อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังเพื่อปรับปรุงสภาวะน่าสบายในอาคารกีฬาระดับสโมสร

วดียา เนตรพระ
นักศึกษาหลักสูตรสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสถาปัตยกรรม

ดร.พิมลศิริ ประจงสาร
อาจารย์ประจำภาควิชาสถาปัตยกรรม
คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอาคารสนามกีฬาระดับโรงเรียนหรือระดับสโมสรตามแบบมาตรฐานกรมพลศึกษา มีอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ใช้งานเพียง 9% ของพื้นที่ใช้งาน ซึ่งน้อยกว่ากฎหมายกำหนด (10% ของพื้นที่ใช้งาน) มีผลทำให้อัตราการระบายอากาศภายในอาคารต่ำ โดยเกณฑ์การออกแบบอาคารยิมเนเซียมได้จำกัดความเร็วลมภายในอาคารควรอยู่ที่ 0.1 m/s อีกทั้งเกณฑ์การระบายอากาศสำหรับยิมเนเซียมจะต้องมีอัตราการระบายอากาศในอาคาร 3 ACH จากอาคารกรณีศึกษาพบว่ามีอัตราการระบายอากาศเพียง 2-2.5 ACH ผนวกกับอาคารกรณีศึกษามักใช้หลังคาที่ปราศจากฉนวนกันความร้อนทำให้เกิดความร้อนสะสมใต้หลังคาไม่สามารถระบายออกไปได้ ซึ่งมีผลทำให้เกิดการแผ่ความร้อนลงสู่พื้นที่ใช้งานและเกิดความไม่สบายต่อผู้ใช้อาคาร การศึกษาชิ้นนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราส่วนต่อพื้นที่ผนัง (WWR) และรูปแบบการระบายอากาศ ที่สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศให้เป็นไปตามเกณฑ์ โดยไม่ทำให้ความเร็วลมมีค่าเกินเกณฑ์ (ไม่เกิน 0.1 เมตรต่อวินาที) การศึกษาใช้โปรแกรม Design Builder version 3.4.0041 เพื่อจำลองการไหลของอากาศ โดยเปรียบเทียบความเร็วลมเฉลี่ยในระดับพื้นที่ใช้งาน รวมถึงอัตราการระบายอากาศในอาคารที่มีรูปแบบการระบายอากาศ โดยใช้ลมเพียงอย่างเดียว (Wind driven ventilation) และการระบายอากาศโดยใช้ลมร่วมกับหลักการลอยตัวของอากาศ (Combined wind and stack ventilation) โดยมีอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง 10%-40% ทั้ง 3 ฤดู

ผลการศึกษาพบว่า อัตราการระบายอากาศโดยใช้ความแตกต่างของแรงดันอากาศร่วมกับความแตกต่างของอุณหภูมิ (Combined ventilation) โดยมีอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดอย่างน้อย 20% ของพื้นที่ผนัง สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศจากเดิม 2.5 ACH ในอาคารกรณีศึกษา เป็น 3.19 ACH ทั้งนี้การศึกษายังพบว่า การเพิ่มฉนวนกันความร้อน ประเภทโฟมโพลียูริเทน สามารถลออุณหภูมิพื้นที่ใช้งานมีอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยลดลง จากเดิม 34.4 °C เหลือ 32.7°C ซึ่งเข้าใกล้สภาวะสบายมากขึ้น อย่างไรก็ตาม สามารถนำงานวิจัยนี้ไปปรับใช้กับอาคารยิมเนเซียมได้ด้วยการใช้รูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดอย่างน้อย 20% และติดตั้งฉนวนกันความร้อนจะสามารถช่วยให้อุณหภูมิภายในอาคารลดลงได้

คำสำคัญ: อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง / การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ / ยิมเนเซียม /สภาวะน่าสบาย/ ความเร็วลม / อัตราการระบายอากาศ

Window to Wall Ratio to Improve Thermal Comfort in Club Gymnasium

Wadeeya Natepra
Master degree student in Architecture

Pimolsiri Prajongsan, Ph.D.
Faculty of Architecture, Silpakorn University

Abstract

Natural ventilation design for an indoor stadium is challenging. Due to the certain limitations of the air speed allowed in such buildings i.e. not more than 0.1 m/s, most school- or the club-level indoor stadiums in Thailand are designed with small window-to-floor area ratio, approximately 9%. However this rate is less than that required by Thailand building code i.e. 10%. This may lead to the insufficiency of the required indoor airflow rate for an indoor gymnasium with 7-8 metres height i.e. 3 ACH. Also poor indoor ventilation may result in high air temperature collecting under the roof which may lead to human discomfort. In this study two ventilation designs – *wind-driven ventilation* and *a combined wind and stack driven ventilation* with four WWRs, from 10% to 40%, were investigated for three seasons in terms of average indoor air temperature, indoor air velocity as well as airflow rate. The aims were to increase the indoor airflow rate while reduce the indoor average air temperature and, thus, human discomfort. Validated computational fluid dynamics (CFD) function in DesignBuilder simulation software was employed as the study main tool.

It was found that the combined wind and stack driven ventilation with the minimum WWR of 20% could effectively increase the indoor airflow rate from 2.5 ACH in a base case building to 3.19 ACH. Also installing roof insulation such as polyurethane could help reducing indoor air temperature from 34.4°C at noon in summer months to 32.7°C, which leads to indoor discomfort reduction.

Keywords: window to wall ratio / natural ventilation / indoor stadium / thermal comfort / wind speed / airflow rate

บทนำ

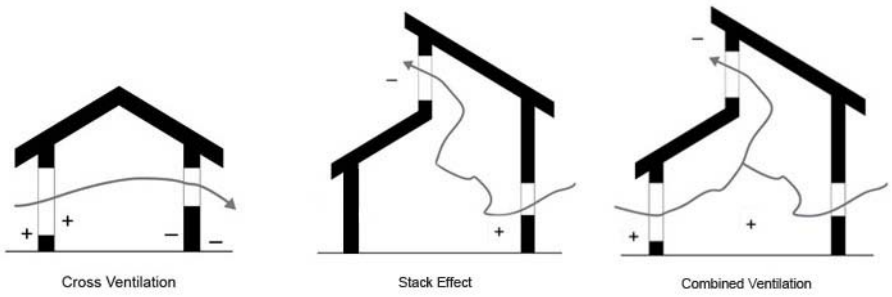
อาคารสนามกีฬาในร่มนั้นมีข้อจำกัดในเรื่องการระบายอากาศ กระแสลมที่เข้าสู่อาคารมีผลต่อการเล่นกีฬา ซึ่งในปัจจุบันอาคารสนามกีฬาในร่มระดับโรงเรียนหรือการแข่งขันระดับสโมสร จะออกแบบให้พื้นที่ช่องเปิดน้อย เนื่องจากไม่ต้องการให้กระแสลมส่งผลกระทบต่อการแข่งขันหรือการฝึกซ้อม โดยความเร็วลมไม่ควรเกิน 0.1 m/s ที่ระดับความสูง 1.00 เมตร ในประเภทกีฬาแบดมินตันและกีฬาเทเบิลเทนนิส และจะต้องมีอัตราการระบายอากาศ 3 ACH ขึ้นไป (Geraint John and Kit Campbell, 1995) เป็นเรื่องยากในการควบคุมลมธรรมชาติ ทำให้อาคารกีฬาในร่มถูกออกแบบให้มีพื้นที่ช่องเปิดมีเพียง 9% ของพื้นที่ใช้งาน ซึ่งต่ำกว่าที่กฎหมายกำหนดไว้ 10% ส่งผลให้อัตราการระบายอากาศต่ำกว่าเกณฑ์ จึงทำให้การแลกเปลี่ยนอากาศภายในอาคารกีฬาในร่มไม่เพียงพอหรืออาจเกิดสภาวะอากาศนิ่ง นอกจากนี้อาคารกีฬาในร่มยังมีพื้นที่หลังคามาก มุมเอียงต่ำทำให้ได้รับความร้อนโดยตรง รวมทั้งไม่มีการติดตั้งฉนวนกันความร้อน ทำให้อุณหภูมิใต้หลังคาสูงขึ้น เกิดการสะสมความร้อนใต้หลังคาจนกระทั่งแผ่ลงสู่พื้นที่ใช้งาน อาจทำให้เกิดความไม่สบายต่อผู้ใช้อาคาร จากการศึกษางานวิจัยพบว่า ผู้ที่ใช้บริการอาคารกีฬาในร่มโดยเฉลี่ยแล้วส่วนใหญ่ มีความรู้สึกว่าสภาพอากาศร้อนมากและไม่ยอมรับสภาพอากาศที่เป็นอยู่ และปรารถนาให้สภาพอากาศเย็นลง (ทิพย์คนึง กุลลาวัณย์, 2553)

