คุณภาพของสภาพแวดล้อมภายในห้องเรียน: คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Indoor Environmental Quality in a Classroom: Faculty of Architecture, Chiang Mai University

สุมาวลี จินดาพล
Sumavalee Chindapol

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200
Faculty of Architecture, Chiang Mai University, Chiange Mai 50200, Thailand
E-mail: sumavalee.ch@cmu.ac.th

Received 22/1/2019 Revised 26/5/2019 Accepted 15/5/2019

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบคุณภาพอากาศของห้องเรียน 100 คน จำนวน 1 ห้อง ในระยะเวลา 1 ปี ในคณะสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยเน้นศึกษาผลกระทบด้านพฤติกรรมการเรียนการสอน สภาวะน่าสบาย การใช้งาน กับระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) อุณหภูมิและความชื้น ใช้การตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ในระหว่างที่มีการเรียนการสอนภายในห้องทุก ๆ 10 นาที ด้วยระบบแสดงผลข้อมูลคุณภาพอากาศแบบออนไลน์ ค่าที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานระดับก๊าซ CO_2 และอัตราการระบายอากาศของ ASHRAE 62.1 และวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย โดยเปรียบเทียบผลการศึกษา สภาวะน่าสบาย ระดับก๊าซ CO_2 และพฤติกรรมของผู้ใช้งาน จากการศึกษาพบว่า ห้องเรียนของคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ไม่มีการติดตั้งระบบเติมอากาศใดๆ ไม่มีพัดลมดูดอากาศ และไม่มีระบบเติมอากาศจากเครื่องปรับอากาศ ทำให้มีอัตราการระบายอากาศต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก และความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ภายในห้องเรียนมีการสะสมสูงสุดถึงเกือบ 5,000 ppm ในเวลา 16.30 น. ในวันที่มีการเรียนติดต่อกัน 4 คาบวิชา มีการสะสมก๊าซต่อเนื่องกว่า 7 ชั่วโมง ซึ่งอยู่ในระดับอันตรายสามารถทำให้หมดสติได้ สอดคล้องกับพฤติกรรมที่พบว่าบ่อยครั้งนักศึกษามีอาการมึนศีรษะ อ่อนเพลีย หรือง่วงนอนระหว่างการเรียน ขอบเขตสภาวะน่าสบายของห้องเรียนอยู่ในระดับ “อุ่น” และ “ค่อนข้างอุ่น” แม้ว่าจะเปิดเครื่องปรับอากาศ จึงแนะนำให้มีการเปลี่ยนระบบปรับอากาศให้ได้มาตรฐานการระบายอากาศ หรือติดตั้งพัดลมดูดอากาศที่มีความเร็วลม 300 ลบ.ม./วินาที จำนวน 12 ตัว เมื่อระดับก๊าซ CO_2 มีปริมาณสูงกว่า 1,500 ppm

คำสำคัญ
คุณภาพสภาพแวดล้อมภายในอาคาร
คาร์บอนไดออกไซด์
ห้องเรียน
เชียงใหม่

Abstract

This study investigates indoor environmental quality of a 100-seat classroom at the faculty of Architecture, Chiang Mai University. The physical environment real-time data recorded online every 10 minutes for a year are carbon dioxide (CO_2) level, indoor temperature, and relative humidity. The environmental data then are analyzed with the ASHRAE 62.1 standard and the Engineering Institute of Thailand standard for classroom ventilation. The results show that there is no installation of any fresh air intake system, no mechanical fans and no exhausting system from the air-conditioner. Consequently, air change rate of a measured classroom inadequate and the CO_2 cumulative level has become risky to health. The peak CO_2 level is almost 5,000 ppm at 4.30 pm in the 4-class-continuous day, meaning totally cumulative for more than seven hours. In the worst case, this condition could possibly result in unconsciousness. Although the occupants have responded less severe than in theory, their feedback conforms dizziness, fatigue, and sleepiness after the 2nd class. Thermal comfort status in the classroom was 'warm' and 'slightly warm', while the air-conditioners were turned on during the classes. The recommendation for IEQ improvement is to re-install the standardised air-conditioning system or to increase ventilation rate by installing at least 12 fans with 300 m/s velocity performance.

Keywords

Indoor Environmental Quality

Carbon Dioxide

Classroom

Chiang Mai

1. บทนำ

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์มีการทำกิจกรรมของนักศึกษาและบุคคลากรภายในพื้นที่อาคารค่อนข้างมาก สภาพอากาศภายในห้องจึงถูกใช้ร่วมกันหลายคน บางห้องมีการใช้งานติดต่อกันยาวนานกว่า 7 ชั่วโมงต่อวัน และมีจำนวนผู้ใช้งานสะสมตั้งแต่ 20 คน ถึง 100 คน ซึ่งก่อให้เกิดการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละวันซึ่งอาจส่งผลเสียต่อสุขภาพ และส่งผลไปถึงคุณภาพของการเรียนการสอนด้วย

การกำหนดค่ามาตรฐานอัตราการระบายอากาศจะเป็นข้อกำหนดที่จำเป็นในการออกแบบ แต่ในสถานการณ์จริงเมื่อมีผู้ใช้งานเต็มพื้นที่ หรือมีการปรับเปลี่ยนลักษณะการใช้งานตามพฤติกรรมของผู้ใช้งานอาจทำให้การออกแบบอัตราการระบายอากาศเดิมไม่สอดคล้องเหมาะสมกับคุณภาพอากาศตามการใช้งานปัจจุบันได้ ปัญหาดังกล่าวสามารถพบได้ทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศกำลังพัฒนา ในประเทศฟินแลนด์ถึงแม้ว่าจะเป็นประเทศพัฒนาแล้วในทวีปยุโรปที่มีบังคับใช้กฎหมายด้านสิ่งแวดล้อมในเกณฑ์คุณภาพชีวิตที่ดีมาก ยังพบรายงานอัตราการระบายอากาศในห้องเรียนจริงมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนด (Turunen et al., 2014, pp. 733-739) คือ มีอัตราการระบายอากาศจริงอยู่ที่ 3.5 ลิตรต่อคนต่อวินาที ต่ำกว่าที่กฎหมายอาคารกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศฟินแลนด์ กำหนดไว้ที่ 6 ลิตรต่อคนต่อวินาทีเกือบ 2 เท่า (Ministry of the Environment, 2012) นอกจากนั้นยังพบข้อกำหนดคล้ายคลึงกันทั้งในห้องเรียนแบบปรับอากาศในประเทศอิตาลี (Schibuola, Scarpa & Tambani, 2016) และห้องเรียนไม่ปรับอากาศในประเทศกรีซ (Santamouris et al., 2008, pp. 1833-1843) เนื่องจากในสถานการณ์จริงห้องเรียนมีจำนวนผู้ใช้งานต่อเนื่องพร้อมกันเป็นเวลานาน ทำให้การคิดอัตราการระบายอากาศตามลักษณะการใช้งานในอาคารทั่วไปอาจไม่เหมาะสมได้ เช่น การคำนวณอัตราการระบายอากาศตามขนาดปริมาตรห้องแต่เพียงอย่างเดียวดังที่กำหนดในเกณฑ์อาจไม่เพียงพอสำหรับการใช้งานห้องเรียนที่มีผู้ใช้งานในห้องเป็นจำนวนมากกว่าที่คาดการณ์ไว้ในขั้นตอนการออกแบบอาคาร

การที่อัตราการระบายอากาศต่ำกว่าเกณฑ์เช่นนี้ส่งผลโดยตรงกับการสะสมก๊าซ CO_2 ซึ่งมีการสะสมอยู่ในเกณฑ์ที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพเป็นระยะเวลานาน สามารถทำให้หมดสติได้ งานวิจัยนี้ต้องการสำรวจอัตราการระบายอากาศและการสะสมก๊าซ CO_2 ที่อาจส่งผลกับพฤติกรรมการเรียนที่เกิดขึ้นเพื่อเสนอแนะวิธีการแก้ไขที่เหมาะสม ทั้งนี้การสะสมของก๊าซ CO_2 ส่งผลต่อความเสี่ยงด้านสุขภาพ โดยสำนักอนามัยและสิ่งแวดล้อมประเทศไทย (Bureau of environmental Health, 2016, pp. 257-264) กำหนดระดับที่ปลอดภัยคือ ไม่เกิน 1,000 ppm อย่างไรก็ตามประเทศไทยไม่ได้มีการกำหนดระดับก๊าซ CO_2 ในอาคารที่อยู่ในขอบเขตอันตรายอย่างชัดเจน งานวิจัยอื่นๆ มีการระบุผลกระทบต่อสุขภาพในระดับต่างๆ เช่น 1,000 – 1,500 ppm ทำให้คนในอาคารไม่มีสมาธิอันส่งผลต่อประสิทธิภาพการเรียนอย่างมีนัยสำคัญ ระดับสูงกว่า 1,500 ppm อาจทำให้เกิดการระคายเคืองระบบทางเดินหายใจส่วนต้นได้ (Myhrvold, Olsen & Lauridsen, 1996, pp. 369-374) จึงถือได้ว่าเป็นระดับที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพ ดังตารางที่ 1

