ง ณ อุณหภูมิหนึ่ง ความดันอากาศจะแปรผันตรงกับความสูง และความหนาแน่นของอากาศเสมอ นั่นคือ $(P_{total}) = (r_{IN}\text{-}r_E)$ x g x h ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการ (2) ได้ว่า

$$\left(\frac{\rho_E}{2} \times \frac{Q_V^2}{A_1^2}\right) + \left(\frac{\rho_E}{2} \times \frac{Q_V^2}{A_2^2}\right) = \int_0^z \left(\rho_{IN} - \rho_E\right) \cdot g \cdot dz \qquad (2)$$

อากาศร้อนลอยตัวสูงขึ้น (buoyancy effect) จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นและอัตราการขยายตัวของอุณหภูมิ นั่นคือ $g' = g \times (\Delta\rho/\rho_E) = g \times \infty \times (\Delta T)$ ทำให้อุณหภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลงดังสมการ (3)

$$H_S = \rho \cdot C_P \cdot Q_V \cdot \Delta T \qquad (3)$$

แทนค่าสมการ (2) ลงในสมการ (3) จะได้สมการ (4)

(4)

หากมีความร้อนจากคนหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคาร (H_{hu}) เพิ่มเข้ามา สามารถเพิ่มจากสมการ (4) ได้ว่า

$$Q_V = \left[\frac{g \cdot \infty}{\rho \cdot C_P}\right]^{\frac{1}{3}} \times \left[2 \cdot \frac{\left(A_1^2 \cdot A_2^2\right)}{\left(A_1^2 + A_2^2\right)}\right]^{\frac{1}{3}} \times \left[\int_0^h \left(H_{hu} + \left(\int_0^z Q_H \cdot dz\right)\right) \cdot dz\right]^{\frac{1}{3}} \qquad (5)$$

จากค่า Q_v ที่ได้จากสมการ (5) สามารถนำมาคำนวณหาอุณหภูมิภายในอาคารที่ระดับชั้นต่าง ๆ ได้ดังสมการ (6) เพื่อหาค่าอุณหภูมิที่ระดับชั้นต่าง ๆ ภายในอาคาร

$$\Delta T = \frac{\left(H_{hu} + \int_0^z Q_H \cdot dz\right)}{\rho \cdot C_p \cdot Q_V} \qquad (6)$$

การคำนวณจากสมการ จะใช้สมการ (5) และ (6) ในการหาค่า ซึ่งจะแสดงผลการเปรียบเทียบและการบรรยายผลเรียงตามการทดลองต่อไป

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

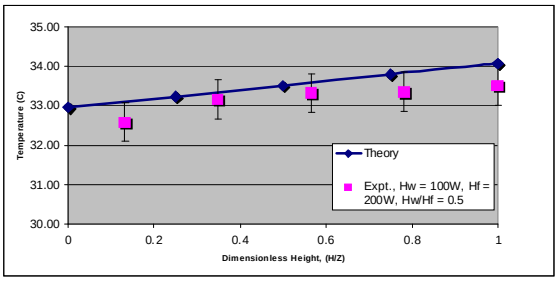
จากข้อมูลที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 7 เป็นภาพแสดงการเปรียบเทียบผลทางอุณหภูมิเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดระหว่างการคำนวณทางทฤษฎี พบว่า มีค่าความผิดพลาดตั้งแต่ 0-4 เปอร์เซ็นต์

จะเห็นว่าค่าของอุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองมีค่าความผิดพลาดน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าจากทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากช่วงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในแต่ละวันมีค่าน้อย จึงทำให้ค่าความผิดพลาดของการทำนายอุณหภูมิในสภาวะจริงมีต่ำ แสดงให้เห็นว่าสามารถนำทฤษฎีไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ช่องเปิด ตำแหน่งในการติดตั้งช่องเปิด ความสูง และจำนวนคนที่เหมาะสมกับสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละฤดูกาลได้

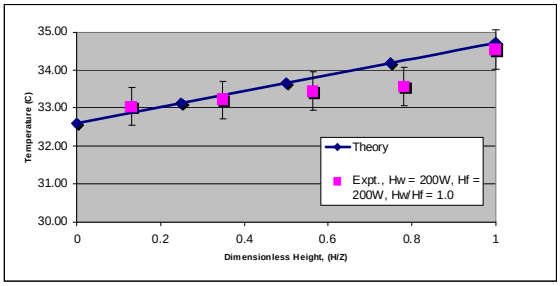
4. การประยุกต์ใช้

เพื่อที่จะทราบค่าอัตราการระบายอากาศและอุณหภูมิภายในโถงในแต่ละเมืองที่มีสภาพภูมิอากาศแตกต่างกัน จึงได้นำโถงเอเตรียมต้นแบบที่ได้มาจากรวบรวมโถงเอเตรียมกรณีศึกษาที่มีรูปแบบซ้ำกันมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 8 มาใช้ในการศึกษา

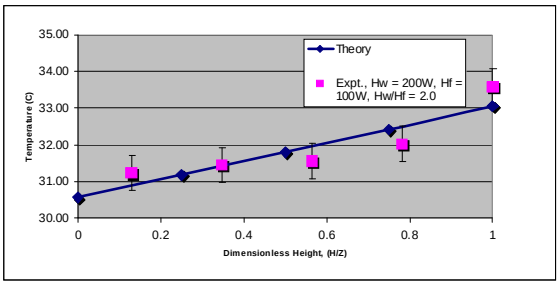
โดยโถงเอเตรียมต้นแบบมีลักษณะดังนี้ ทางเข้าด้านหน้าหันไปทางทิศใต้ มีปริมาณการรับแดดมากที่สุด ทางด้านทิศนี้มีผนังกระจกขนาดกว้าง 14 เมตร สูง 17 เมตร มีประตูทางเข้า 3 ประตู ขนาดกว้าง 2 เมตร และสูง 2 เมตร หน้าต่าง ขนาดกว้าง 12 เมตร และสูง 3 เมตร มีความสูงระหว่างกึ่งกลางประตูและหน้าต่าง 14.50 เมตร ปริมาณคนต่อพื้นที่ 2 ตารางเมตร/คน ซึ่งจากพื้นที่โถง 648 ตารางเมตร เป็นการจำลองด้านหน้าอาคารโถงเอเตรียมและมีคนอาศัย