อาคารสนามกีฬาในร่มระดับสโมสร จะมีลักษณะอาคารเป็นโครงสร้างพาดยาว (Truss) และใช้แผ่นหลังคาเหล็กรีดลอน (Metal sheet) ไม่ติดตั้งฉนวนกันความร้อน มีความสูง 9-10 เมตร มีช่องเปิดด้านข้างระดับเหนือศีรษะเพื่อหลีกเลี่ยงกระแสลมโดยตรง ปัจจุบันจากการสำรวจเบื้องต้นพบว่าปัญหาด้านการระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติภายในอาคารยิมเนเซียมยังไม่ได้รับการแก้ไขเท่าที่ควร ซึ่งได้มีการส่งเสริมกีฬาตามนโยบายของรัฐบาล แผนพัฒนากีฬาแห่งชาติ ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2545–2549) มีจุดมุ่งหมายที่จะส่งเสริมการพัฒนาความเป็นเลิศทางการกีฬาและส่งเสริมสุขพลานามัย มุ่งเน้นไปที่เด็กและเยาวชนเป็นหลักทั้งในระบบโรงเรียนและนอกโรงเรียน การระบายอากาศและเพิ่มความสบายเป็นผลโดยตรงต่อผู้เล่นกีฬาและเยาวชน จึงถือว่าเป็นสิ่งสำคัญที่ควรปรับแก้ไข

โดยมีปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะน่าสบาย 2 ด้าน คือความสบายทางการระบายอากาศ และความสบายทางอุณหภูมิ โดยความสบาย การระบายอากาศ และการไหลเวียนอากาศเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อสภาวะน่าสบาย สิ่งสำคัญที่เป็นปัจจัยหลักของสภาวะน่าสบายทางการระบายอากาศ คือ ความเร็วลมที่พัดผ่านผิวสัมผัส (Wind speed) และอัตราการระบายอากาศ (Ventilation rate) (วรสันต์ ชื่นชีพ, 2548) จึงจำเป็นที่อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศใหม่กับภายนอกควรเพียงพอต่อความต้องการ แน่นอนว่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศส่งผลโดยตรงต่อสุขภาพของผู้ใช้อาคาร เนื่องจาก กลิ่นอับและความรู้สึกนิ่งค้างของอากาศเก่าภายในอาคารจะทำให้รู้สึกอึดอัดและไม่สบาย ทั้งนี้จะต้องพิจารณาทั้งกรณีที่เปิด-ปิดช่องเปิดอาคาร และอัตราพื้นที่ช่องเปิดด้วย ความสบายทางอุณหภูมินั้นสามารถทำได้โดยการใช้ Passive cooling ซึ่งการใช้หลักการออกแบบ Passive cooling นี้มีความเหมาะสมกับอาคารในเขตร้อนชื้น 5 วิธีด้วยกัน ได้แก่ การหันทิศทางอาคารให้เหมาะสม (Orientation and spatial organisation) การออกแบบช่องเปิดหรือแผงบังแดด (Opening and shading) การใช้ฉนวนกันความร้อน เลือกใช้วัสดุ สีของวัสดุ และพื้นที่ผิวของวัสดุที่เหมาะสม (Insulation, materials, colours and textures) การระบายอากาศธรรมชาติ (Natural

ventilation) และการใช้พืชพันธุ์หรือต้นไม้ (Vegetation) (Torwong Chenvidyakarn, 2013) โดยอาคารยิมเนเซียมมีหลังคาเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้น การเพิ่มฉนวนกันความร้อนใต้หลังคาจึงเป็นอีกหนึ่งวิธีที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงอาคารยิมเนเซียม โดยฉนวนกันความร้อน โฟมโพลียูริเทน (Foam-polyuretane) เป็นฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสมกับอาคารประเภท โรงงาน คลังสินค้า มีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่สามารถลดการแผ่รังสีและการนำความร้อนได้ดี สามารถเกาะติดแน่นผิวหลังคาเหล็กได้ดี สามารถกำหนดความหนาได้ตามต้องการ ฉีดติดแผ่นโลหะหรือ Metal sheet ได้ดี ติดตั้งง่าย ประหยัดเวลาและค่าติดตั้งอีกด้วย

การระบายอากาศธรรมชาติภายในอาคารมี 3 รูปแบบ คือ 1.การระบายอากาศแบบพัดผ่านตลอด (Cross ventilation) เป็นการระบายอากาศจากที่หนึ่งไปสู่อีกที่หนึ่งโดยอาศัยการเจาะช่องเปิด 2 ช่องขึ้นไปเพื่อให้เกิดแรงดันอากาศที่แตกต่างกันแล้วเกิดการถ่ายเทอากาศภายใน 2. การระบายอากาศแบบหลักการลอยตัว (Stack effect) เป็นการระบายอากาศโดยอาศัยแรงขับเคลื่อนจากความแตกต่างระหว่างความดันอากาศ เนื่องมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในอาคาร ที่สูงกว่าภายนอกอาคาร โดยอากาศร้อนภายในอาคารจะลอยขึ้นที่สูง แล้วอากาศเย็นภายนอกที่อุณหภูมิต่ำกว่าจะไหลเข้ามาแทนที่ และ 3. การระบายอากาศร่วมกัน (Combined ventilation) เป็นการทำงานรวมกันของ Cross Ventilation หรือ Wind driven และ Stack effect ซึ่งสามารถทำให้เกิดการระบายอากาศได้มากขึ้น



ภาพที่ 1: แสดงวิธีการระบายอากาศธรรมชาติ 3 รูปแบบ

ที่มา: CABE. (2014). **Ventilating the house.**

ข้อดีของการระบายอากาศแบบ Stack effect คือ ทำให้เกิดการระบายอากาศภายในอาคาร แม้ว่าความเร็วลมภายนอกอาคารตามธรรมชาติจะไม่เอื้อต่อการระบายอากาศก็ตาม (สุพจน์ ปริญญาเปรื่อง, 2553) อีกทั้งการเพิ่มช่องเปิดที่หลังคาหรือปล่องระบายอากาศ มีศักยภาพในการระบายอากาศ และการใช้ช่องเปิดที่หลังคาและช่องเปิดด้านข้างด้วย (Combined ventilation) สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศให้ดีขึ้นได้ (Esteban J. Baeza, 2012) ซึ่งอาคารกรณีศึกษานี้ได้พบปัญหาในเรื่องความเร็วลมภายนอกอาคารต่ำ ทำให้การใช้ Combined ventilation อาจช่วยเพิ่มการระบายอากาศให้ภายในอาคารอีกหนึ่งรูปแบบ ดังนั้นหากสามารถทำให้อุณหภูมิลดลง แก้ปัญหาด้วยการ

ติดตั้งฉนวนกันความร้อน เพื่อลดความร้อนภายในอาคารและระบายอากาศวิธีธรรมชาติเพื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศให้เพียงพอต่อความต้องการและหลักเกณฑ์จะสามารถช่วยให้ลดสภาวะอากาศนิ่ง และเพิ่มความสบายต่อผู้ใช้อาคารได้

จึงต้องการศึกษาแนวทางการปรับปรุงช่องเปิดและรูปแบบการระบายอากาศเพื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศ และแก้ไขปัญหาความร้อนภายในอาคารสนามกีฬาในร่ม โดยทำให้อุณหภูมิใต้หลังลดลงเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งาน เพื่อให้ผู้ใช้อาคาร ฝึกซ้อมหรือแข่งขันกีฬาได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษารูปแบบการระบายอากาศและอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศภายในอาคาร
2. ศึกษาแนวทางการลดอุณหภูมิบริเวณใต้หลังคา เพื่อช่วยเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งาน

วิธีการวิจัย

วิจัยนี้ เป็นวิจัยเชิงทดลอง (Experiment research) เพื่อหารูปแบบการระบายอากาศและอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดเพื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศให้กับอาคารยิมเนเซียม และศึกษาแนวทางการลดอุณหภูมิใต้หลังคา โดยแบ่งวิธีการดำเนินงาน ดังนี้