จากการสำรวจปัญหาเบื้องต้นในวันตรวจวิทยานิพนธ์ของห้องบรรยาย 3 ในอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ในช่วงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2560 ซึ่งมีการใช้งานเต็มวัน เปิดเครื่องปรับอากาศตั้งแต่ 8.30–17.00 น. มีผู้ใช้งานสูงสุด 100 คนในช่วงบ่าย พบว่า ภายในห้องมีการสะสมก๊าซ CO_2 สูงกว่า 4,000 ppm ทำให้ผู้ใช้งานส่วนใหญ่มีอาการมึนศีรษะ อึดอัด และวิงเวียน ผู้ใช้งานบางส่วนเดินออกจากห้อง การแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้าในวันดังกล่าวทำโดยการเปิดหน้าต่างและประตูทิ้งไว้ เป็นเวลา 15 นาที หรือจนกว่าค่าก๊าซจะลดลงมาถึงระดับ 2,000 ppm พร้อมกับการเพิ่มความเร็วลมของเครื่องปรับอากาศและของพัดลม เนื่องจากในห้องเรียนไม่มีระบบการเติมอากาศใหม่ ทำให้ต้องมีการเปิดประตูหน้าต่างหลายครั้งและยังสิ้นเปลืองพลังงานอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประเมินลักษณะคุณภาพอากาศเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของผู้ใช้งานพื้นที่ ในห้องเรียนอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เพื่อเสนอแนวทางแก้ไข สภาพอากาศให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน

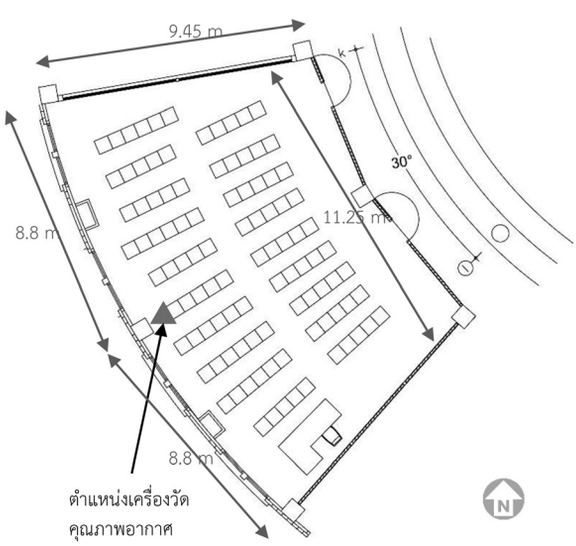
2. วิธีวิจัย และการวิเคราะห์ผล

การตรวจวัดค่าคุณภาพอากาศของห้องเรียนในคณะสถาปัตยกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ทำโดยใช้การใช้ฐานข้อมูลที่มีการบันทึกภายในคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ ด้วยระบบอัตโนมัติ เครื่อง Tenmars รุ่น TM-187D (Measurement range ± Accuracy: CO_2 infrared sensor

ตารางที่ 1 ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรับปรุงจากเกณฑ์มาตรฐานของ ASHRAE 62.1-2010 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

ระดับ CO_2	อาการ	ความเสี่ยง	อ้างอิง
ไม่เกิน 1,000 ppm	ระดับที่รับได้ ไม่ส่งผลต่อร่างกาย	ปกติ (No outstanding health report)	Bureau of environmental Health, 2016; ASHRAE, 2010; Godish, 2001
1,000 ppm. -1,500 ppm	มีอาการปวดศีรษะวิงเวียน รู้สึกหนักศีรษะ หมดแรง และไม่มีสมาธิ อันส่งผลต่อประสิทธิภาพการเรียนอย่างมีนัยสำคัญ	มีผลต่อสมาธิการทำงาน (Affecting to concentration)	Myhrvold, Olsen & Lauridsen, 1996
1,500 ppm. – 4,000 ppm	มีอาการระคายคอ จมูก น้ำมูกน้ำตาไหล ไอ ซึ่งเป็นอาการระคายเคืองของระบบทางเดินหายใจส่วนต้น	เสี่ยงต่อสุขภาพ (Risk to health)	Myhrvold, Olsen & Lauridsen, 1996, pp. 369-374
มากกว่า 5,000 ppm	ความเข้มข้นสูง ทำให้ระดับของ CO_2 ในเลือดสูงขึ้น เกิดภาวะการคั่งของ CO_2 ในเลือด (Hypercarbia) อาจจะทำให้ปวดศีรษะ เสี่ยงต่อการหมดสติชั่วคราว และหากนานเกิน 8 ชั่วโมง อาจเสียชีวิตได้	อันตรายต่อสุขภาพ (Harmful to health)	Muangkaew, 2016, pp. 1-14

0-9999 ppm±5%, temperature 20-70°C ±1°C, humidity 20-80%±1%RH, >80%±5%RH) โดยเลือกห้องบรรยาย 3 ขนาดความจุ 100 คน ขนาดกว้าง 9.45 ม. ยาวเฉลี่ย 14.5 ม. (เฉลี่ยด้านแคบที่สุดและยาวที่สุด) สูง 3.5 ม. (รูปที่ 1) จำนวน 1 ห้อง ในระยะเวลา 1 ปี โดยเน้นศึกษาผลกระทบด้านพฤติกรรมการเรียนการสอนกับระดับก๊าซ CO_2 อุณหภูมิและความชื้น รวบรวมข้อมูลคุณภาพอากาศที่บันทึกได้ในระบบออนไลน์ทั้งหมด ตั้งแต่ปลายเดือนเมษายน พ.ศ. 2560 จนถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 ศึกษาพฤติกรรมการใช้งานในห้อง โดยแบ่งเป็นพฤติกรรมเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงเวลา 30 นาทีแรกของการเรียน ช่วงเวลาหลังจาก 30 นาทีแรก และช่วงเวลา 30 นาทีท้ายคาบเรียนนั้นๆ กลุ่มพฤติกรรมในห้องเรียน (ปรับปรุงจาก Waeochan, 2017, pp. 107-123; Khamta, 2015, pp. 1528-1542) สามารถแบ่งประเภทเป็น กลุ่มมีความกระตือรือร้นและมีสมาธิดีเยี่ยม ได้แก่ กระตือรือร้นดี สดชื่น และมีสมาธิกับเนื้อหาที่เรียนดี กลุ่มเริ่มขาดสมาธิ ได้แก่ เริ่มอ่อนเพลีย อึดอัด เหนื่อยหน่าย และง่วงหาว และกลุ่มขาดสมาธิ ได้แก่ อาการมึนศีรษะ หรือเผลอหลับระหว่างการเรียน รวมถึงพยายามออกจากห้องเรียน เพื่อประเมินพฤติกรรมการใช้งานพื้นที่โดยเปรียบเทียบกับสภาวะน่าสบายและปริมาณก๊าซ CO_2 โดยมีการสัมภาษณ์เชิงลึกนักศึกษาจำนวน 35 คน มีอายุ 21–23 ปี ไม่จำกัดเพศ โดยการเลือกแบบสุ่ม จากนักศึกษากลุ่มเดิมมีการเรียนในห้องบรรยาย 3 จำนวน 2 วิชาต่อเนื่องกัน ทั้งหมดจำนวน 50 คน สอบถามขณะที่เรียนในอิริยาบถนั่งผ่อนคลาย (Met = 1) นักศึกษาส่วนใหญ่แต่งกายเสื้อยืดกางเกงยีนส์ มีส่วนน้อยที่ใส่เสื้อคลุม ได้ค่าดัชนีเสื้อผ้า (clo-value) เฉลี่ย 0.32 ติดตามผลจำนวน 2 ภาคการศึกษา นำข้อมูลมาวิเคราะห์สถิติเชิงพรรณาประกอบกับการวิเคราะห์เชิงคุณภาพเปรียบเทียบกับมาตรฐานการระบายอากาศในห้องเรียนของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (The Engineering Institute of Thailand, 2008) และ ASHRAE62.1 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE], 2010) เพื่อสรุปปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพอากาศและเสนอแนวทางการแก้ไขปรับปรุงคุณภาพอากาศ