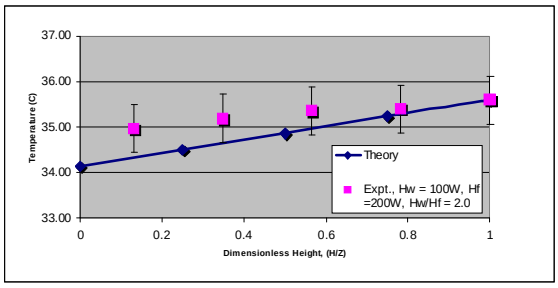
การทดลอง A-01



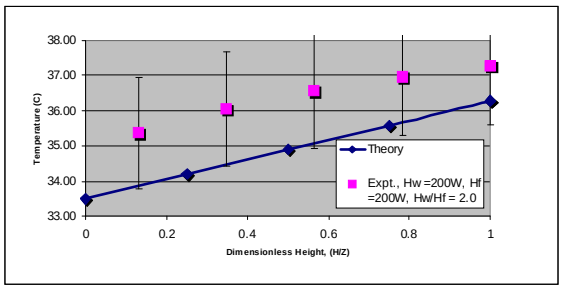
การทดลอง A-02



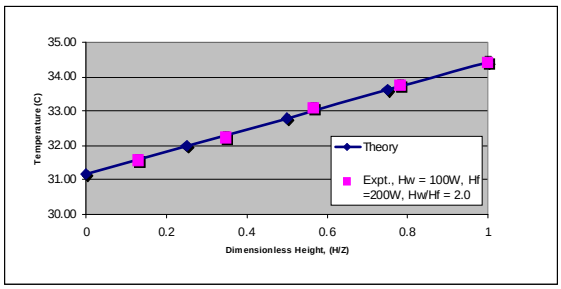
การทดลอง A-03



การทดลอง A-04



การทดลอง A-05

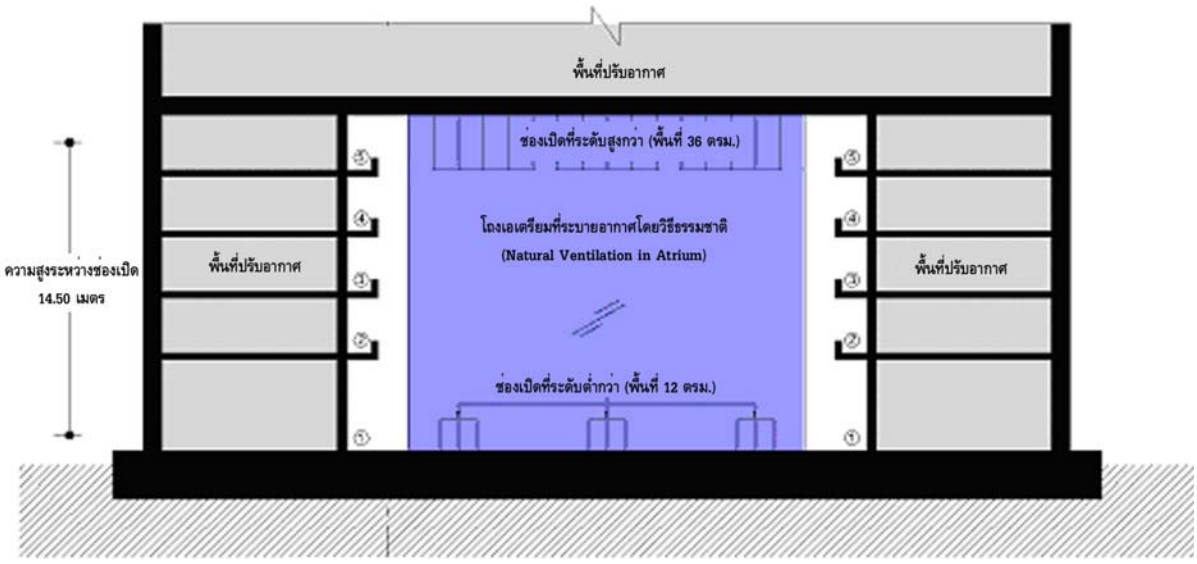


การทดลอง A-06

หมายเหตุ: Hw = ปริมาณความร้อนที่ผนัง

Hf = ปริมาณความร้อนที่พื้น

รูปที่ 7 ภาพแสดงผลการเปรียบเทียบการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี



รูปที่ 8 การจำลองอาคารโถงเอเตรียมต้นแบบที่มีการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ

อยู่ภายในโถง 324 คน แต่ละคนปล่อยความร้อน (latent heat occupant) คนละ 100 วัตต์

ตัวอย่างของเมืองที่นำมาพิจารณา ได้แก่ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย เป็นเมืองที่มีภูมิอากาศร้อนชื้น (tropical rainy climates) การาจี ประเทศปากีสถาน เป็นเมืองที่มีภูมิอากาศร้อนแห้ง (dry climates) ลอนดอน ประเทศอังกฤษ ซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย เป็นเมืองที่มีภูมิอากาศอบอุ่น (warm temperate climates) และเฮลซิงกิ ประเทศฟินแลนด์ เป็นเมืองที่มีภูมิอากาศหนาว (cold temperate climates)

4.1 ผลการคำนวณค่าอัตราการระบายอากาศ

เมื่อทราบถึงปริมาณรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิอากาศภายนอก และจากการกำหนดขนาดช่องเปิดภายในโถงเอเตรียมจะทำให้ทราบค่าพื้นที่ช่องเปิดที่ระดับต่ำกว่าและสูงกว่า นำค่าเหล่านี้มาแทนค่าในสมการ (5) จะได้เป็นค่าอัตราการระบายอากาศในแต่ละเมือง ดังแสดงในรูปที่ 9

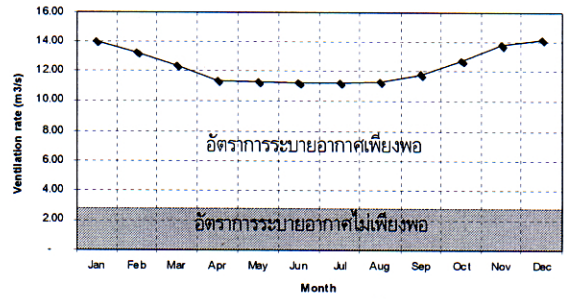
เมื่อพิจารณาอัตราการระบายอากาศในโถงเอเตรียมเทียบกับอัตราการระบายอากาศที่เพียงพอที่ทำให้คนอยู่ได้อย่างสบาย (ไม่ต่ำกว่า 8 ลิตรต่อคน หรือ 8×10^{-3} ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที [8]) พบว่า อัตราการระบายอากาศในโถงเอเตรียมมีเพียงพอสำหรับทุกเมืองในทุก ๆ เดือน