1. คัดเลือกอาคารยิมเนเซียมกรณีศึกษา

การเลือกอาคารยิมเนเซียมกรณีศึกษา จะคัดเลือกจากอาคารที่เป็นแบบมาตรฐานยิมเนเซียมของทางกรมพลศึกษาโดยตรง ซึ่งอาคารกรณีศึกษานี้ ได้นำไปสร้างจริงทั้งหมด 3 จังหวัดด้วยกัน คือ เชียงใหม่ อุทัยธานี และศรีสะเกษ และจังหวัดที่ได้รับผลกระทบเรื่องระบายอากาศ และอุณหภูมิ คือจังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จึงได้เลือกอาคารของจังหวัดศรีสะเกษ เป็นอาคารกรณีศึกษา โดยอาคารยิมเนเซียมนี้ เป็นที่ตั้งอยู่ในโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ

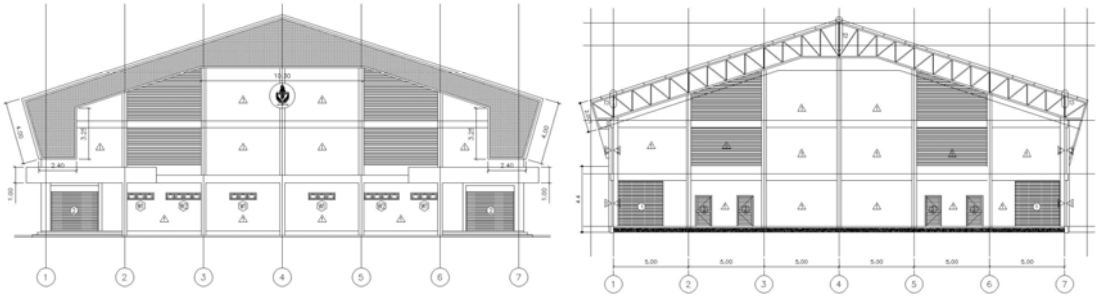
2. รวบรวมข้อมูลอาคารกรณีศึกษา

เพื่อสำรวจปัญหาที่เกิดขึ้นของอาคารยิมเนเซียมที่เป็นไปตามจริง และเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการตรวจสอบความคลาดเคลื่อน (Validation) ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 รวบรวมภาพรวมอาคารกรณีศึกษา ทั้งภายนอก และภายในอาคาร ซึ่งมีขนาดกว้าง 30 เมตร ยาว 50 เมตร และสูง 11 เมตร ตามมาตรฐานอาคารยิมเนเซียม

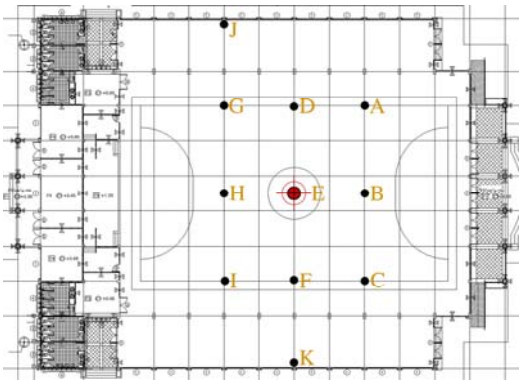
ภาพที่ 2: แสดงภาพรวมอาคารกรณีศึกษาทั้งภายนอก และภายในอาคาร

2.2 แบบมาตรฐานจากกรมพลศึกษา ประกอบไปด้วย ผังพื้น รูปตัด และรูปด้าน



ภาพที่ 3: แสดงแบบมาตรฐานจากกรมพลศึกษา รูปด้าน และรูปตัด

2.3 วัดอุณหภูมิอากาศภายนอก อุณหภูมิภายใน ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมจากอาคารจริง ซึ่งจะวัดตามจุด Grid และวัดที่จุดกึ่งกลางของอาคาร (Center point) ซึ่งจะวัดในส่วนพื้นที่กิจกรรมเป็นหลัก เนื่องด้วยเป็นกิจกรรมการเล่นกีฬาในลักษณะยืน จึงวัดที่ความสูงจากพื้น 1.00 เมตร ได้ทำการรวบรวมข้อมูลในวันที่ 26 กันยายน และ 29 กันยายน โดยวัดในช่วงเวลาที่ทำการเรียนการสอนทุกๆ 2 ชั่วโมง 8.30, 10.30, 12.30, 14.30 และ 16.30 น.



ภาพที่ 4: แสดงตำแหน่งวัด

เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล

- เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม TSI VelociCalc

- โปรแกรม Design Builder Version 3.4.0041 เป็นโปรแกรมคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยตั้งค่าตามจริงให้ใกล้เคียงกับอาคารกรณีศึกษา โดยกำหนดการตั้งค่าดังนี้

ตารางที่ 1: แสดงการตั้งค่าวัสดุอาคาร

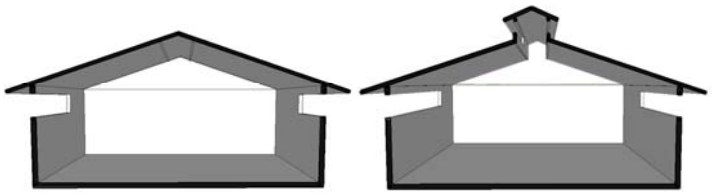
Type	*Material*	*Thickness (m)*	*Conductivity (W/m-k), (K)*	*Specific Heat (J/kg-k)*	*Density (kg/m^3)*	*U-Value (W/m^2-k)*
Wall	Cement/Plaster	0.01	0.720	840	1860	
	Brick	0.07	0.720	840	1960	2.103
Roof	Steel surface	0.0015	50	500	7824	7.141
Floor	Rubber floor covering	0.05	0.170	1400	1200	1.349
	Cast concrete	0.20	1.130	1000	2000	

ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของวิธีทดสอบ (Method validation)

ทำการรวบรวมข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และทิศทางลม โดยรวบรวมข้อมูลทั้งหมด 4 ปี 2010-2013 นำข้อมูลสถิติมาเฉลี่ยเพื่อกำหนดเดือนของแต่ละฤดู และหาวันที่อุณหภูมิสูงสุดมีผลกระทบมากที่สุดของแต่ละฤดูกาล จากการพิจารณาคัดเลือกวันพบว่า ข้อมูลสภาพอากาศของโปรแกรม (Weather data) และข้อมูลสภาพอากาศของศรีสะเกษมีความคลาดเคลื่อนกัน จึงใช้วิธีการแทนค่าข้อมูลสภาพอากาศของจังหวัดศรีสะเกษแทน ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมภายนอก และทิศทางลม โดยอิงวันที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของข้อมูลสภาพอากาศโปรแกรม ได้แก่ ฤดูร้อน 19 มีนาคม ฤดูฝน 3 มิถุนายน และฤดูหนาว 20 ตุลาคม

รูปแบบการทดลอง

รูปแบบการทดลองจะแบ่งเป็นรูปแบบการระบายอากาศ 2 รูปแบบด้วยกัน คือ การระบายอากาศแบบ Wind driven (การเคลื่อนที่ของอากาศด้วยอิทธิพลของลม) ดังภาพที่ 5ก และรูปแบบการระบายอากาศแบบ Combined ventilation (หลักการลอยตัวของอากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ร่วมกับหลักการเคลื่อนที่ของอากาศด้วยอิทธิพลของลม) ดังภาพที่ 5ข



(ก) (ข)