รูปที่ 1 แสดงผังห้องบรรยาย 3 (Lecture 3 plan)

ลักษณะการติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพอากาศในห้องบรรยาย 3 หัวอ่าน (sensor) ตั้งอยู่ในระดับสูงจากพื้น +2.20 ม. (ดังรูปที่ 1) (หมายเหตุ ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องวัดตามเกณฑ์ ASHRAE62.1 (ASHRAE, 2010) กำหนดให้หัวอ่านอยู่สูงจากพื้นห้อง 1.1–1.5 เมตร หากต้องการวัดระดับสภาวะน่าสบายในอิริยาบถนั่ง อย่างไรก็ตาม ไม่ได้มีการกำหนดระดับความสูงของหัวอ่านในการวัดระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในกรณีนี้ใช้ระดับติดตั้งเครื่องมือวัดที่ความสูง 2.2 เมตร เพื่อลดผลกระทบด้านความปลอดภัยของผู้ใช้อาคารต่อเครื่องมือเป็นสำคัญ เนื่องจากเป็นระดับเหนือช่องหน้าต่างและเหนือศีรษะของผู้ใช้งานเล็กน้อย) และมีการเก็บข้อมูลทุก 10 นาที โดยมีการใช้งานตามตารางการเรียนการสอน 8.30–16.30 น. โดยมีข้อสังเกตคือ วันอังคารเป็นวันที่มีการใช้ห้องทั้งวัน มีผู้เรียนและผู้สอนใช้งานเต็มพื้นที่ห้อง (ตัวอย่างการใช้งานในวิชาพฤติกรรมมนุษย์ ในเวลา 13.30–15.00 น. ดังรูปที่ 2–3)

การวิเคราะห์ผลด้านสภาวะน่าสบายทำโดยใช้ดัชนีสภาวะน่าสบาย 2 ดัชนี ได้แก่ 1) ค่า SET (Standard Effective Temperature, °C) หรืออุณหภูมิสภาวะน่าสบายที่คำนึงถึงปัจจัยด้านอุณหภูมิ อัตราการเผาผลาญร่างกาย และ เครื่องนุ่งห่ม โดยจะมีค่าเทียบเท่าอุณหภูมิสภาวะน่าสบายเมื่ออากาศอิ่มตัว (New Effective Temperature, ET*) ที่ระดับน้ำทะเลเมื่อมีความกดดันอากาศและระดับความเปียกชื้นของผิวหนัง เนื่องจากมีเหงื่อเท่ากัน (สมการ 1) (Auliciems & Szokolay, 2007) และ 2) ค่า PMV-PPD (Predicted Mean Vote & Percentage of Persons Dissatisfied) (Fanger, 1970) เป็นการหาค่ากลางที่คนส่วนใหญ่รู้สึกสบาย ในการคำนวณจะใช้อุณหภูมิ (temperature) ความชื้น (relative humidity) ความเร็วลม (air velocity) เครื่องนุ่งห่ม (clo-value) อัตราการเผาผลาญของร่างกาย (metabolism rate) และอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโดยรอบ (mean radiant temperature, MRT) โดยอุณหภูมิที่ได้คือ หรือ ค่า PMV จะอยู่ในระดับ +3 (ร้อน) ถึง –3 (หนาว) เทียบกับระดับ PPD ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของคนที่รู้สึกสบาย โดยค่าสภาวะน่าสบายที่ยอมรับได้คือค่าที่มี PPD 5% (มีคน 5% ที่รู้สึกไม่พึงพอใจกับอุณหภูมิ)

การวิเคราะห์ผลด้านการระบายอากาศจะใช้การคำนวณอัตราการระบายอากาศ 2 วิธี ได้แก่ การคำนวณตามอัตราการเปลี่ยนอากาศใหม่ตามขนาดปริมาตรห้อง (Air change rate per hour, ACH) มีหน่วยเป็นจำนวนเท่าของอากาศที่ควรจะเติมในห้องนั้น ๆ ต่อชั่วโมง ซึ่งตามมาตรฐานอัตราการระบายอากาศของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (The Engineering Institute of Thailand, 2008) กำหนดให้ห้องเรียนควรมีค่าไม่น้อยกว่า 4 ACH คำนวณจากสมการ 2 นำค่า ACH ที่คำนวณได้นำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2010) ที่กำหนดให้อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงสำหรับห้องเรียนไม่ควรน้อยกว่า 6 ACH (The Engineering Tool Box, 2016) และวิธีที่ 2 การคำนวณตามปริมาตรอากาศภายในห้องและจำนวนผู้ใช้งานสูงสุดในเวลานั้น มีหน่วยเป็น ลิตรต่อวินาทีต่อคน (สมการ 3) จึงเป็นการคำนึงถึงระยะเวลาที่ผู้ใช้งานอยู่ในพื้นที่ด้วย โดยจะประเมินอัตราการระบายอากาศประกอบกับความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ที่ตรวจวัดได้ เพื่อเปรียบเทียบกับ ค่ามาตรฐานของ ASHRAE และประกาศกรมอนามัย เรื่อง เกณฑ์ค่าเฝ้าระวังคุณภาพอากาศภายในอาคาร (Bureau of Environmental Health, 2016) กำหนดระดับก๊าซ CO_2 ไม่เกิน 1,000 ppm อันแสดงถึงการระบายอากาศที่พอเพียงกับจำนวนคนภายในห้อง

$$SET = 34.95\ Tb - 1247.6 \quad (1)$$

$$ACH\text{-}1 = [ln\ (C_o/C_t)] / t \quad (2)$$

$$ACH\text{-}2 = Liter*time*people \quad (3)$$

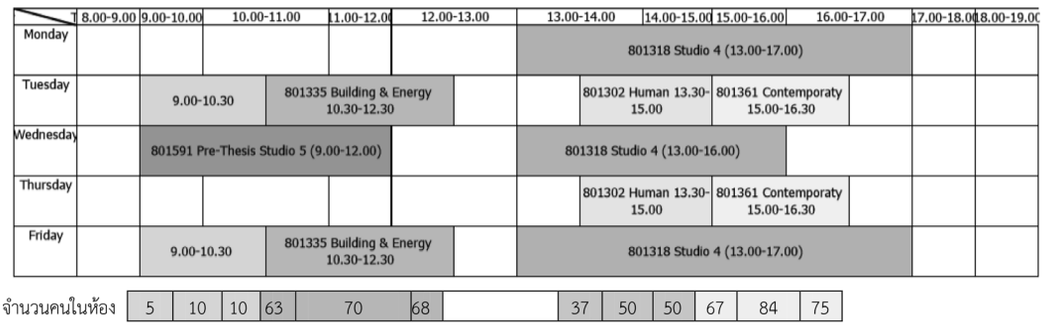
โดย Tb คือ อุณหภูมิร่างกายมนุษย์

C_o มาจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นาทีสุดท้ายที่ยังคงมีผู้เรียนอยู่ภายในห้อง;

C_t คือ ความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ที่เวลาใด ๆ หลังผู้เรียนออกไปจากห้อง;

t คือ จำนวนชั่วโมงหลังผู้เรียนออกไปจากห้อง (Godish, 2001)

รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพอากาศและบรรยากาศการเรียนภายในห้องบรรยาย 3 วันที่ 8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 วิชา Human Behavior เวลา 13.00 – 15.00 น. (Air Quality Monitor installation and learning activity in Lecture 3, on 8th February 2018, Course Humana Behaviour 1-3 pm.)