เมื่อทราบอัตราการระบายอากาศภายในโถงเอเตรียมแล้ว สามารถนำมาคำนวณหาอุณหภูมิภายในโถงเอเตรียมที่ระดับชั้นต่าง ๆ ได้ จากสมการ (6) เพื่อหาอุณหภูมิที่ระดับชั้นต่าง ๆ ภายในอาคาร ซึ่งในการพิจารณาอุณหภูมิที่คำนวณได้จะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ การพิจารณาค่าอุณหภูมิในพื้นที่ระดับคนยืน และอุณหภูมิในโถงเอเตรียมทุกระดับความสูง

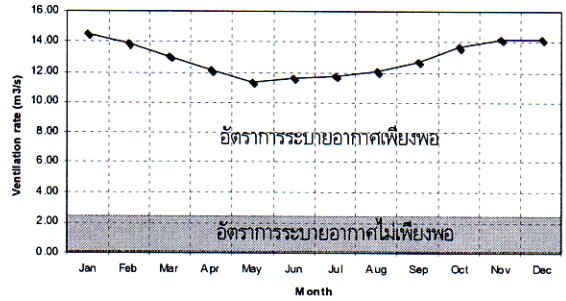
4.2 ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิที่ระดับคนยืน

หากพิจารณาถึงพื้นที่ใช้งานภายในโถงเอเตรียม พื้นที่ที่ถูกใช้งานอย่างสม่ำเสมอคือ ระดับพื้นของโถงเอเตรียมจนถึงระดับความสูง 2 เมตรจากพื้น (ในการคำนวณจะระบุเป็นระดับ 1 เมตรจากกึ่งกลางช่องเปิดล่าง) เนื่องจากเป็นความสูงในระดับคนยืน ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 10

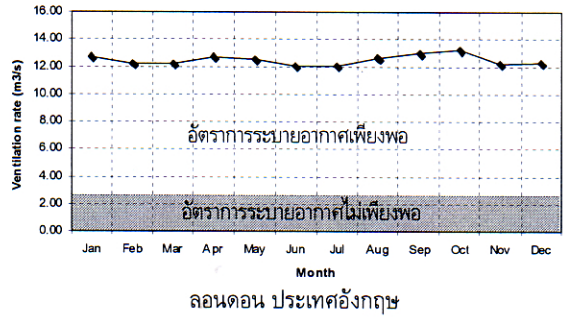
จากผลการคำนวณจะเห็นว่า กรุงเทพมหานครในช่วงเดือนมกราคม พฤศจิกายน และธันวาคม เป็นช่วงเดือนที่อยู่ในเขตสบาย ซึ่งสามารถนำการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาตินี้มาใช้กับโถงเอเตรียมได้ โดยคนที่อยู่ภายในอาคารจะรู้สึกสบายเชิงอุณหภาพตามสภาวะอากาศแบบ



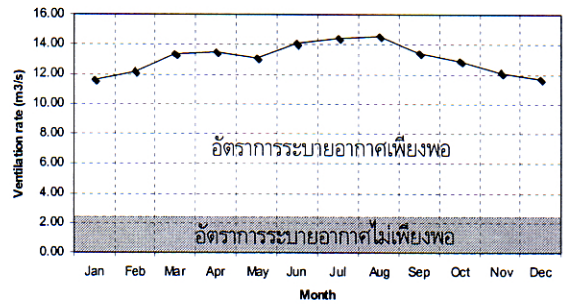
กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย



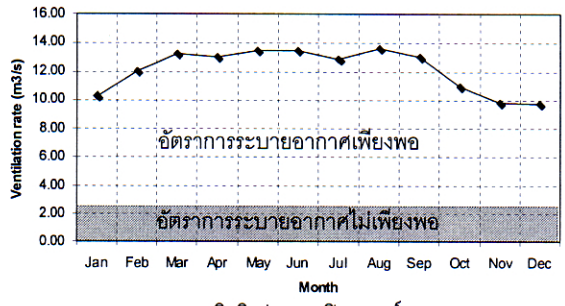
การาจี ประเทศปากีสถาน



ลอนดอน ประเทศอังกฤษ

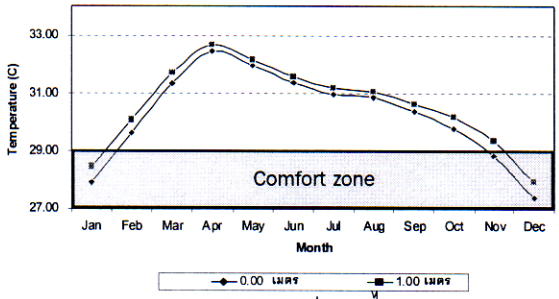


ซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย

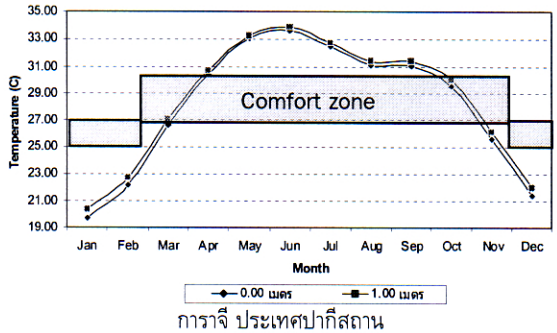


เฮลซิงกิ ประเทศฟินแลนด์

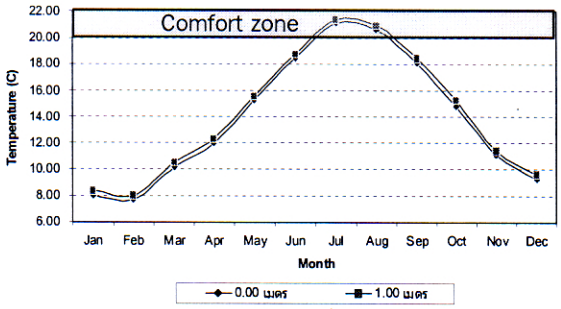
รูปที่ 9 อัตราการระบายอากาศในโถงเอเตรียมในแต่ละเมืองเทียบกับมาตรฐานอัตราการระบายอากาศต่ำสุดที่ยอมรับได้