ภาพที่ 5: แสดงรูปแบบการะบายอากาศทั้ง 2 แบบ

- แบ่งอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อผนังด้านข้างระดับเหนือศีรษะ โดยอยู่ในระดับกึ่งกลางของความสูงผนังขึ้นไป (อยู่ที่ระดับ 3.50 เมตร) ในการทดลองนี้แบ่งช่องเปิดออกเป็น 4 ระดับ
  ระดับที่ 1: สัดส่วนช่องเปิดร้อยละ 10 ของพื้นที่ผนังในแนวนอน โดยช่องเปิดมีขนาด กว้าง 0.72 เมตร ยาว 39 เมตร
  ระดับที่ 2: สัดส่วนช่องเปิดร้อยละ 20 ของพื้นที่ผนังในแนวนอน โดยช่องเปิดมีขนาด กว้าง 1.44 เมตร ยาว 39 เมตร
  ระดับที่ 3: สัดส่วนช่องเปิดร้อยละ 30 ของพื้นที่ผนังในแนวนอน โดยช่องเปิดมีขนาด กว้าง 2.16 เมตร ยาว 39 เมตร
  ระดับที่ 4: สัดส่วนช่องเปิดร้อยละ 40 ของพื้นที่ผนังในแนวนอน โดยช่องเปิดมีขนาด กว้าง 2.88 เมตร ยาว 39 เมตร
- อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดหลังคาระบายอากาศแบบปล่องระบายอากาศ (ดังภาพที่ 5ข) กำหนดให้ความสูงของผนังด้านข้างทั้ง 2 ด้าน “สูง 1.50 เมตร ถ้าหากความสูงอาคาร 10 เมตร” (Brian Moss, 2005) และเปิดช่องเปิดร้อยละ 80 ของพื้นที่ผนัง โดยมีขนาด กว้าง 1.25 เมตร ยาว 39 เมตร
- กำหนดการใช้ฉนวนกันความร้อน โฟมโพลียูริเทน (Foam-polyuretane) หนา 1 นิ้ว (เป็นฉนวนกันความร้อนที่เหมาะสมกับอาคารประเภท โรงงาน คลังสินค้า เป็นต้น)

การดำเนินการทดลอง

- จำลองรูปแบบอาคารกรณีศึกษา โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิด และรูปแบบการระบายอากาศ ตามระดับที่ได้กำหนดไว้เพื่อทำการทดลอง
- เริ่มทำการคำนวณพลศาสตร์ของไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CFD) โดยกำหนด วัน เดือน และเวลาในแต่ละฤดู ได้แก่ ฤดูร้อน วันที่ 19 มีนาคม ฤดูฝน วันที่ 3 มิถุนายน และฤดูหนาว วันที่ 20 ตุลาคม เวลา 8.00, 10.00, 12.00, 14.00 และ 16.00น. โดยตั้งค่าการคำนวณ CFD ดังนี้

ตารางที่ 2: แสดงการตั้งค่าการคำนวณของไหล

CFD internal analysis	*Input*
Default grid spacing (m)	0.30 m
Grid line merge tolerance	0.03 m
Turbulence model	K-Ɛ
Discretisation scheme	Power law
Iterations	**1000**

จากตารางที่ 2 โดยการตั้งค่าคำนวณของไหลเป็นแบบ Turbulence k-**Ɛ** รูปแบบการจำลองของลมเป็นแบบ Power law ซึ่งเป็นการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เพื่อจำลองลักษณะการไหลของอากาศแบบ Turbulence โดยมีรอบการคำนวณที่ 1,000 รอบ มีระยะ Grid การประมวลผล 0.30 เมตร

- ทำการวบรวมข้อมูลจากการคำนวณพลศาสตร์ของไหล โดยรวบรวมข้อมูลลมเข้าอาคาร ความเร็วภายในพื้นที่ใช้งาน ความเร็วลมใต้หลังคา และอัตราการระบายอากาศในแต่ละรูปแบบการระบายอากาศ แต่ละอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิด และแต่ละฤดูกาล
- คัดเลือกรูปแบบการระบายอากาศและอัตราส่วนช่องเปิดที่เหมาะสมต่อการระบายอากาศ เพื่อทำการทดลองการลดอุณหภูมิใต้หลังคา โดยทำการตั้งค่าโปรแกรมเพิ่มวัสดุฉนวนกันความร้อนที่หลังคา
- ทำการวิเคราะห์ผลอุณหภูมิอากาศใต้หลังคาและอุณหภูมิอากาศพื้นที่ใช้งาน (Simulation) 2 ลักษณะ คือ อุณหภูมิอากาศที่เกิดจากการเพิ่มฉนวนกันความร้อน และอุณหภูมิอากาศที่เกิดจากการใช้รูปแบบการระบายอากาศที่คัดเลือกมา โดยวิเคราะห์ผลตามฤดูกาลที่กำหนด
- วิเคราะห์ผลการลดอุณหภูมิใต้หลังคาจากการเพิ่มฉนวนกันความร้อน กับการระบายอากาศวิธีธรรมชาติ แสดงผลการเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งาน
- สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิธีวิเคราะห์ข้อมูล

โดยแบ่งเป็น 2 หัวข้อหลักในการวิเคราะห์ข้อมูล

- การเพิ่มอัตราการระบายอากาศ (ความเร็วลมไม่เกิน 0.1 m/s ที่ระดับความสูง 1.00 เมตร)
  1) ผลเปรียบเทียบความเร็วลมภายนอกและภายใน (%)
  2) ผลความเร็วลมในพื้นที่ใช้งาน (วัดที่ระดับ 1.00 เมตร)
  3) ผลความเร็วลมใต้หลังคา (วัดที่ระดับ 10.00 เมตร)
  4) ผลเปรียบเทียบอัตราการระบายอากาศ
- การลดอุณหภูมิใต้หลังคา
  1) ผลเปรียบเทียบอุณหภูมิภายนอกและภายใน (%)
  2) ผลเปรียบเทียบการลดอุณหภูมิใต้หลังคา
  3) ผลการเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งาน

ผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการหารูปแบบการระบายอากาศและอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิด เพื่อเพิ่มอัตราการระบายอากาศ และแนวทางการลดอุณหภูมิใต้หลังคาและเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งาน จึงได้แบ่งรูปแบบการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อหลักดังนี้

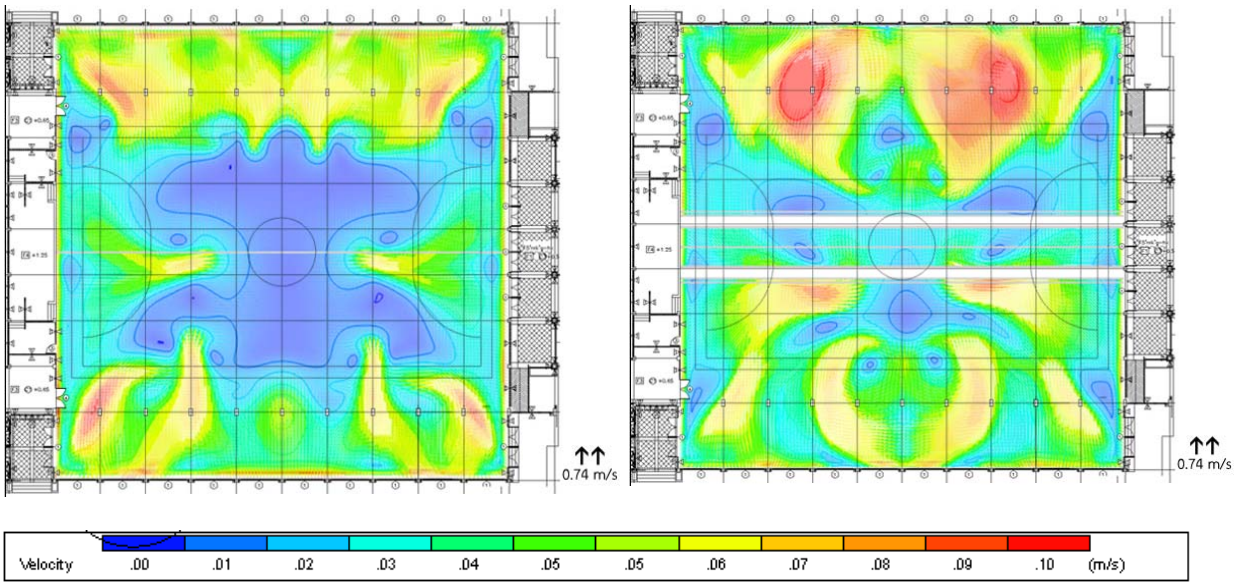
1. การเพิ่มอัตราการระบายอากาศ

เป็นการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น โดยผลอัตราการระบายอากาศมีความสัมพันธ์กับตัวแปรของการทดลอง ไม่ว่าจะเป็น ความเร็วลมภายนอก ความเร็วลมภายใน ทิศทางลม และความแตกต่างของอุณหภูมิภายในและภายนอกอาคาร จึงได้แบ่งการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบดังนี้

1.1 ความเร็วลมภายในพื้นที่ใช้งาน (วัดที่ระดับ 1.00 เมตร)