รูปที่ 3 ตารางเรียนของห้องบรรยาย 3 และจำนวนคนเฉลี่ยในห้องเรียนขณะทำการสำรวจ
(Class schedule for semester 2 in Lecture 3 and average occupants during the survey)

3. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การวิเคราะห์ผลด้านสภาวะน่าสบาย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลสภาพอากาศ ด้วยโปรแกรม CBE Thermal Comfort Tool (Hoyt et al., 2017) พบว่า ฤดูหนาวเป็นฤดูเดียวที่ห้องบรรยาย 3 อยู่ในขอบเขตสภาวะน่าสบายตลอดฤดูกาล โดยมีค่า SET (Saturated Effective Temperature, °C) เฉลี่ยอยู่ที่ 25.08 °C และ มีค่า PMV (Predicted Mean Vote) เฉลี่ยอยู่ที่ 0.058 ทำให้ค่าความรู้สึก (Sensation) ในสภาพอากาศภายในห้องบรรยาย 3 อยู่ที่ระดับ 'เป็นกลาง' (Neutral) และมีค่า PPD (Percentage of Persons Dissatisfied) เพียง 7.37% เท่านั้น ในขณะที่อุณหภูมิในฤดูร้อนและฤดูฝนไม่อยู่ในขอบเขตสภาวะน่าสบายเลย โดยฤดูร้อนอยู่ในระดับความรู้สึก 'อุ่น' (warm) ทั้งหมด และฤดูฝนพบว่ามีช่วงที่อยู่ในระดับ 'อุ่น' คิดเป็นร้อยละ 27 และระดับ 'ค่อนข้างอุ่น' ร้อยละ 78 ถึงแม้ว่าทั้ง 2 ฤดูกาลจะมีการเปิดเครื่องปรับอากาศในเวลาเรียนแล้วก็ตาม ตัวอย่างขอบเขตสภาวะน่าสบายของห้องบรรยาย 3 ใน 3 ฤดูกาล เป็นดังรูปที่ 4–5

3.2 การวิเคราะห์ระดับคาร์บอนไดออกไซด์

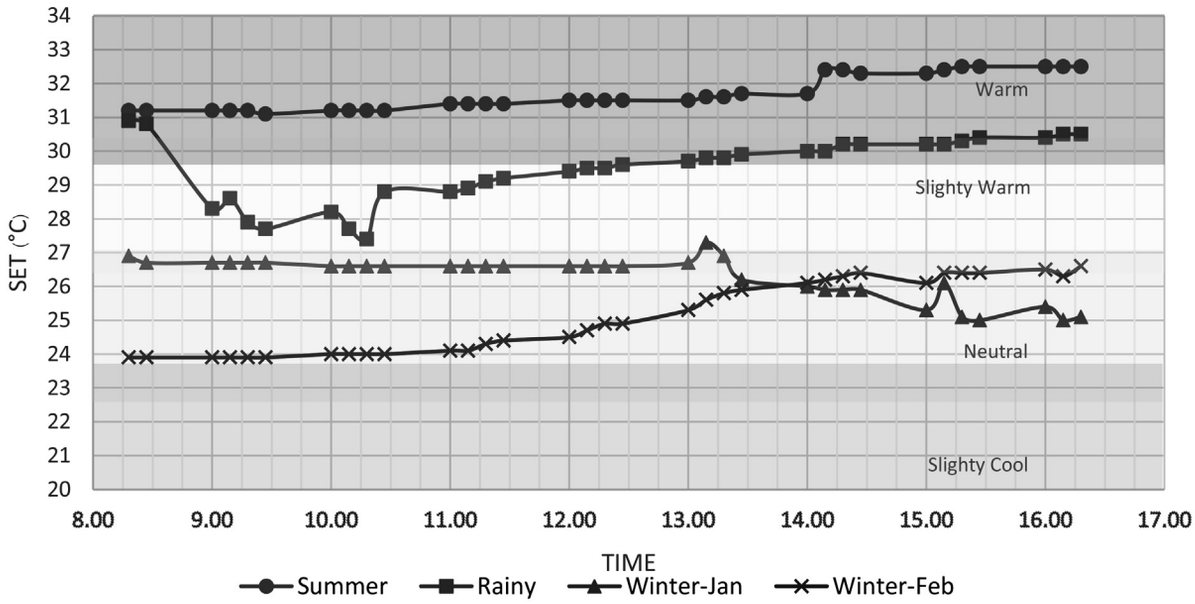
จากการตรวจวัดระดับก๊าซ CO2 ในห้องบรรยาย 3 ในฤดูร้อน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ไม่มีผู้ใช้งานอย่างเป็นทางการ (ไม่มีการเรียนการสอน) และไม่ได้เปิดเครื่องปรับอากาศ ได้ค่าเฉลี่ยก๊าซ CO_2 ทั้งปีที่ 431 ppm สูงสุด 457 ppm และต่ำสุด 409 ppm จึงสามารถใช้ระดับก๊าซ CO_2 ของห้องที่ตรวจวัดในช่วงฤดูร้อนเป็นระดับก๊าซอ้างอิงได้ เนื่องจากไม่มีคนใช้งานในพื้นที่ การวิเคราะห์ระดับความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 โดยใช้วิธีการเปรียบเทียบค่าตามเกณฑ์มาตรฐานของ ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2010) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังตารางที่ 1 เพื่อใช้วิเคราะห์ห้องบรรยาย 3 ดังรูปที่ 6

ฤดูหนาว เป็นช่วงที่เห็นผลการสะสมก๊าซ CO_2 ในห้องเรียนชัดเจนที่สุด โดยมีค่าสะสมอย่างชัดเจนในช่วงเวลา 13.00–17.00 น. โดยในเดือนมกราคมมีปริมาณก๊าซ CO_2 สะสมในช่วงบ่ายตั้งแต่ 1,000 ppm ในเวลา 13.10 น. สะสมเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึง 2,900 ppm อยู่ในระดับที่มีความเสี่ยงต่อสุขภาพ ในเวลา 14.45–15.00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่มีการหยุดพักก่อนเริ่มเรียนคาบต่อไป นักศึกษาบางส่วนเดินออกจากห้องทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนอากาศและหยุดการสะสมของก๊าซ CO_2 เมื่อเริ่มการเรียนการสอนในคาบต่อมาพบการสะสมก๊าซ CO_2 เกิน 4,000 ppm ในเวลา 15.20–16.30 น. ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่มีความอันตรายต่อสุขภาพแล้ว

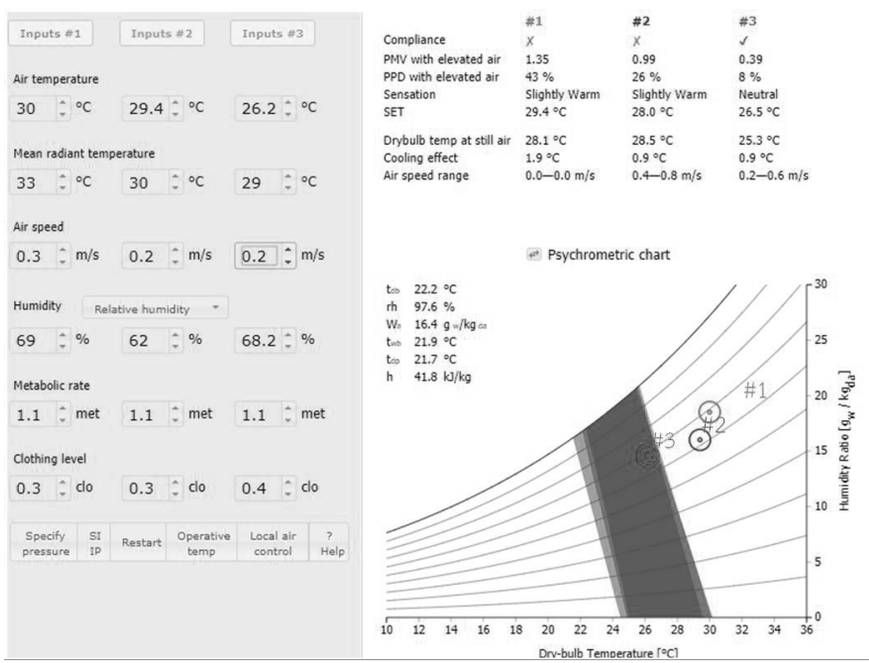
อย่างไรก็ตามไม่พบค่าก๊าซ CO_2 ที่สูงเกินค่ามาตรฐานในฤดูฝน (เดือนมิถุนายน ถึงตุลาคม) เนื่องจากมีการเรียนการสอนเพียง 2 เดือนหลัง โดยเป็นการเรียนการสอนกลุ่มเล็ก นักศึกษา จำนวน 5–10 คน ในห้องเรียน 100 คน จึงไม่มีสะสมก๊าซ CO_2 อย่างชัดเจน

การศึกษาพฤติกรรมผู้ใช้งานอาคารในห้องบรรยาย 3 เน้นศึกษาในช่วงบ่ายของวันอังคารและวันพฤหัส เนื่องจากผู้ใช้งานพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นกลุ่มผู้เรียนเดิม ในการเรียนคาบแรก พบว่า ช่วงแรกของคาบแรก นักศึกษาส่วนใหญ่มีความกระตือรือร้นดี สดชื่น และมีสมาธิกับเนื้อหาในห้องเรียนอย่างดีเยี่ยม (73.3%) เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที มีจำนวนนักศึกษาเกือบครึ่งหนึ่ง (46.7%) ที่รู้สึกอ่อนเพลีย อึดอัดและเหนื่อยหน่าย และนักศึกษาบางส่วนเริ่มมีการเผลอหลับ (26.7%) และเมื่อสิ้นสุดคาบแรกนักศึกษาหนึ่งในสาม (33.3%) รู้สึกอ่อนเพลีย อึดอัดและเหนื่อยหน่าย