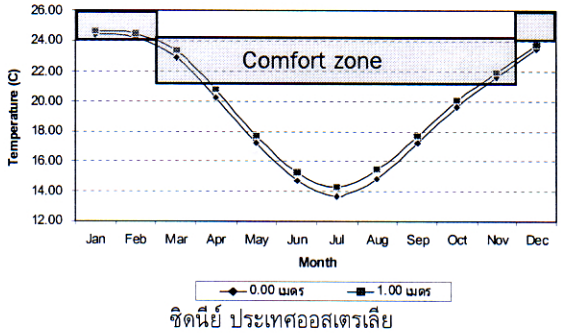
กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย



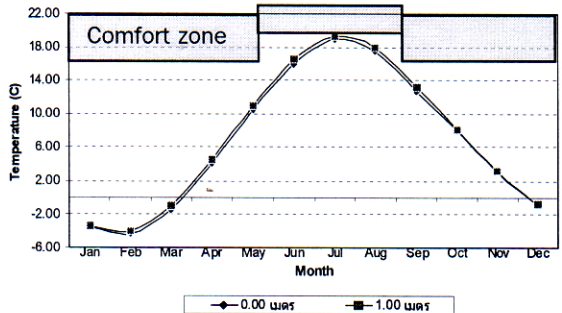
การาจี ประเทศปากีสถาน



ลอนดอน ประเทศอังกฤษ



ซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย



เฮลซิงกิ ประเทศฟินแลนด์

รูปที่ 10 อุณหภูมิในโถงเอเตรียมที่ระดับคนยืนเทียบกับอุณหภูมิในสภาวะน่าสบายของเมืองต่าง ๆ

กรุงเทพมหานครหรือเขตร้อนชื้น โดยไม่ต้องใช้ระบบการทำความเย็นระบบอื่นมาช่วย แต่สำหรับช่วงเดือนที่อยู่นอกขอบเขตสภาวะน่าสบาย ได้แก่ เดือนกุมภาพันธ์จนถึงเดือนตุลาคม เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่เกินขอบเขตสภาวะน่าสบายมาพิจารณา โดยเปรียบเทียบจากความต่างของอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกแล้วพบว่า เดือนเมษายนและพฤษภาคมมีอุณหภูมิภายในอาคารสูงเกินกว่าที่จะทำให้เข้าสู่สภาวะน่าสบายด้วยวิธีธรรมชาติได้ โดยเดือนที่สามารถใช้การระบายอากาศเพื่อลดอุณหภูมิในโถงเอเตรียมได้ คือ เดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และตุลาคม

สำหรับเมืองการาจี ช่วงเดือนมีนาคมและตุลาคมเป็นช่วงเดือนที่อยู่ในเขตสบาย โดยไม่ต้องใช้ระบบการทำความเย็นระบบอื่นมาช่วย ซึ่งจะเห็นว่าเดือนที่อยู่ในเขตสบายจะเป็นช่วงเดือนในปลายฤดูหนาวก่อนขึ้นฤดูร้อน และช่วงเริ่มต้นฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ แต่สำหรับช่วงเดือนที่อยู่นอกขอบเขตสภาวะน่าสบาย ได้แก่ เดือนเมษายนจนถึงเดือนกันยายน เป็นช่วงฤดูร้อนและมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งเป็นช่วงเดือนที่อุณหภูมิสูงเกินไป และเดือนพฤศจิกายนจนถึงเดือนกุมภาพันธ์ เป็นช่วงเดือนในฤดูหนาวซึ่งเป็นช่วงเดือนที่อุณหภูมิต่ำเกินไป เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบจากค่าความต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกพบว่า เดือนพฤษภาคม มิถุนายน และกรกฎาคม มีอุณหภูมิภายในอาคารสูงเกินกว่าที่จะลดอุณหภูมิให้เข้าสู่สภาวะน่าสบายด้วยวิธีธรรมชาติได้ เดือนที่สามารถแก้ไขช่องเปิดเพื่อให้อุณหภูมิในโถงเอเตรียมลดลง ได้แก่ เดือนเมษายน สิงหาคม และกันยายน ส่วนเดือนที่สามารถแก้ไขช่องเปิดเพื่อให้อุณหภูมิในโถงเอเตรียมเพิ่มขึ้น ได้แก่ เดือนพฤศจิกายนจนถึงเดือนกุมภาพันธ์

สำหรับกรุงลอนดอน ในช่วงเดือนกรกฎาคมและสิงหาคม เป็นช่วงเดือนที่อยู่ในเขตสบาย ซึ่งสามารถนำการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติวิธีนี้มาใช้กับอาคารโถงเอเตรียมโดยที่ไม่ต้องใช้ระบบการทำความเย็นระบบอื่นมาช่วย ซึ่งจะเห็นว่าเดือนที่เข้าเขตสบายจะเป็นช่วงเดือนในฤดูร้อน แต่สำหรับช่วงเดือนที่อยู่นอกขอบเขตสภาวะน่าสบาย ได้แก่ เดือนมกราคมจนถึงมิถุนายน และกันยายนถึงธันวาคม เป็นช่วงเดือนในฤดูหนาวและฤดูใบไม้ผลิ

เมืองซิดนีย์ในช่วงเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม และพฤศจิกายน เป็นช่วงเดือนที่อยู่ในเขตสบาย ซึ่งสามารถนำการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติวิธีนี้มาใช้กับอาคารโถงเอเตรียมได้ โดยที่ไม่ต้องใช้ระบบการทำความเย็นระบบอื่นมาช่วย ซึ่งจะเห็นว่าเดือนที่เข้าเขตสบายจะเป็นช่วง

เดือนในฤดูร้อนเช่นเดียวกับลอนดอน แต่สำหรับช่วงเดือนที่อยู่นอกขอบเขตสภาวะน่าสบาย ได้แก่ เดือนเมษายนถึงตุลาคม และธันวาคม เนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำเกินไป สำหรับเมืองเฮลซิงกิ จะเห็นว่าไม่มีช่วงเวลาใดเลยที่อยู่ในเขตสบาย พบว่าทุกเดือนมีอุณหภูมิต่ำเกินไป ซึ่งจะต้องหาแนวทางแก้ไขต่อไป