จากผลการวิจัยเปรียบเทียบความเร็วลมภายในพื้นที่ใช้งาน พบว่าความเร็วลมภายในที่เกิดขึ้นกลับมีความใกล้เคียงกันไม่ว่าจะในฤดูกาลใดๆ ซึ่งรูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation มีลมเข้า 20% มีความเร็วลมภายในพื้นที่ใช้งาน 0.122 m/s ในขณะที่รูปแบบการระบายอากาศ Wind driven มีลมเข้า 16% มีความเร็วลมภายใน 0.098 m/s ต่างกัน 0.024 m/s และอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังร้อยละ 20 มีความเร็วลมภายในพื้นที่ใช้งานมากที่สุดทั้ง 2 รูปแบบการระบายอากาศ

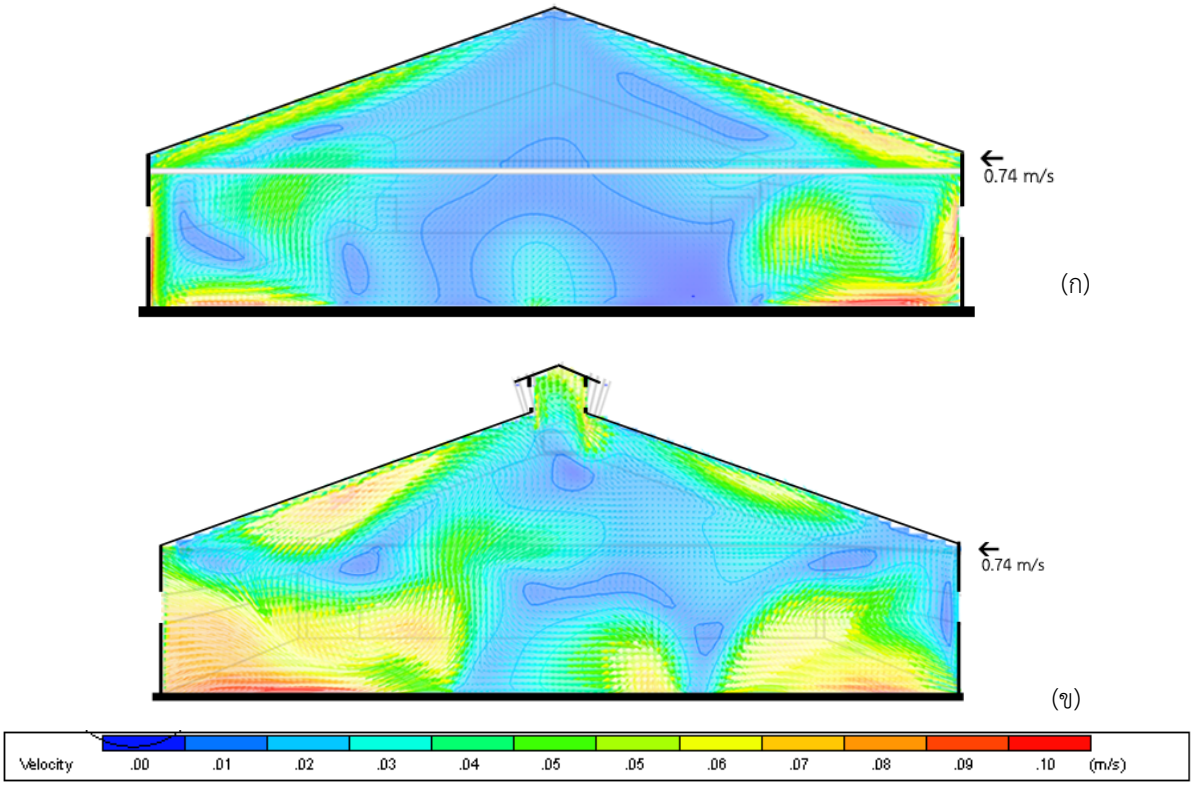
โดยการเคลื่อนที่ของอากาศรูปแบบการระบายอากาศ Wind driven พบว่า กระแสลมไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่ใช้งานได้ ด้วยสัดส่วนอาคารและการไหลเฉื่อยภายในอาคาร (ดังภาพที่ 6) จนทำให้เกิดลมวนภายในอาคาร ซึ่งลมวนนั้น เกิดจากความดันอากาศต่ำกว่าทางลมออก เมื่อเกิดความดันอากาศต่ำในส่วนกลางของพื้นที่ใช้งาน ทำให้การเคลื่อนที่ของอากาศต่ำลง และส่งผลให้ลมมีทิศทางวนกลับ เกิดเป็นลมวน (Vortex) ซึ่งมักจะพบในอาคารที่มีขนาดกว้างทำให้เกิดการแยกตัวของกระแสลมมากเกินไป โดยลมวนทำให้การระบายอากาศไม่มีประสิทธิภาพ เพราะไม่ได้ถูกระบายออกจากอาคาร โดยจะมีลมส่วนหนึ่งมีทิศทางไหลวนกลับลงมาด้านล่าง (ดังภาพที่ 7ก) ส่งผลให้เกิดการสะสมของความร้อนบริเวณพื้นที่ใช้งาน และยังนำเอาความร้อนบริเวณพื้นที่ใต้หลังคาลงมาด้วย ซึ่งอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิด มีผลต่อความหนาแน่นของอากาศภายในอาคาร หากพื้นที่ช่องเปิดน้อยเกินไป ลมอาจเข้าไม่ได้มาก และหากพื้นที่ช่องเปิดมากเกินไป ทำให้เกิดการกระจายตัวของอากาศมากไป ส่งผลต่อความเร็วลมภายในอาคาร การเกิดลมวนจึงทำให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศลดลง ช่องเปิดเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันลมและส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของลมภายในอาคาร



(ก) (ข)

ภาพที่ 6: แสดงเปรียบเทียบการไหลของกระแสลมภายในอาคารแนวผังพื้น WWR 20% (ฤดูร้อน):

(ก) Wind driven (ข) Combined ventilation



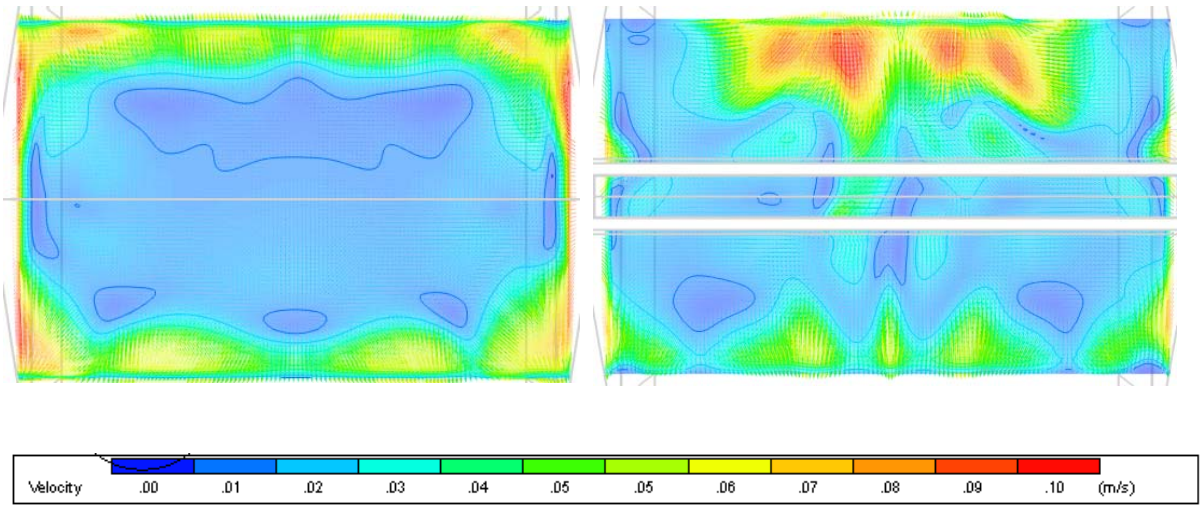
ภาพที่ 7: แสดงเปรียบเทียบการไหลของกระแสลมภายในอาคารแนวรูปตัด WWR 20% (ฤดูร้อน):