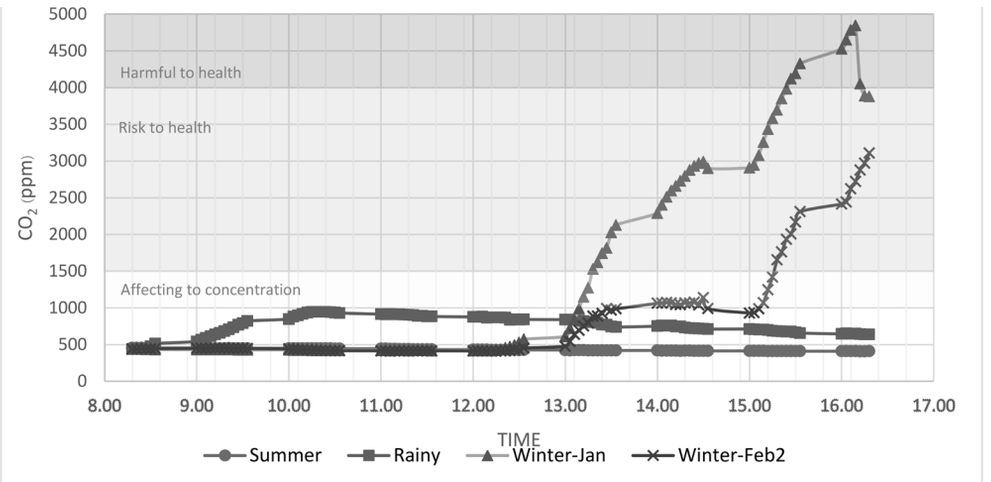
ในขณะที่เมื่อเริ่มคาบหลังในเวลา 15.00 น. ที่มีนักศึกษาบางส่วนเข้ามาเรียนเพิ่มเติม พบว่า นักศึกษาจำนวนครึ่งหนึ่ง (53.3%) ในช่วง 30 นาทีแรกของคาบหลังยังมีความกระตือรือร้นดี สดชื่น และมีสมาธิกับเนื้อหาในห้องเรียนอย่างดีเยี่ยม โดยที่ 1 ใน 3 ของนักศึกษา (26.7%)



รูปที่ 4 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิ SET และขอบเขตสภาวะน่าสบาย ในห้องบรรยาย 3, ข้อมูลตัวแทนฤดูร้อน (23–5–17) ฤดูฝน (29–6–17) และฤดูหนาว (11–1–18 และ 8–2–18) (Overall chart for SET index & thermal comfort in Lecture 3, using example data for summer (23-5-2017), rainy (2906-2017) and winter (11-1-18 & 8-2-18))



รูปที่ 5 แผนภูมิตัวอย่างการแสดงอุณหภูมิ SET และขอบเขตสภาวะน่าสบาย ในห้องบรรยาย 3, ข้อมูล #1 – ตัวแทนฤดูร้อน (23–5–17), #2 – ฤดูฝน (29–6–17) และ #3 – ฤดูหนาว (11–1–18) (Example of SET & thermal comfort zone in Lecture 3, Data#1 - summer (23-5-17); #2 – Rainy (29-6-17) & #3 - Winter (11-1-18 & 8-2-18))



จำนวนคนในห้อง	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ฤดูร้อน															
ฤดูฝน	0	5	8	7	7	5	5	4	3	0	0	0	0	0	0
ฤดูหนาว	0	2	3	3	3	0	4	4	10	37	50	50	67	84	75

รูปที่ 6 แผนภูมิระดับคาร์บอนไดออกไซด์ของห้องบรรยาย 3 เปรียบเทียบวันในฤดูร้อน ฤดูฝนและฤดูหนาว
(Carbon Dioxide levels chart and number of people in Lecture 3 during the survey in summer, rainy & winter)

รู้สึกเริ่มอ่อนเพลีย อึดอัด เหนื่อยและง่วงหาว แสดงให้เห็นว่านักศึกษามีความสดชื่นลดลงประมาณ 20% ของเมื่อเริ่มเข้าเรียน และเมื่อเวลาผ่านไปในช่วงกลางของคาบหลัง จำนวนนักศึกษาที่มีความรู้สึกอ่อนเพลีย อึดอัดและเหนื่อยหน่าย (53.3%) มีมากขึ้นกว่าสัดส่วนนักศึกษาที่รู้สึกอึดอัดในช่วงกลางของคาบแรก และเริ่มมีนักศึกษาบางส่วน (20%) พยายามเดินออกจากห้องเรียน ช่วงท้ายของคาบเรียนหลัง พบว่านักศึกษา 1 ใน 3 มีการเผลอหลับ และนักศึกษา 1 ใน 4 (26.7%) รู้สึกอ่อนเพลีย อึดอัดและเหนื่อยหน่าย

3.3 การวิเคราะห์ผลด้านการระบายอากาศ

จากการคำนวณตามอัตราการระบายอากาศจากมาตรฐาน ทั้ง 2 ลักษณะ คือ 1) ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2010) และ 2) สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (The Engineering Institute of Thailand, 2008) พบว่าอัตราการระบายอากาศของห้องทั้ง 2 ประเภท ล้วนไม่เพียงพอต่อการใช้งานทั้งสิ้น เนื่องจากไม่ได้มีการติดตั้งระบบเติมอากาศใหม่เข้าสู่พื้นที่เลย

โดยหากคำนวณด้วยวิธีที่ 1) อัตราการระบายอากาศตามมาตรฐานของห้องบรรยาย 3 มีการใช้งาน 2 ลักษณะ คือ จำนวนคนในห้อง 50 คน และ 84 คน มีการใช้งานต่อเนื่องกัน พบว่า อัตราการระบายอากาศของทั้ง 2 ลักษณะไม่เพียงพอต่อปริมาณคนเช่นเดียวกัน โดยอัตราการระบายอากาศตามมาตรฐานของห้องเรียน 50 คน และ 84 คน คือ 1,928 ลบ.ม. และ 3,239 ลบ.ม. ตามลำดับ (คำนวณจากอัตราการระบายอากาศตาม ASHRAE ระบุ 4-ACH หรือเทียบเท่า 7.14 ลิตรต่อวินาทีต่อคน) กรณีนี้ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในห้องไม่นาน แต่มีการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากคนจำนวนมาก จึงทำให้เกิดการสะสมก๊าซได้อย่างรวดเร็ว จึงมีข้อแนะนำในการติดตั้งพัดลมดูดอากาศชนิดติดผนัง ขนาด 300 ลบ.ม. ต่อชั่วโมง จำนวน 11 ตัว จึงจะเพียงพอต่อการใช้งานของคนสูงสุด (ที่สำรวจ) จำนวน 84 คน แต่ใช้ในระยะเวลาติดต่อกันยาวนาน 3 ชั่วโมง ต่อวัน

ทั้งนี้ หากคำนวณด้วยวิธีที่ 2) พบว่า อัตราการระบายอากาศตามมาตรฐานของห้องบรรยาย 3 ที่มีการใช้งาน 2 ลักษณะ พบว่า อัตราการระบายอากาศไม่เพียงพอต่อปริมาณคนเช่นเดียวกัน โดยอัตราการระบายอากาศตามมาตรฐานของห้องเรียน 50 คน และ 84 คน คือ 1,953 ลบ.ม. เท่ากันทั้ง 2 กรณี (คำนวนจากอัตราการระบายอากาศ 4 เท่าของปริมาตรห้องเรียน) ซึ่งในที่นี้แนะนำให้ติดตั้งพัดลมดูดอากาศชนิดติดผนัง ขนาด 300 ลบ.ม. ต่อชั่วโมง จำนวน 7 ตัว

ข้อสรุปตามคำแนะนำของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (The Engineering Institute of Thailand, 2008) กำหนดไว้ว่าควรใช้อัตราการระบายอากาศที่คำนวนได้เมื่อมีการใช้งานสูงสุด จึงมีข้อแนะนำว่าควรติดตั้งพัดลมดูดอากาศชนิดติดผนัง ขนาด 300 ลบ.ม.ต่อชั่วโมง ในห้องบรรยาย 3 จำนวน 11 ตัว (ดังตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 การคำนวนอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสมและคำแนะนำ (Ventilation rate calculation & improvement recommendation)