4.2.1 การแก้ไขค่าอุณหภูมิโดยการปรับเปลี่ยนขนาดช่องเปิด

การที่จะทราบว่าพื้นที่ช่องเปิดควรจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงมากน้อยเพียงใดนั้น สามารถคำนวณได้โดยแทนค่าอัตราการระบายอากาศลงไปในสมการ (5) ผลที่ได้พบว่าพื้นที่ช่องเปิดควรที่จะปรับเพิ่มขึ้นจากเดิม ซึ่งจะเปลี่ยนไปไม่เท่ากันในแต่ละเดือนของแต่ละเมือง

สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้นั้น จะต้องมีการกำหนดพื้นที่ช่องเปิดใดช่องเปิดหนึ่งก่อน เพื่อที่จะหาพื้นที่ช่องเปิดอีกช่องหนึ่งได้ มีข้อสังเกตว่า หากกำหนดขนาดช่องเปิดในที่ระดับต่ำกว่าที่มีพื้นที่มากที่สุดคือ 28 ตารางเมตรแล้ว สำหรับกรุงเทพมหานคร เดือนที่มีพื้นที่ช่องเปิดที่ระดับสูงกว่าไม่เพียงพอที่จะขยายได้ อันเนื่องมาจากการกำหนดพื้นที่ช่องเปิดที่จะขยายได้มากที่สุดคือ 42 ตารางเมตร คือเดือนมีนาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม กันยายน และกรกฎาคม มีเพียงเดือนกุมภาพันธ์และตุลาคม ที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดช่องเปิดได้ ส่วนเมืองการาจี เดือนที่มีพื้นที่ช่องเปิดที่ระดับสูงกว่าไม่เพียงพอที่จะขยายได้ อันเนื่องมาจากการกำหนดพื้นที่ช่องเปิดที่จะขยายได้มากที่สุดคือ 42 ตารางเมตร คือเดือนสิงหาคมและเดือนกันยายน มีเพียงเดือนเมษายน พฤศจิกายน ธันวาคม มกราคม และกุมภาพันธ์ที่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดช่องเปิดในระดับที่สูงกว่าได้ สำหรับเมืองอื่นสามารถหาค่าพื้นที่ได้ในลักษณะเดียวกัน

4.2.2 การปรับปรุงอุณหภูมิโดยการติดตั้งแผงกันแดด

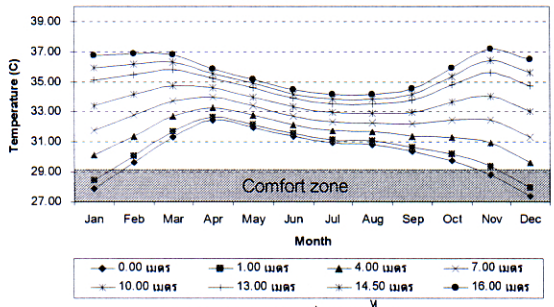
การติดตั้งแผงกันแดดเป็นการลดปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบลงผนังกระจกของโถงเอเตรียม ดังนั้นจึงเป็นการลดแรงผลักดันอากาศภายในที่จะเคลื่อนออกสู่ภายนอกทางช่องเปิดที่ระดับสูงกว่า เนื่องจากอาคารโถงเอเตรียมหันด้านที่รับแดดไปยังทิศใต้ แผงกันแดดที่เหมาะสมที่สามารถกันแดดได้ผลดีคือ แผงกันแดดแนวนอน (horizontal overhangs) โดยยกตัวอย่างการออกแบบแผงกันแดดแนวนอนบริเวณทางเข้าอาคาร ขนาดกว้าง 3 เมตร และยาว 14 เมตร และเพิ่มแผงกันแดดบริเวณด้านบนสุดของด้านนอกโถง ขนาดกว้าง 5 เมตร และยาว 14 เมตร จากการคำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีอาทิตย์ผ่านผนังกระจกแนวตั้งด้านทิศใต้ของโถงเอเตรียม โดยใช้โปรแกรม DOE-2 ยกตัวอย่างเมืองที่ต้องการเพิ่มอุณหภูมิ ผลจากการหาค่าเฉลี่ยทางสถิติพบว่า ปริมาณการแผ่รังสีอาทิตย์มีค่าน้อยลงเมื่อเทียบกับปริมาณการแผ่รังสีอาทิตย์ในโถงเอเตรียมที่ไม่มีการติดตั้งแผงกันแดด ทำให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลง แต่จากการพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้พบว่า การลดปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ส่องลงผนังกระจกแนวตั้งด้านทิศใต้นั้นจะให้ผลทางด้านการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยมาก

4.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิในโถงเอเตรียมที่ระดับชั้นต่าง ๆ

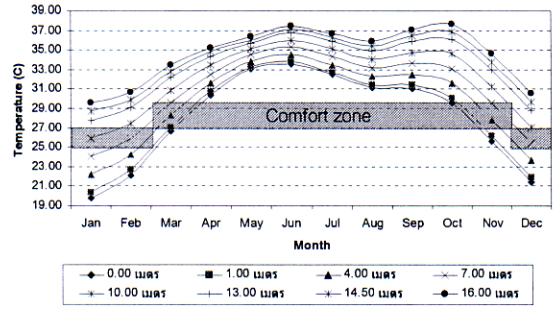
นอกเหนือจากระดับพื้นที่ใช้งานในระดับคนยืนปกติหรือสูงจากพื้น 2 เมตร คือพื้นที่ที่อยู่สูงขึ้นไป เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในระดับต่าง ๆ เทียบกับขอบเขตสภาวะน่าสบายในแต่ละเมือง จะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 11