(ก) Wind driven (ข) Combined ventilation

ในรูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation จากการระบายอากาศด้วยการใช้ช่องเปิดที่หลังคาแบบปล่องระบายอากาศ มีส่วนช่วยในการเพิ่มความเร็วลมภายในด้วย อย่างไรก็ตาม เกณฑ์การระบายอากาศยิมเนเซียมได้จำกัดความเร็วลมภายในบริเวณพื้นที่แข่งขัน ความเร็วลม 0.1m/s เท่านั้น จากผลการไหลของกระแสลมจะพบว่า ในพื้นที่ใช้งานมีความเร็วลมมากกว่า รูปแบบการระบายอากาศ Wind driven แต่ไม่เกินเกณฑ์การระบายอากาศกำหนด (ดังภาพที่ 7ข) ซึ่งการใช้ Stack effect สามารถทำให้เกิดถ่ายเทอากาศได้ดีขึ้น ด้วยหลักการความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายใน และสามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้มากกว่า หากมีอุณหภูมิภายนอกและภายในแตกต่างกันมาก จะยิ่งสามารถระบายอากาศได้ดีขึ้น อีกทั้งการระบายอากาศแบบ Combined ventilation ยังเหมาะสำหรับอาคารช่วงพาดยาว สามารถช่วยให้ประสิทธิภาพของอัตราการระบายอากาศภายในดีขึ้น ถึงแม้จะเป็นความเร็วลมต่ำ ด้วยการระบายอากาศที่ช่องเปิดหลังคานี้จะช่วยลดการเกิดลมวน และการระบายอากาศสามารถถ่ายเทได้สะดวกขึ้น

1.2 ผลความเร็วลมใต้หลังคา (วัดที่ระดับ 10.00 เมตร)

จากผลการทดลองการเปรียบเทียบความเร็วลมใต้หลังคาพบว่า การเปรียบเทียบความเร็วลมใต้หลังคามีคล้ายกันในทุกฤดูกาล ซึ่งรูปแบบการระบายอากาศ Wind driven มีความเร็วลม 0.087-0.095 m/s ในขณะที่รูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation มีความเร็วลมใต้หลังคา 0.095-0.096 m/s ซึ่งมากกว่ารูปแบบการระบายอากาศ Wind driven ซึ่งความแตกต่างของความเร็วลมใต้หลังคาจะเห็นได้ชัดมากยิ่งขึ้นจากลักษณะการไหลของกระแสลม (ดังภาพที่ 8ก, 8ข)



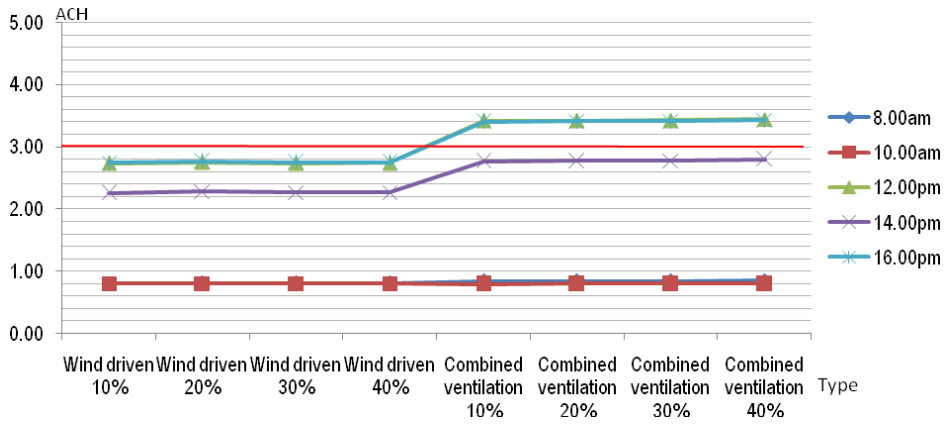
(ก) (ข)

ภาพที่ 8: แสดงเปรียบเทียบการไหลของกระแสลมใต้หลังคา WWR 20% (ฤดูร้อน):
(ก) Wind driven (ข) Combined ventilation

จากภาพที่ 8ก แสดงให้เห็นการไหลของกระแสลมที่เกิดขึ้นใต้หลังคาในระดับ 10.00 เมตร โดยพบว่า แทบจะไม่มีกระแสลม ยกเว้นกระแสลมบริเวณขอบผนังและไหลขึ้นตามแนวหลังคา โดยอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดร้อยละ 10, 20, 30, 40 นี้ มีความเร็วลมมากขึ้นตามลำดับช่องเปิด สังเกตได้ว่าการเปิดช่องเปิดที่เข้าใกล้เพดานมากขึ้น จะทำให้กระแสลมกระจายตัวที่เพดานมากขึ้น ความเร็วลมใต้หลังคามีเพียง 0.03-0.05 m/s เท่านั้น เป็นผลจากความสูงของเพดานที่ทำให้ความเร็วลมลดลง ด้วยความสูงที่มากทำให้การกระจายของลมไม่ทั่วถึง และความดันอากาศต่ำลง

1.3 ผลอัตราการระบายอากาศ

เป็นการเปรียบเทียบผลเพื่อแสดงให้เห็นอัตราการระบายอากาศ ในรูปแบบการระบายอากาศที่แตกต่างกัน ดังนี้



ภาพที่ 9: แสดงผลการเปรียบเทียบการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ (ฤดูร้อน)

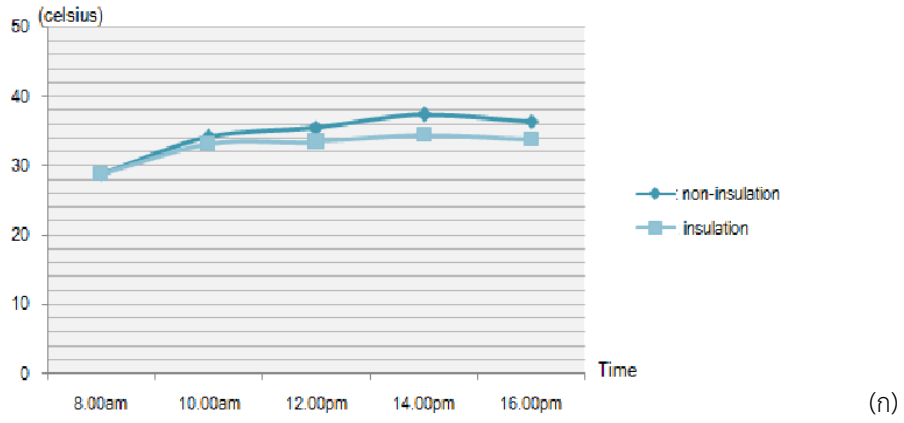
จากผลอัตราการระบายอากาศของทั้ง 2 รูปแบบพบว่า อัตราการระบายอากาศของรูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation มีลักษณะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดที่เพิ่มขึ้น แตกต่างจากรูปแบบการระบายอากาศ Wind driven ที่มีอัตราการระบายอากาศมากที่สุด ในอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดร้อยละ 20 โดยรูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation มีผลอัตราการระบายอากาศ เฉลี่ย 3.19 ACH ซึ่งผ่านเกณฑ์การระบายอากาศยิมเนเซียม (ดังภาพที่ 9)

ตัวแปรสำคัญในการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ คือ ทิศทางลม ความเร็วลมภายนอก ความเร็วลมภายในและความแตกต่างกันของอุณหภูมิ ซึ่งรูปแบบการระบายอากาศที่มีการใช้ Stack effect สามารถทำให้มีการระบายอากาศมากขึ้น กระจายกระแสลมได้ทั่วถึงในพื้นที่ใช้งานส่วนกลางได้มากกว่าการใช้ Wind driven อย่างเดียว จากเกณฑ์การระบายอากาศยิมเนเซียมกำหนดให้มีอัตราการระบายอากาศ 3 ACH ขึ้นไป และควรมีอากาศบริสุทธิ์ (Fresh air) 8-12 L/s ต่อคนนั้น พบว่ารูปแบบการระบายอากาศอากาศ Combined ventilation มีอากาศบริสุทธิ์ 12.55 L/s ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการตามเกณฑ์การระบายอากาศยิมเนเซียม และมีข้อสังเกตว่า หากอัตราการระบายอากาศมีมากขึ้นจะทำให้อากาศบริสุทธิ์ต่อคนเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ยิ่งอัตราการระบายอากาศมากยิ่งมีผลดีต่อนักกีฬา และสามารถช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีอีกด้วย