	Unit	**Lecture 3 -1**	**Lecture 3 -2**
Occupancy	people	50	-
		-	84
Area	m^2	128.5	128.5
Height	m	3.8	3.8
Volume	m^3	488.3	488.3
ACH standard (ASHRAE – 62.1) (ASHRAE, 2010)	**Standard value (L/person/s)**	7.14	7.14
	Actual ACH (m^3/room)	1927.8	3238.70
Recommendation	Wall type Exhausted fan (300 m^3/h)	6.45	10.80
	Number (fans)	7	11
The Engineering Institute of Thailand (The Engineering Institute of Thailand, 2008)	ACH standard (m^3)/room(h-m^2)	4	4
	Actual ACH (m^3)/room(h-m^2)	1953.2	1953.2
Recommendation	Wall type Exhausted fan (300 m^3/h)	6.51	6.51
	Number (fans)	7	7

4. การวิเคราะห์ผลข้อมูล

จากผลการวิจัยด้านสภาวะน่าสบายของห้องบรรยาย 3 พบว่า ฤดูฝนไม่สถานการณ์ที่อยู่ในขอบเขตสภาวะน่าสบาย ด้วยวิธีคิด PMV-PPD เลย แต่ถ้าหากวิเคราะห์ขอบเขตสภาวะน่าสบายแบบที่พิจารณาความคุ้นเคยกับสภาพอากาศและการปรับตัวกับสภาพอากาศของคนท้องถิ่นแล้ว (de Dear, Brager & Cooper, 1997) จะทำให้สามารถขยายขอบเขตการยอมรับสภาพอากาศได้มากขึ้น จากข้อสรุปขอบเขตสภาวะน่าสบายที่ยอมรับได้ในห้องเรียนที่ใช้เครื่องปรับอากาศ พบว่า อุณหภูมิที่ยอมรับของนักศึกษาในมหาวิทยาลัยในเขตกรุงเทพฯ อยู่ในช่วง 25.7 – 28 °C (Inkarojrit, Sirirachata, Sinjermsiri & Sinanant, 2008) ซึ่งใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิกลางที่คนรู้สึกสบาย (neutral temperature, Tn) (ASHRAE, 2010) จากการศึกษาในห้องบรรยาย 3 ซึ่งพบ Tn ในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว เป็น 25°C, 24.6°C และ 25.5°C เฉลี่ยอยู่ที่ 25.03°C ทั้งนี้ค่า Tn ที่พบมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นที่ที่ทำการสำรวจต่างกัน โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ย 30 ปี (ปี พ.ศ. 2524 – 2553) ของกรุงเทพฯ อยู่ที่ 25 – 30°C ในขณะที่เชียงใหม่ต่ำกว่าอยู่ที่ 20.8 – 32.2°C (Meteorological Informative Center, 2010) ในกรณีนี้ค่า SET ของฤดูร้อนและฤดูฝนแม้จะไม่อยู่ในช่วงขอบเขตสภาวะน่าสบาย แต่สามารถปรับสภาพแวดล้อมให้รู้สึกสบายขึ้นได้โดยการเปิดพัดลมช่วยเพิ่มความเร็วลม (Khedari, Yamtraipat, Pratintong & Hirunlabh, 2000, pp. 245-249) ที่กล่าวว่าในในฤดูฝนอาจต้องใช้พัดลมช่วยด้วยความเร็วลม 1 เมตรต่อวินาทีเพื่อทำให้อุณหภูมิ SET 29.46°C ในฤดูฝนอยู่ในขอบเขตสภาวะน่าสบาย อย่างไรก็ตามการใช้พัดลมช่วยอาจส่งผลกระทบต่อการเรียนการสอนหรือการทำงานได้ เนื่องจากความเร็วลมที่ระบุไว้ว่าจะไม่รบกวนสมาธิคือ 0.25 – 1.5 เมตรต่อวินาที (Olgyay, 1963)

งานวิจัยนี้พบว่าบ่อยครั้งนักศึกษามีอาการมึนศีรษะอ่อนเพลีย หรือง่วงนอนระหว่างการเรียน โดยจะเห็นได้ชัดจากช่วงเวลา 13.00–16.30 น. ในฤดูหนาวที่มีการสะสมก๊าซ CO_2 สูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิน 4,000 ppm สอดคล้องกับจำนวนคนเข้ามาใช้พื้นที่เพิ่มขึ้นจากคาบที่ 1 ในช่วงบ่ายเป็นเกือบ 2 เท่าตัวในคาบที่ 2 โดยไม่มีการเติมอากาศใหม่เข้ามาในพื้นที่ จากการศึกษาปริมาณการสะสมของก๊าซ CO_2 ในห้องเรียน พบสถานการณ์คล้ายคลึงกัน เช่น การศึกษาการรับรู้คุณภาพอากาศของอาคารสาธารณะของ ณัชจารีย์กร สวัสดิ์มงคลกุลและชุมพร มูรพันธุ์ (Sawatmongkhonkul & Moorapun, 2015, pp. 1583-1594) พบว่า องค์ประกอบของปัจจัยสภาพแวดล้อมทางกายภาพ ทำให้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิ ความชื้น และ CO_2 มีความแตกต่างกัน โดยที่ห้องเรียนนั้นมีคุณภาพอากาศที่ต่ำกว่ามาตรฐาน แม้ผู้ใช้งานจะรู้สึกสบายแต่ปริมาณก๊าซ CO_2 ที่วัดได้กลับมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน (2,500 ppm) โดยห้องเรียน 50 ที่นั่ง มีอุณหภูมิอยู่ในเกณฑ์ค่ามาตรฐาน จึงทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกสบาย ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ในขณะที่ผู้ใช้งานไม่รู้สึกถึงการระคายเคือง หรือรับรู้ได้น้อยถึงปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ที่มีอยู่ในอากาศ จึงทำให้ผู้ใช้งานยังรู้สึก