แนวโน้มของกรุงเทพมหานคร ในช่วงเวลาที่สามารถใช้งานได้คือช่วงต้นปีและปลายปี ซึ่งเป็นช่วงเวลาในฤดูหนาว คือ เดือนมกราคม พฤศจิกายน และธันวาคม ซึ่งแต่ละเดือนจะใช้งานได้ดีในแต่ละระดับความสูงต่างกัน ส่วนเดือนอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากนี้ไม่สามารถใช้งานได้ เมื่อดูแนวโน้มของการเพิ่มอุณหภูมิที่ระดับชั้นต่าง ๆ ในแต่ละเดือนพบว่า ถึงแม้ช่วงเดือนมกราคมและธันวาคมจะมีอุณหภูมิต่ำ แต่แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในที่ระดับสูงขึ้นไปจะเพิ่มเร็วกว่าช่วงเดือนในฤดูร้อนและฤดูฝน เช่น เดือนกรกฎาคม อุณหภูมิที่ระดับสูงสุดของโถงเอเตรียม มีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิที่ระดับสูงสุดของโถงเอเตรียมในเดือนมกราคมและธันวาคม ดังนั้นจึงควรมีการคำนึงถึงเรื่องนี้ด้วย หากมีกิจกรรมที่ต้องการใช้พื้นที่สูงกว่าในระดับคนยืน ช่วงเดือนมกราคม พฤศจิกายน และธันวาคมจะสามารถใช้งานได้ แนวทางในการแก้ไขเพื่อลดอุณหภูมิลงจะต้องเพิ่มช่องเปิดให้กว้างขึ้น หรือมีการจำกัดจำนวนคนในพื้นที่นั้น ๆ เมื่อพิจารณาการใช้งานในบริเวณที่มีระเบียงยื่นออกมาพบว่า ไม่มีระเบียงชั้นใดและช่วงเวลาใดเลยที่คนใช้งานแล้วรู้สึกสบาย ซึ่งคนจะรู้สึกร้อนเกินไป หากต้องการใช้งานบริเวณระเบียงที่ยื่นออกมาจะต้องลองขยายช่องเปิดให้กว้างเต็มความกว้างของอาคาร

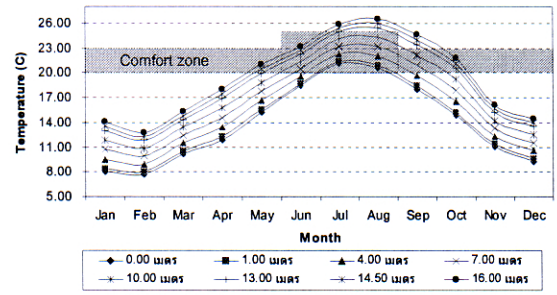
แนวโน้มของเมืองการาจี ในช่วงเวลาที่สามารถใช้งานได้ คือช่วงต้นปีและปลายปี ซึ่งเป็นช่วงเวลาในฤดูหนาว คือ เดือนมกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม ตุลาคม พฤศจิกายน และธันวาคม ซึ่งแต่ละเดือนจะใช้งานได้ดีในแต่ละระดับความสูงต่างกัน ส่วนเดือนอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากนี้ไม่สามารถใช้งานได้ เมื่อดูแนวโน้มของการเพิ่มอุณหภูมิที่ระดับชั้น



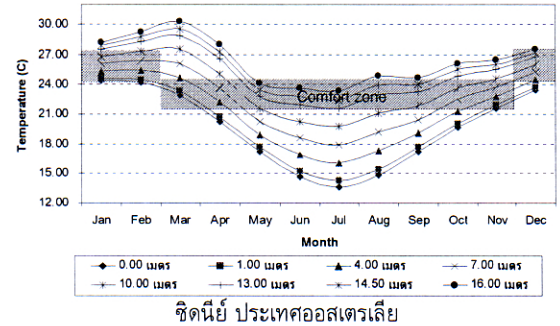
กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย



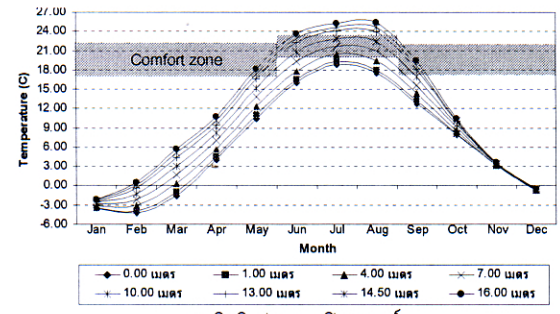
การาจี ประเทศปากีสถาน



ลอนดอน ประเทศอังกฤษ



ซิดนีย์ ประเทศออสเตรเลีย



เฮลซิงกิ ประเทศฟินแลนด์

รูปที่ 11 ค่าอุณหภูมิที่ได้ที่ระดับต่าง ๆ ในโถงเอเตรียมเทียบกับขอบเขตสภาวะน่าสบาย

ต่าง ๆ ในแต่ละเดือนพบว่า ช่วงเดือนในฤดูร้อนจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ระดับชั้นต่าง ๆ ต่ำกว่าช่วงเดือนในฤดูหนาว เมื่อเทียบกับกรุงเทพมหานคร จะพบว่าต่างกันตรงที่แนวโน้มของอุณหภูมิในระดับสูงสุดของเมืองการาจีในฤดูร้อนยังคงสูงกว่าในฤดูหนาว สาเหตุมาจากอุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกของเมืองการาจี ซึ่งระหว่างฤดูร้อนและฤดูหนาวมีค่าต่างกันมาก อุณหภูมิที่ระดับชั้นสูงสุดในฤดูหนาวจึงสูงได้ไม่เท่าอุณหภูมิที่ระดับสูงสุดในฤดูร้อน หากมีการจัดกิจกรรมที่ต้องการใช้พื้นที่ที่สูงกว่าในระดับคนยืน มีเพียงเดือนมีนาคมที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งแนวทางในการแก้ไขเพื่อลดอุณหภูมิลง จะต้องเพิ่มช่องเปิดให้กว้างขึ้น และเพิ่มอุณหภูมิให้มากขึ้นโดยการปรับลดพื้นที่ช่องเปิดให้น้อยลง หรือมีการจำกัดจำนวนคนในพื้นที่นั้น ๆ เมื่อพิจารณาการใช้งานในบริเวณที่มีระเบียงยื่นออกมาพบว่า เดือนมกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม พฤศจิกายน และธันวาคม สามารถใช้งานได้ หากต้องการใช้งานบริเวณระเบียงที่ยื่นออกมามากขึ้น จะต้องพิจารณาถึงการเพิ่มช่องเปิดให้กว้างขึ้น ถ้าต้องการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงเดือนที่อุณหภูมิต่ำเกินไปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาจพิจารณาการลดพื้นที่ช่องเปิดไปพร้อม ๆ กับ การเพิ่มแผงกันแดดด้วย