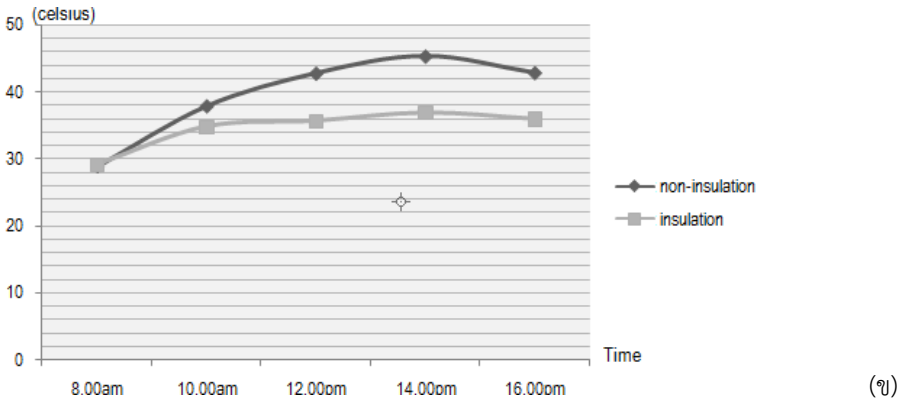
จากผลการวิจัยเพิ่มอัตราการระบายอากาศ ได้คัดเลือกรูปแบบการระบายอากาศและอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดที่สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้ตามเกณฑ์การระบายอากาศยิมเนเซียมในทุกฤดู โดยเลือกจากช่องเปิดที่มีสัดส่วนขนาดต่ำสุด ที่สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศได้ตามเกณฑ์ และถูกต้องตามกฎกระทรวงฉบับที่ 33 เรื่องการระบายอากาศ ที่จะต้องมีพื้นทีช่องเปิด 10% ของพื้นที่ใช้งาน ซึ่งอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดที่ถูกต้องตามกฎกระทรวง คือพื้นที่ช่องเปิด 20% ขึ้นไป ผนวกกับรูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation มีผลอัตราการระบายอากาศผ่านเกณฑ์การระบายอากาศอาคารยิมเนเซียม ทำให้ได้คัดเลือกรูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation 20% เพื่อทำการทดลองให้ขั้นต่อไป

2. ลดอุณหภูมิใต้หลังคา

จากผลการทดลองทำให้วิเคราะห์ได้ว่า การใช้ฉนวนกันความร้อนใต้หลังคา สามารถทำให้พื้นที่ใช้งานมีอุณหภูมิลดลงได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า หลังคาเป็นปัจจัยหลักของการเกิดความร้อนภายในอาคาร ด้วยอุณหภูมิที่สูงถึง 48°C ในฤดูร้อน การใช้การระบายอากาศเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้อุณหภูมิใต้หลังคาลดลงได้ (ดังภาพที่ 10ก, 10ข)



(ก)



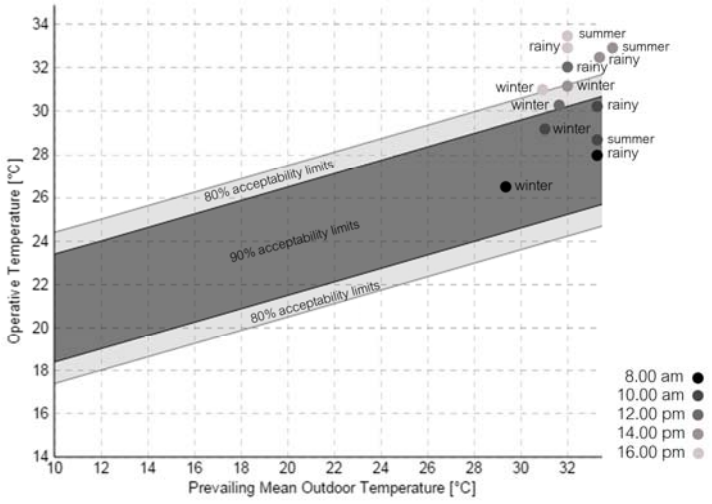
(ข)

ภาพที่ 10: แสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างการมีฉนวนกันความร้อนกับไม่มีฉนวนกันความร้อน (ฤดูร้อน): (ก) บริเวณพื้นที่ใช้งานที่ระดับ 1.00 เมตร (ข) บริเวณใต้หลังคาวัดที่ระดับ 10.00 เมตร

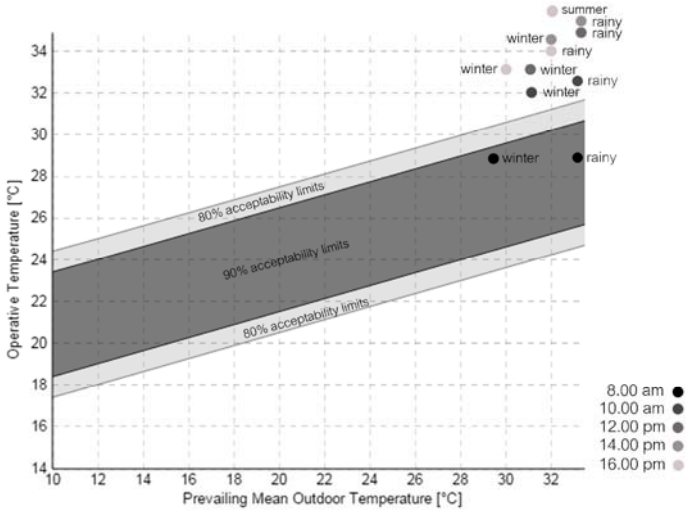
ซึ่งแน่นอนว่าการใช้ฉนวนกันความร้อนใต้หลังคาสามารถช่วยให้อุณหภูมิภายในลดลง และอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่าอุณหภูมิภายนอก โดยจะเป็นผลดีต่อผู้ใช้อาคาร หากภายในอาคารเย็นกว่าภายนอก ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเป็นฉนวนที่มีประสิทธิภาพในการกันความร้อนได้ดี และสามารถนำไปปรับใช้กับอาคารพาดยาว คลังสินค้า และโรงงานได้

2.1 ผลการเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งาน (Adaptive method)

โดยการวัดผลนี้ คือการวัดผลเพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างการใช้การระบายอากาศเพียงอย่างเดียว (Combined ventilation) กับการเพิ่มฉนวนกันความร้อน ถึงแม้ผลการประเมินสภาวะสบายอาจไม่สามารถเป็นไปได้ในทุกๆ กรณีก็ตาม เนื่องด้วยผลความเร็วลมที่เกิดขึ้น มีค่าความเร็วลมน้อยกว่าเกณฑ์การประเมินสภาวะสบาย (ความเร็วลมต่ำสุด 0.3 m/s) และค่าอัตราการเผาผลาญ (MET) ที่มากกว่าเกณฑ์กำหนด ทำให้ผลนี้เป็นการแสดงให้เห็นการลดอุณหภูมิที่สามารถทำให้ความสบายเพิ่มขึ้นเท่านั้น



(ก)



(ข)

ภาพที่ 11: ผลการเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งาน: (ก) ไม่มีฉนวนกันความร้อน (ข) มีฉนวนกันความร้อน

จากผลการเปรียบเทียบการเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งาน พบว่า การใช้ฉนวนกันความร้อนสามารถเพิ่มความสบายได้ (ดังภาพที่ 11ข) โดยกราฟ Adaptive method (ASHRAE Standard 55-2013) แสดงเห็นว่าการใส่ฉนวนกันความร้อนทำให้อุณหภูมิภายในต่ำลง และทำให้กลับเข้าสู่เขตความสบายมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้การระบายอากาศเพียงอย่างเดียว (Combined ventilation) (ดังภาพที่ 11ก) และจากการวัดผลการเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งานนั้น ทำให้วิเคราะห์ได้ว่า การใช้ฉนวนกันความร้อน สามารถเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งานได้ทั้ง 3 ฤดู ถึงแม้อาจมีบางช่วงเวลาที่ไม่สามารถ Acceptability limits 80-90% ได้ทั้งหมดก็ตาม โดยมีผลของฤดูหนาวเท่านั้นที่ Acceptability limits 80-90% ได้ทุกช่วงเวลา (ดังภาพที่ 11ข) จากผลการทดลองนี้ทำให้แนวทางการปรับปรุงการออกแบบจะต้องคำนึงถึงหลังคาเป็นสำคัญ ด้วยผลกระทบในเรื่องความร้อนที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากหลังคาที่ปราศจากฉนวนกันความร้อน ซึ่งสามารถส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมภายในอาคารได้