สบาย โดยผู้วิจัยได้ให้ข้อสังเกตที่น่าสนใจว่า แม้ว่าผลการเปรียบเทียบกับการรับรู้ของผู้ใช้จะแสดงให้เห็นว่าผู้ใช้งานอาคารยังไม่สามารถรับรู้ถึงมลพิษทางอากาศ แต่ระดับค่า CO_2 ถือว่าอยู่ในระดับที่เสี่ยงต่อการได้รับผลกระทบทางสุขภาพแล้ว ดังนั้นการออกแบบสภาพแวดล้อมกายภาพที่เหมาะสมและปลอดภัย ได้รับมลพิษทางอากาศต่ำ จึงเป็นสิ่งที่นักออกแบบควรคำนึงถึงเช่นเดียวกับการวิจัยของ อริสา กาญจนากระจ่าง และภารดี ช่วยบำรุง (Kanjanakrajan & Chuaybamroong, 2017) ทำการศึกษาอาคารเรียนในกลุ่มสุขศาสตร์ สังคมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ ในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในเขตปริมณฑล พบว่าความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ภายในห้องเรียนกลุ่มสุขศาสตร์อยู่ในช่วง 405–1,243 ppm (จำนวนนักศึกษา 1–73 คน) มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเฉลี่ย 0.29–0.37 ACH ขณะที่ห้องเรียนในกลุ่มสังคมศาสตร์พบความเข้มข้นของก๊าซ 395–3,458 ppm (จำนวนนักศึกษา 1–147 คน) มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเฉลี่ย 0.35–0.41 ACH ส่วนห้องเรียนในกลุ่มวิทยาศาสตร์พบความเข้มข้นของก๊าซ CO_2 ในช่วง 477–5,310 ppm (จำนวนนักศึกษา 1–175 คน) มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเฉลี่ย 0.81–0.85 ACH แสดงถึงการระบายอากาศที่ไม่พอทั้งสิ้น โดยพบการสะสมตัวของก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไปในทุกห้องที่ศึกษา นอกจากนั้นในต่างประเทศ ถึงแม้จะเป็นประเทศที่พัฒนาแล้วก็พบการตรวจวัดระดับก๊าซ CO_2 เกินกว่ามาตรฐานกำหนดเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่าในประเทศยุโรปมีการกำหนดขอบเขตปริมาณค่า CO_2 ที่ยอมรับได้ในห้องเรียนไว้ที่ 1,500 ppm ซึ่งสูงกว่าในประเทศไทย เช่นในข้อกำหนดของประเทศเยอรมนี และสวิสเซอร์แลนด์ (Deutsches Institut für Normung [DIN], 1994; Swiss Standards [SIA], 1992) แต่ระยะเวลาการได้รับก๊าซสะสมอาจมีผลต่อสุขภาพได้เช่นกัน งานวิจัยในห้องเรียนประเทศอิตาลี (Schibuola, Scarpa & Tambani, 2016, pp. 257-264) พบว่า CO_2 มีค่าสูงกว่า 1,500 ppm ถึง 78% (อยู่ในช่วงค่าเฉลี่ย 2,681 และ 2,433 ppm และสูงสุดเกิน 5,000 ppm) ในห้องเรียนจากการตรวจวัดในเดือนพฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2008 ซึ่งผู้ใช้งานได้มีการปรับพฤติกรรมด้วยการเปิดหน้าต่าง แต่การเปิดปิดหน้าต่างผู้วิจัยได้วิเคราะห์ว่าการเปิดหน้าต่างในช่วงสั้นๆ ประมาณ 1 ชั่วโมง มีผลกระทบต่ออุณหภูมิห้องที่เปลี่ยนไปคือ ลดลง 3°C แต่กระทบต่อการระบายอากาศอย่างมาก คือลดลงได้มากกว่า 3 เท่า จาก CO_2 3,300 ppm เป็น 900 ppm นอกจากนั้นการเปิดปิดหน้าต่างมีผลทำให้ปริมาณก๊าซสะสมในห้องลดลงอย่างมีนัยสำคัญ คือ ห้องที่มีการเปิดหน้าต่างหลังเลิกเรียนจนกระทั่งถึงเช้า ทำให้มี ACH 1.9 ต่อชม. มีปริมาณ CO_2 วัดได้ที่ 1,702 ppm น้อยกว่าห้องที่ไม่มีการเปิดหน้าต่างทิ้งไว้ คือมี ACH 0.4 ต่อชม. มีปริมาณ CO_2 วัดได้ที่ 2,569 ppm อย่างไรก็ตามผู้วิจัยสรุปว่าอัตราการใช้งานห้อง (occupancy rate) และอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อคน (ACH) ยังคงถือเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดต่อปริมาณการสะสมก๊าซ CO_2 การเปิดหน้าต่างในเวลาสั้นๆ แต่เปิดบ่อยๆ สามารถระบายก๊าซ CO_2 ได้ดีกว่าการเปิดหน้าต่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานานการตรวจวัดคุณภาพอากาศในห้องเรียนในประเทศฟินแลนด์ (Turunen et al., 2014, pp. 733-739) พบผลคล้ายคลึงกันคือ มีอัตราการระบายอากาศจริงอยู่ที่ 3.5 ลิตรต่อคนต่อวินาทีต่ำกว่าที่กฎหมายอาคารกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศฟินแลนด์ (Ministry of the Environment, 2012) กำหนดไว้ที่ 6 ลิตรต่อคนต่อวินาทีเกือบ 2 เท่า นอกจากนั้นยังพบความสัมพันธ์เชิงสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างอัตราการระบายอากาศที่เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของความพึงพอใจกับคุณภาพอากาศในห้องเรียนและในทางกลับกัน อย่างไรก็ตามในการวิจัยความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทางด้านคุณภาพสิ่งแวดล้อมภายในอาคารกับความพึงพอใจกับที่สถานทำงานโดยรวม พบว่ามีความสัมพันธ์แบบสัดส่วนกัน (Proportional factor) คือ ความพึงพอใจโดยรวมเพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นสัดส่วนกันของปัจจัยด้านคุณภาพอากาศ (Kim & de Dear, 2012, pp. 33-40)

การศึกษาอัตราการระบายอากาศที่แนะนำสำหรับห้องเรียนแบบปิด (Giffiths & Etekhari, 2008, pp. 556-560) พบว่า ห้องเรียนแบบปิดควรมีกลไกเปิดระบบระบายอากาศอัตโนมัติเมื่อมีปริมาณก๊าซ CO_2 สูงเกิน 1,500 ppm และควรมีการเปิดหน้าต่างให้เกิดการระบายอากาศมากกว่า 200 ลิตรต่อคนต่อวินาที เป็นเวลาไม่ต่ำกว่า 10 นาที เพื่อให้ค่าลดลงอยู่ที่ 1,000 ppm เนื่องจากอัตราการระบายอากาศ 8 ลิตรต่อคนต่อวินาทีเป็นข้อกำหนดอัตราที่น้อยเกินไปสำหรับห้องเรียนแบบปิด ทั้งนี้การวิจัยยังไม่ได้คำนึงถึงการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิระหว่างการเปิดปิดหน้าต่าง

กรณีห้องเรียนแบบเปิดในประเทศกรีซ (Santamouris et al., 2008) พบว่า แม้จะเป็นห้องเรียนที่มีการระบายอากาศโดยธรรมชาติและการเปิดพัดลม ยังคงพบการสะสมก๊าซ CO_2 เกินขอบเขตที่ ASHRAE 66-1999 (ASHRAE, 1999) แนะนำ คือ 1,000 ppm ได้ โดยพบการสะสมก๊าซ

เกิน 2,000 ppm ห้องเรียนที่มีการเปิดหน้าต่างระบายอากาศสูงถึง 18% ในขณะที่ห้องเรียนที่มีการเปิดพัดลมระบายอากาศพบที่ 5% อัตราการระบายอากาศที่แนะนำในห้องเรียนที่มีการเปิดหน้าต่างคือ 8 ลิตรต่อคนต่อวินาที ในทุกๆ 1,000 ppm

แนวทางการแก้ไขปัญหาด้านการระบายอากาศในห้องเรียนสามารถดำเนินการได้ตั้งแต่วิธีที่ใช้ต้นทุนน้อยที่สุด คือ การเปิดพัดลมช่วยเพิ่มความเร็วลม วิธีนี้สามารถขยายขอบเขตสภาวะน่าสบายได้ถึง 2°C (de Dear, Brager & Cooper, 1997) หรือการเปลี่ยนระบบปรับอากาศสำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ที่เป็นระบบตามมาตรฐาน ซึ่งจะมีระบบการเติมอากาศใหม่ประกอบอยู่ในระบบอยู่แล้ว ถึงแม้ว่าการเสนอแนะแนวทางการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้อาจจะเกิดข้อสงสัยว่ามีผลกระทบในด้านอื่นๆ ตามมาได้ แต่ผลกระทบด้านสมาธิไปจนถึงการหมดสติเนื่องจากการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถือเป็นผลกระทบต่อสุขภาพที่ร้ายแรงมากที่สุดจึงควรพิจารณาเป็นลำดับความสำคัญแรก ถ้าเทียบกับผลกระทบด้านสภาวะน่าสบาย หรือด้านการใช้พลังงาน

5. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะการปรับปรุง

จากการวิเคราะห์สภาวะน่าสบายในห้องบรรยาย 3 ที่มีการปรับอากาศในเวลาที่มีการเรียนการสอนเท่านั้น ทำให้เห็นว่า ห้องบรรยาย 3 มี Tn ในฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว เป็น 25°C, 24.6°C และ 25.5°C เฉลี่ยอยู่ที่ 25.03°C ในฤดูหนาว เป็นช่วงเดียวที่มีสภาพอากาศส่วนใหญ่อยู่ในขอบเขตสภาวะน่าสบาย แต่ในฤดูร้อน และฤดูฝน สภาพอากาศส่วนใหญ่อยู่ในระดับ “อุ่น” (warm) และ “ค่อนข้างอุ่น” (slightly warm) ตามลำดับ แม้ว่าจะมีการเปิดเครื่องปรับอากาศแล้ว ทั้งนี้มีข้อแนะนำคือ การเพิ่มความเร็วลมของเครื่องปรับอากาศหรือการเปิดพัดลม จะช่วยทำให้ลดระดับความรู้สึกไม่สบายได้ เช่น ในฤดูร้อน แนะนำการใช้ความเร็วลมเพิ่ม 2 เมตรต่อวินาที จะทำให้ความรู้สึก “อุ่น” ลดลงเป็นเกือบจะ “อยู่ในสภาวะน่าสบาย” ได้ ในขณะที่ฤดูฝน แนะนำให้ใช้ความเร็วลมเพิ่มเติมเพียงแค่ 1 เมตรต่อวินาทีก็ทำให้สภาพอากาศอยู่ในขอบเขตสภาวะน่าสบายแล้ว