แนวโน้มของกรุงลอนดอน ในช่วงเวลาที่สามารถใช้งานได้คือช่วงกลางปี ซึ่งเป็นช่วงเวลาในฤดูใบไม้ผลิและฤดูร้อน คือ เดือนพฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม และกันยายน ซึ่งแต่ละเดือนจะใช้งานได้ดีในแต่ละระดับความสูงต่างกัน ส่วนเดือนอื่น ๆ ที่นอกเหนือจากนี้ไม่สามารถใช้งานได้ หากมีการจัดกิจกรรมที่ต้องการใช้พื้นที่ที่สูงกว่าในระดับคนยืนพบว่า เดือนกรกฎาคมและสิงหาคม สามารถใช้งานได้โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนช่องเปิด เดือนอื่น ๆ อาจแก้ไขโดยลดขนาดช่องเปิดให้มีพื้นที่น้อยลง เดือนที่สามารถใช้งานได้ในบริเวณที่มีระเบียงยื่นออกมา ได้แก่ เดือนพฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม และสิงหาคม หากต้องการใช้งานบริเวณระเบียงที่ยื่นออกมามากขึ้น จะต้องลดช่องเปิดให้มีพื้นที่น้อยลง ถ้าต้องการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงเดือนที่อุณหภูมิต่ำเกินไปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาจพิจารณาการลดพื้นที่ช่องเปิดไปพร้อม ๆ กับการเพิ่มแผงกันแดดด้วย

แนวโน้มของเมืองซิดนีย์ ทุกเดือนสามารถใช้งานได้ ซึ่งแต่ละเดือนจะใช้งานได้ดีในแต่ละระดับความสูงต่างกัน หากมีการจัดกิจกรรมที่ต้องการใช้พื้นที่ที่สูงกว่าในระดับคนยืน พบว่าเดือนที่สามารถใช้งานได้ดี คือ ช่วงเดือนมกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม และธันวาคม เดือนอื่น ๆ อาจแก้ไขโดยลดขนาดช่องเปิดให้มีพื้นที่น้อยลง ถ้าต้องการเพิ่มอุณหภูมิ

ในช่วงเดือนที่อุณหภูมิต่ำเกินไปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาจพิจารณาการลดพื้นที่ช่องเปิดไปพร้อม ๆ กับ การเพิ่มแผงกันแดดด้วย เมื่อพิจารณาการใช้งานบริเวณที่มีระเบียงยื่นออกมาพบว่า ทุกเดือนสามารถใช้งานได้

แนวโน้มของเมืองเฮลซิงกิ ในช่วงเวลาที่สามารถใช้งานได้ คือช่วงกลางปี ซึ่งเป็นช่วงเวลาในฤดูร้อน คือ เดือนพฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม และกันยายน ซึ่งแต่ละเดือนจะใช้งานได้ดีในแต่ละระดับความสูงต่างกัน หากมีการจัดกิจกรรมที่ต้องการใช้พื้นที่ที่สูงกว่าในระดับคนยืน จะต้องมีการปรับลดอุณหภูมิในโถงให้เข้าเขตสบายก่อน เนื่องจากไม่มีเดือนใดเลยที่สามารถใช้งานได้ อาจแก้ไขโดยการลดพื้นที่ช่องเปิด เดือนที่สามารถใช้งานได้บริเวณที่มีระเบียงยื่นออกมา ได้แก่ เดือนพฤษภาคม มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม และกันยายน ถ้าต้องการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงเดือนที่อุณหภูมิต่ำเกินไปให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อาจพิจารณา การลดพื้นที่ช่องเปิดไปพร้อม ๆ กับการเพิ่มแผงกันแดดด้วย

5. สรุปผลการนำไปประยุกต์ใช้

5.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระดับคนยืน

เมื่อพิจารณาการแก้ไขเพิ่มลดช่องเปิดพบว่า การเพิ่มพื้นที่ช่องเปิดเพื่อลดอุณหภูมิในโถงเอเตรียมไม่สามารถทำได้ทุกเดือน แต่การลดพื้นที่ช่องเปิดเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในโถงเอเตรียมสามารถทำได้ทุกเดือน ซึ่งจะเห็นว่าการลดอุณหภูมินั้นยากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิ แต่ทั้งนี้ การเพิ่มอุณหภูมิจะต้องพิจารณาถึงพื้นที่ที่คำนวณได้จากสมการแสดงความสัมพันธ์ของช่องเปิดด้วย โดยในเดือนที่ต้องลดพื้นที่ช่องเปิดอาจต้องพิจารณาถึงขนาดช่องเปิดที่สามารถทำการปรับเปลี่ยนได้จริง เนื่องจากบางเดือนพื้นที่ช่องเปิดที่คำนวณได้มีน้อยเกินไปจนไม่สามารถปรับเปลี่ยนขนาดช่องเปิดได้

สำหรับวิธีการปรับปรุงโดยการติดตั้งแผงกันแดดภายนอกอาคารพบว่า ทำให้อุณหภูมิในโถงเอเตรียมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการปรับเพิ่มหรือลดขนาดช่องเปิด ดังนั้น การติดตั้งแผงกันแดดจึงเหมาะที่จะใช้ควบคู่กับการลดขนาดช่องเปิดเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในโถงเอเตรียมให้มากขึ้น ซึ่งจะต้องพิจารณาเป็นกรณีไป

5.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ระดับชั้นต่าง ๆ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 11 พบว่า อุณหภูมิที่ระดับความสูงต่าง ๆ ในโถงเอเตรียมในแต่ละเมืองนั้นมีความแตกต่างกัน และเมื่อเทียบกับอุณหภูมิในสภาวะน่าสบายของแต่ละเมืองพบว่า มีบางเดือนที่สามารถใช้งานได้ บางเดือนใช้งานไม่ได้ เพราะอุณหภูมิสูงเกินไปหรือต่ำเกินไป หรือในเดือนเดียวกันที่ระดับหนึ่งอาจใช้งานได้ ในขณะที่อีกระดับหนึ่งอาจใช้งานไม่ได้ จึงสามารถสรุปได้ว่า การออกแบบโถงเอเตรียมที่มีการระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติให้เหมาะสมกับสภาพอากาศแต่ละเขตสภาพอากาศนั้นมีวิธีการที่ไม่เหมือนกัน โถงเอเตรียมที่มีการออกแบบที่เหมาะสมกับสภาพอากาศของกรุงเทพมหานครจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้กับโถงเอเตรียมที่ตั้งในเมืองการาจี ลอนดอน ซิดนีย์ และเฮลซิงกิ เนื่องจากอยู่ในเขตสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน

5.3 ข้อเสนอแนะการนำไปประยุกต์ใช้

นอกเหนือจากปัจจัยทางสภาวะแวดล้อม ได้แก่ ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบผนังกระจกแนวตั้งของโถงเอเตรียม อุณหภูมิอากาศภายนอกโถงเอเตรียม และปัจจัยทางกาย ได้แก่ ลักษณะของโถงเอเตรียม เช่น ขนาดช่องเปิดและความสูงของอาคารแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่อยู่นอกเหนือการควบคุมของผู้ออกแบบคือ จำนวนคนที่อยู่ภายในอาคาร การพิจารณาถึงจำนวนคนที่อยู่ในโถงเอเตรียม เป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่ง สำหรับการระบายอากาศด้วยวิธีนี้ เนื่องจากปริมาณความร้อนจากคนมีผลต่อการผลักดันการระบายอากาศภายในโถงได้มาก แต่การเข้าออกของคนในโถงนั้นไม่สามารถการควบคุมได้ ดังนั้น การพิจารณาถึงจำนวนคนเฉลี่ยในการเข้าออกอาคารในแต่ละเดือน จึงเป็นตัวแปรหนึ่งในการนำมาปรับใช้เพื่อช่วยให้ระบบนี้ใช้งานได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

สำหรับช่วงเดือนที่ไม่สามารถใช้งานได้ เนื่องจากโถงเอเตรียมมีอุณหภูมิสูงเกินไป อย่างเช่น กรุงเทพมหานคร หรือเมืองการาจี มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานกลในรูปแบบอื่นเข้ามาช่วย เช่น การใช้พัดลมดูดอากาศหรือการติดเครื่องปรับอากาศ แต่หากใช้วิธีการลดอุณหภูมิด้วยวิธีธรรมชาติอย่างถูกต้องแล้ว จะสามารถช่วยลดปริมาณการใช้พลังงานได้ด้วยเช่นกัน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีและการทดลองที่สภาวะสมดุล แต่ในสภาพจริงจะพบว่าอุณหภูมิอากาศภายในอาคารจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายนอก ดังนั้น ทฤษฎีนี้

จะใช้ได้เฉพาะกับการเปลี่ยนแปลงของอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงสะสมเฉลี่ยเป็นรายเดือนหรือรายปี เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงโดยรวม หากต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศภายในอาคารทุก ๆ ขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

5.4 ข้อเสนอแนะอื่น ๆ

นอกจากนี้ยังมีตัวแปรด้านความสูงของโถงเอเตรียมซึ่งมีผลต่ออุณหภูมิภายในโถงเช่นกัน สำหรับความเป็นจริงนับเป็นเรื่องยากที่จะเพิ่มหรือลดความสูงของอาคารที่สร้างไว้แล้ว แต่วิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยได้คือ การเพิ่มช่องเปิดในตำแหน่งอื่นของโถง เพื่อที่จะสามารถปรับความสูงได้ตามความเหมาะสม

ในกรณีที่ต้องการเปิดช่องเปิดมากกว่า 2 ระดับหรือหากต้องการต่อเติมห้องอีกห้องหนึ่งเข้ามา โดยใช้หลักการเดียวกัน รูปแบบการศึกษาจะมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมซึ่งจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติม

ภาคผนวก

ตัวแปรและค่าคงที่ที่ใช้ในสมการ

Q_v = อัตราการไหลของอากาศ (m^3s^{-1})

g = แรงโน้มถ่วงของโลกเท่ากับ 9.81 ms^{-2}

∞ = ค่าคงที่การขยายตัวของความร้อนของน้ำเท่ากับ 0.294×10^{-3} K^{-1} และค่าคงที่การขยายตัวของความร้อนของอากาศเท่ากับ 3.50×10^{-3} K^{-1}

ρ = ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 996 kgm^{-3} และความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.20 kgm^{-3}

C_p = ความจุความร้อนของน้ำเท่ากับ 4,178 J/kg ˚C และความจุความร้อนของอากาศเท่ากับ 1,012 J/kg ˚C

A_1 = พื้นที่ช่องเปิดในที่ระดับต่ำกว่า (ประตู), (m^2)

A_2 = พื้นที่ช่องเปิดในที่ระดับสูงกว่า (หน้าต่าง), (m^2)

H_{hu} = ปริมาณความร้อนที่ปล่อยออกมาจากคนทั้งหมด, (W)

Q_H = ปริมาณความร้อนจากรังสีอาทิตย์ตามความสูง, (Wm^{-1})

h = ความสูงระหว่างช่องเปิดทั้งสองระดับ, (m)

H_s = ปริมาณความร้อนจากรังสีอาทิตย์ที่ส่องลงผนังกระจกทั้งหมด, (W)

ΔT = ความต่างอุณหภูมิระหว่างภายในและภายนอกอาคาร, (˚C)

T_1 = อุณหภูมิภายในอาคาร, (˚C)

T_2 = อุณหภูมิภายนอกอาคาร, (˚C)

รายการอ้างอิง (References)

[1] Tanabe, S., & Kimura, K. (1989). Importance of air movement for thermal comfort under hot and humid conditions. Proceedings of ASHRAE Far East Conference on Air Conditioning in Hot Climates, 95–103.

[2] ไพบูลย์ รักษาสุทธิพันธ์. (2537). การศึกษาผลของชั้นความร้อนในโถงที่มีความสูงโดยใช้หุ่นจำลอง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[3] ธนิต จินดาวณิค. (2540). สถาปัตยกรรมและเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

[4] Cooper, P., & Hunt, G. (1999). Ventilation and stratification in naturally ventilated spaces driven by heated internal vertical surfaces. Proceedings of HybVent Forum 1999.

[5] Chenvidyakarn, T., & Woods, A. W. (2004). The control of pre-cooled natural ventilation. Building Service Engineering Research & Technology, 25(2), 127–40.

[6] Chenvidyakarn, T. (2005). The impact of pre-cooling on multiple steady states in stack ventilation. Journal of Architectural/Planning Research and Studies, 3, 3–20.

[7] Yuguo, L. (2001). Integrating thermal stratification in natural and hybrid ventilation analysis. Department of mechanical engineering. The University of Hong Kong, Hong Kong SAR.

[8] CIBSE. (1988). CIBSE guide, vol. B: Installation and equipment data. St. Albans, UK: Staples Printers.