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากวัตถุประสงค์ต้องการศึกษาการเพิ่มอัตราการระบายอากาศในอาคารยิมเนเซียมด้วยรูปแบบการระบายอากาศและอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนังที่เหมาะสม สรุปได้ว่า รูปแบบการระบายอากาศ แบบ Combined ventilation สามารถเพิ่มอัตราการระบายอากาศมากกว่ารูปแบบการระบายอากาศ Wind driven ventilation โดยมีความเร็วลมภายในอาคารและบริเวณใต้หลังคาเพิ่มขึ้น และพบว่าผลอัตราการระบายอากาศที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับทิศทางลม ความเร็วลมภายนอก และความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศภายนอกและภายในอาคาร โดยรูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดต่อพื้นที่ผนัง 20% ขึ้นไป ผ่านเกณฑ์การระบายอากาศยิมเนเซียมและกฎกระทรวงฉบับที่ 33 ว่าด้วยเรื่องพื้นที่ช่องเปิดในการระบายอากาศ ซึ่งมีอัตราการระบายอากาศ 3 ACH ขึ้นไป ในทุกฤดูกาล โดยมีความเร็วลมภายในไม่เกิน 0.1m/s และจากการคำนวณปริมาณอากาศบริสุทธิ์ต่อคน (Fresh air) พบว่า ยิ่งอัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น ยิ่งสามารถทำให้อากาศบริสุทธิ์มีมากขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อนักกีฬาผู้ใช้อาคาร และจากวัตถุประสงค์ต้องการศึกษาแนวทางการลดอุณหภูมิใต้หลังคาเพื่อเพิ่มความสบายในพื้นที่ใช้งานพบว่า การใช้ฉนวนกันความร้อนใต้หลังคา สามารถทำให้พื้นที่ใช้งานมีอุณหภูมิลดลงได้ สามารถช่วยให้อุณหภูมิใต้หลังคาลดลงได้ถึง 5°C และทำให้พื้นที่ใช้งานมีอุณหภูมิลดลง 1-2°C การลดอุณหภูมิใต้หลังคานี้ส่งผลต่อพื้นที่ใช้งานและสามารถลดความไม่สบายได้

การวิจัยนี้เป็นแนวทางการปรับปรุงแก้ไขอาคารยิมเนเซียมในปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอาคารยิมเนเซียมได้ เพื่อออกแบบรูปแบบการระบายอากาศและอัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดที่เหมาะสม ให้เกิดประสิทธิภาพในการเพิ่มอัตราการระบายอากาศ จะต้องขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ที่ตั้งของอาคาร ความเร็วลมในพื้นที่นั้นๆ ด้วย การใช้รูปแบบการระบายอากาศ Combined ventilation สิ่งสำคัญที่สุด คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิภายนอกและภายในอาคาร ความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศมากขึ้น และสามารถทำให้การเพิ่มความสบายทางการระบายอากาศภายในอาคารได้มีประสิทธิภาพ รวมทั้งการติดตั้งฉนวนกันความร้อนใต้หลังคาสามารถช่วยให้อุณหภูมิภายในลดลงได้อีกทางหนึ่ง โดยเป็นวิธีการปรับปรุงแก้ไขที่ได้ผลดีและง่ายกว่าวิธีอื่นๆ เนื่องด้วยอาคารยิมเนเซียมเป็นอาคารช่วงพาดยาว มีผู้ใช้อาคารมาก จำเป็นที่จะต้องการให้อากาศถ่ายเท เกิดการแลกเปลี่ยนอากาศ หากแต่ข้อจำกัดด้านความเร็วลมภายในทำให้การระบายอากาศนั้นเป็นเรื่องควบคุมได้ยากจึงต้องคำนึงเป็นพิเศษ หรือ

อาจปรับปรุงอาคารโดยใช้วิธีการลดอุณหภูมิภายใน ในรูปแบบอื่นๆ เช่น การใช้เครื่องปรับอากาศ การติดตั้งพัดลมดูดอากาศ การปลูกต้นไม้บริเวณรอบๆ อาคาร อาจช่วยให้อุณหภูมิภายในลดลงและอัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น อากาศถ่ายเทได้มากขึ้นและจะทำให้อาคารมีประสิทธิภาพมากขึ้นตามไปด้วย

บรรณานุกรม

กิจชัย จิตขจรวานิช. (2547). **สภาวะน่าสบายและการปรับตัวเพื่ออยู่แบบสบายของคนในท้องถิ่น**. กรุงเทพฯ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ทิพย์คนึง กุลลาวัณย์. (2553). **สาระสำคัญด้านสภาวะน่าสบายที่ส่งเสริมการใช้อาคารศูนย์กีฬาในกรุงเทพมหานคร**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปัณณทัต เพ็ชรดี และ สุดาภรณ์ ฉุ้งลู้. (2556). **การปรับปรุงบานเกล็ดและช่องเปิดอาคารโรงงานเพื่อลดความร้อนด้วยลมธรรมชาติ**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์.

วรสันต์ ชื่นชีพ. (2548). **การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติของอาคารใต้ดิน**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุพจน์ ปริญญาเปรื่อง. (2553). **ประสิทธิภาพการระบายอากาศของปล่องระบายอากาศสำหรับอาคารผู้อยู่อาศัยรวมในประเทศไทย**. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Abd El-Wahab M.Adel El-Kadi[a] and Mona A. Fannyb. (2003). *“Architectural designs and thermal performances of school sports-halls.”* **Applied Energy**, 2003, 76(2003): 289-303.

Anh Tuan Nguyen. (2010). “The effect of ceiling configuration on indoor air motion and ventilation flow rates.” **Building and Environment**, 46(2011): 1211-1222.

Brian Moss. (2005). **CIBSE AM10 Natural Ventilation in non-domestic buildings**. Printed: Great Britain by Page Bros (Norwich). The Chartered Insutitution of Building Service Engineers Delta House, London.

Chia-Ren Chu. (2014). *“Wind-driven cross ventilation in long buildings.”* **Building and Environment**, 80(2014): 150-158.

D Ajitha Simha (1985). **Building Environment**. Printed: Rajkamal Electric Press (Delhi). Tata McGraw-Hill Publishing Company limited.

E. Prianto, P. Depecker. (2001). *“Characteristic oa airflow as the effect of balcony, opening design and internal division on indoor velocity, A case study of traditional dwelling in urban living quarter in tropical humid region.”* **Energy and Buildings**, 34(2002): 401-409.

Esteban J. Baeza. (2009). *"Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics."* **Biosystems Engineering**, 104(2009): 86-96.

Francis Allard. (1998). **Natural Ventilation in Buildings, a design handbook**. UK: James & James (Science Publishers) Ltd.

Geraint John and Kit Campbell. (1995). **Indoor sports handbook of sport and recreational building design Vol.2**, 2nd Edition. Great Britain: The Sports Council Technical Unit For Sport.

G.Z. Brown and Mark Dekay (2001). **Sun, Wind and Light: Architectural Design Strategies**. New York: John Wiley & Sons Inc.

J.N. Chalkley and H.R. Cater (1968). **Thermal Environment for the student of architecture**. Printed: Great Britain by Staples Printers Limited, Rochster, Kent.

Jing-Hoon Kang. (2007). *"Improvement of natural ventilation in a large factory building using a louver ventilator."* **Building and Environment**, 43(2008): 2132-2141.

Kenneth W. Cooper. (2010). **ASHRAE STANDARD, 55-2013 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta.

Katarzyna Gladyszewska. (2001). *"Effect of wind on stack ventilation performance."* **Energy and Buildings**, 51(2012): 242-247.

Michele Melaragno (1982). **Wind In Architectural And Environmental Design**. Printed: United states of America by Van Nostrand Reinhold Company 135 West 50th Streer, New york, N.Y. 10020.

Merlijn De Paepe. (2012). *"Airflow measurements in and around scale model cattle barns in a wind tunnel: Effect of ventilation opening height."* **Biosystems Engineering**, 113(2012): 22-32.

Nick Baker and Mark Standeven. (1996). *"Thermal comfort for free-running buildings."* **Energy and Buildings**, 23(1996): 175-182.

Torwong Chenvidyakarn. (2007). *"Review Article: Passive Design for Thermal Comfort in hot Humid Climates."* **Journal of Architectural/Planning Research and Studies**, 5(2007).