ระดับก๊าซ CO_2 ในห้องบรรยาย 3 ในช่วงฤดูหนาวที่มีการเรียนการสอนเต็มที่ในวันอังคาร พบระดับก๊าซ CO_2 เกินค่ามาตรฐานอย่างรุนแรง โดยพบว่าแวลาส่วนใหญ่มีใช้ห้องในการเรียนการสอนตั้งแต่ 30 คน ขึ้นไปพบจำนวนก๊าซเกินระดับ 1,000 ppm ต่อเนื่องยาวนานกว่า 3 ชั่วโมง ตั้งแต่ 13.30 –16.30 น. ในทุกสัปดาห์ (ในทุกวิชาที่มีคนเรียนมากกว่า 40 คน ในระยะเวลานานกว่า 2 ชั่วโมง) และรุนแรงสูงสุดถึงเกือบ 5,000 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในช่วงเย็น 15.30–16.30 น. ซึ่งถือเป็นระดับที่มี “ความเสี่ยงต่อสุขภาพ” โดยความเสี่ยงลักษณะเช่นนี้ส่งผลต่อคนจำนวน 84 คน (ทุกคนในชั้นเรียน) จึงมีความจำเป็นอย่างเร่งด่วนในการแก้ปัญหานี้เนื่องจากเป็นภัยต่อสุขภาพของนักศึกษา โดยมีข้อแนะนำตามมาตรฐานการระบายอากาศของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (The Engineering Institute of Thailand, 2008) ให้ติดตั้งพัดลมดูดอากาศชนิดติดผนัง 300 ลบ.ม./วินาที จำนวน 7 ตัว โดยพัดลมเติมอากาศนี้ควรใช้ระบบเติมอากาศอัตโนมัติเมื่อมีระดับก๊าซสูงเกิน 1,500 ppm ในขณะที่หากคำนวณตามมาตรฐานสมาคมปรับอากาศสหรัฐอเมริกา (ASHRAE) แนะนำว่าควรติดตั้งพัดลมชนิดเดียวกันเพิ่ม 11 ตัว ในกรณีนี้แนะนำว่าควรติดตั้งจำนวน 11 – 12 ตัวเนื่องจากมีความจำเป็นต้องระบายก๊าซ CO_2 ออกจากพื้นที่ห้องเรียนอย่างรวดเร็วเพื่อไม่ให้เกิดการสะสมก๊าซเกิน 1,000 ppm เป็นระยะเวลานาน ทั้งนี้ระดับก๊าซ CO_2 ที่สูงในระดับนี้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการมึนศีรษะ วิงเวียน ระดับสมาธิลดลง ง่วงนอน อ่อนเพลีย และอาจเกิดการหมดสติได้ ผลกระทบในด้านพลังงานอาจทำให้ระบบปรับอากาศทำงานหนักขึ้นได้บ้าง หรืออาจกระทบต่อสภาวะน่าสบายของผู้ใช้งานแต่สามารถแก้ไขปัญหาได้โดยเปิดพัดลมติดเพดานเพื่อช่วยเพิ่มความเร็วลม วิธีนี้สามารถขยายขอบเขตสภาวะน่าสบายได้ถึง 2 °C

อย่างไรก็ตามการศึกษาพฤติกรรมของผู้เรียนกับระดับก๊าซ CO_2 ในการวิจัยนี้ ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบคาบเรียนที่มีการสอนในลักษณะบรรยายทั้งหมดกับการสอนแบบผู้เรียนมีส่วนร่วม มีความเป็นไปได้เช่นกันว่าอาการง่วงนอนและไม่มีสมาธิ อาจเกิดจากปัจจัยส่วนบุคคล หรือ ลักษณะการเรียนการสอนในรายวิชา ร่วมกับระดับก๊าซ CO_2 ที่สูงเกินเกณฑ์ร่วมด้วย

References

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (1999). *ASHRAE 62- Ventilation for acceptable indoor air quality*. Atlanta: Author.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2010). *ASHRAE 62.1 standard thermal environmental conditions for human occupancy*. Atlanta: Author.

Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (2007). *Thermal comfort. PLEA Notes: Passive and low energy architecture international, design tools and techniques* (2nd revision ed.). In association with Department of Architecture, The University of Queensland, Brisbane.

Bureau of Environmental Health (2018). *WHO guidelines for indoor air quality for official staffs*, Department of Health, Ministry of Public Health: Bangkok, p. ค-3.

de Dear, R. J., Brager, G., & Cooper, D. (1997). *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference* (Final report ASHRAE RP- 884). Australia: Macquarie Research.

Deutsches Institut für Normung [DIN]. (1994). *DIN 1946 – Part 2, Heating, ventilation and air conditioning – Requirements relating to health (VDI code of practice)*. Berlin: Author.

Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press.

Godish, T. (2001). *Indoor environmental quality*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, Lewis Publishers.

Griffiths, M., & Eftekhari, M. (2008). Control of CO2 in a naturally ventilated classroom. *Energy and Buildings, 40*(4), 556-560.

Hoyt, T., Schiavon, S., Piccioli, A., Cheung, T., Moon, D., & Steinfeld, K. (2017). *CBE Thermal comfort tool*. Center for the Built Environment, University of California Berkeley. Retrieved from http://comfort.cbe.berkeley.edu/.

Inkarojrit, V., Sirirachata, V., Sinjermsiri, C., & Sinanant, K. (2008). *Exploring the variation of the desired thermal sensation in tropical climate: A pilot study*. Dublin, Ireland: University of Westminster.

Kanjanakrajang, A., & Chuaybamroong, P. (2017). Measurements of Carbon Dioxide to Determine the Ventilation Effectiveness in the Classroom. *Thai Science and Technology Journal, 25*(6), 960-974.

Khamta, J. (2015). A Study of the relation between teaching behaviors of teacher and learning behavior of students Faculty of Business Administration at Thai-Nichi Institute of Technology. *Veridian E-Journal, Silpakorn University, 8*(2), 1528-1542.

Khedari, J., Yamtraipat, N., Pratintong, N. & Hirunlabh, J. (2000). Thailand ventilation comfort chart. *Energy and Buildings, 32*(3), 245-249.

Kim, J., & de Dear, R. (2012). Nonlinear relationships between individual IEQ factors and overall workspace satisfaction. *Building and Environment, 49*, 33-40.

Meteorological Informative Center (2010). *Climitological data for period 1981-2010*, Northern Meteorological Center, Chiang Mai, Thai Meteorological Department.

Ministry of the Environment (2012). *The National Building Code of Finland, D2: Indoor climate and ventilation of buildings*. Adopted in Helsinki on March 30th 2011. Retrieved March, 2018 from http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012 Suomi.pdf.

Muangkeaw, K. (2018). Indoor Air Quality in Office Buildings. *Journal of Department of Science Service, Ministry of Science and Technology*, 1-14.

Myhrvold, A. N., Olsen, E., & Lauridsen, Ø. (1996). Indoor environment in schools – Pupils health and performance in regard to CO_2 concentrations. *Proceedings of Indoor Air' 96: the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, (pp. 369 - 374,). Nagoya, Japan.

Muangkaew, K. (2016). Indoor air quality in office buildings. *Journal of Department of Science Service Ministry of Science and Technology*, 1-14.

Northern Meteorological Center. (2010). *Climitological data for period 1981-2010 (Report)*. Chiang Mai, Thailand: Metrorological Department.

Olgyay, V. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism* (4th ed.). New Jersey: Princeton University Press.

Santamouris, M., Synnefa, A., Asssimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M., Gaitani, N., Koloskotsa, D., & Assimakopoulos, V. (2008). Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings, 40*, 1833-1843.

Sawatmongkhonkul, N., & Moorapun, C. (2015). Perception of interior air quality in public buildings. *Veridian E-Journal, Slipakorn University, 8*(2), 1583-1594.

Schibuola, L., Scarpa, M., & Tambani, C. (2016). Natural ventilation level assessment in a school building by CO_2 concentration measures. Energy Procedia 101, 71st *Conference of the Italian Thermal Machaines Engineering Association, ATI2016,* 14-16 September 2016, (pp. 257-264). Turin, Italy.

Swiss Standards [SIA]. (1992). *SIA 328/1: Tecnical requirements for ventilation systems*. Zurich: Schweizerische Normen Vereinigung.

The Engineering Institute of Thailand (2008). *Building Audit Techniques for Safety*, Engineering Institute of Thailand: Bangkok, pp. 142-14.

The Engineering Tool Box. (2016). *Air change rates for typical rooms and buildings*. Retrieved December 8, 2016 from http://www.engineeringtoolbox.com/air-change-rate-room-d_867.html.

Turunen, M., Toyinbo, O., Putus, T., Nevalainen, A., Shaughnessy, R., & Haverian-Shaughnessy, U. (2014). Indoor environmental quality in school buildings, and the health and wellbeing of students. *International Journal of Hygiene and Environmental Health, 217*, 733-739.

Waeochan, N. (2017). Interior Architectural Student's Learning Behavior: Case Study of the KMITL's Interior Architecture Curriculum. *Journal of the Faculty of Architecture King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 25*(2), 107-123.