

การตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการระบายอากาศภายในห้องเรียน

Measurements of Carbon Dioxide to Determine the Ventilation Effectiveness in the Classroom

อริสา กาญจนกระจำง และภารดี ช่วยบำรุง*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศูนย์รังสิต ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

Arisa Kanjanakrajang and Paradee Chuaybamroong*

Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,

Rangsit Centre, Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพการระบายอากาศของห้องเรียนในมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในเขตปริมณฑล โดยเลือกห้องเรียนขนาดความจุ 200 คน จำนวน 3 ห้อง จากอาคารเรียนในกลุ่มสุขศาสตร์ สังคมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ โดยใช้การตรวจวัดระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระหว่างที่มีการเรียนการสอนภายในห้องทุก ๆ 5 นาที ด้วยเครื่องมือชนิด non-dispersive infrared analyzer ที่อ่านค่าได้เลยในทันทีจำนวน 2 เครื่อง พร้อม ๆ กัน ค่าที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) ที่กำหนดให้ภายในอาคารที่มีผู้ใช้งานควรมีระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกิน 1,000 ppm อันแสดงถึงการระบายอากาศที่พอเพียงกับจำนวนคนภายในห้อง และมีการคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมง (air change rate per hour, ACH) เพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ASHRAE ที่กำหนดให้ห้องเรียนควรมีค่าไม่น้อยกว่า 6 ACH ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียนกลุ่มสุขศาสตร์อยู่ในช่วง 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 ส่วนห้องเรียนในกลุ่มวิทยาศาสตร์พบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 477-5,310 ppm (จำนวนนักศึกษา 1-175 คน) มีอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเฉลี่ย 0.81-0.85 ACH แสดงถึงการระบายอากาศที่ไม่พอทั้งสิ้น โดยพบการสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไปในทุกห้องที่ศึกษา

คำสำคัญ : ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์; การระบายอากาศ; อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ

*ผู้รับผิดชอบบทความ : paradee@tu.ac.th

Abstract

This study investigated the ventilation effectiveness of classrooms in the university in suburb area. Three classrooms for maximum capacity of 200 students were selected from the health science, social science, and science buildings. Carbon dioxide concentrations were monitored every 5 min in the classroom during the session using 2 non-dispersive infrared analyzers which are a direct-reading type in order to compare with the ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) standard of 1,000 ppm. Any room that the carbon dioxide concentration does not exceed 1,000 ppm and the air change rate is not less than 6 ACH means adequate ventilation for the numbers of people inside. The study found that carbon dioxide concentration in the health science building's classroom was in a range of 405-1,243 ppm (with 1-73 students in the classroom) and the average air change rate was 0.29-0.37 ACH. Carbon dioxide concentration in the social science building's classroom was in a range of 395-3,458 ppm (with 1-147 students) and the average air change rate was 0.35-0.41 ACH. In science building, carbon dioxide in the classroom was found in a range of 477-5,310 ppm (1-175 students) while the average air change rate was 0.81-0.85 ACH. Therefore, the ventilation rates for all classrooms were inadequate. The accumulation of carbon dioxide was also observed from the beginning to the end of each session.

Keywords: carbon dioxide gas; ventilation; air change rate

1. บทนำ

วิถีชีวิตของคนส่วนใหญ่ในปัจจุบันอาศัยอยู่ภายในอาคารมากถึง 90% ของเวลาทั้งหมดในแต่ละวัน [1] หรือคิดเป็น 22 ชั่วโมง/วัน ไม่ว่าจะเป็นการอยู่ภายในอาคารที่พักอาศัย ในสำนักงาน สถาบันการศึกษา ห้างสรรพสินค้า สถานบันเทิง สถานที่ออกกำลังกาย ฯลฯ การออกแบบอาคารส่วนใหญ่มักเป็นระบบปิดเพื่อประหยัดพลังงานจากการปรับอากาศ ทำให้อากาศจากภายนอกถ่ายเทเข้าสู่ภายในอาคารได้น้อย หากการนำอากาศเข้ามีไม่เพียงพอกับความ ต้องการจะส่งผลให้เกิดการสะสมของสารมลพิษซึ่ง เป็นได้ทั้งฝุ่น เส้นใย ก๊าซและไอระเหยของสารเคมี รวมถึงมลสารทางชีวภาพ โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นหนึ่งในก๊าซมลพิษภายในอาคารที่ถูกปล่อยออกมา

จากลมหายใจของผู้ที่อยู่ในอาคารตลอดเวลา จัดเป็น ตัวแทนของสิ่งปลดปล่อยทางชีวภาพที่ออกมาจากร่างกายมนุษย์ (bioeffluent) ซึ่งง่ายต่อการตรวจวัด หากเทียบกับสิ่งปลดปล่อยชนิดอื่น เช่น กลิ่นตัวหรือ กลิ่นเหม็น แม้ว่าอันตรายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เองอาจมีไม่มากเท่าสารมลพิษชนิดอื่น ๆ แต่หากอาคารนั้นมีการระบายอากาศที่ไม่เหมาะสมหรือไม่เพียงพอ จะสามารถพบการสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยง่าย อันสะท้อนถึงโอกาสการได้รับ สารมลพิษชนิดอื่น ๆ ที่เป็นอันตรายภายในอาคารได้ด้วยเช่นกัน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการระบายอากาศ [2] ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานของ ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning

Engineers) กำหนดให้มีการนำอากาศเข้าจากภายนอกเข้ามาในอัตรา 9.5 ลิตร/วินาที/คน เพื่อเจือจางสารมลพิษที่อาจจะมีภายในอาคารทั่วไป และอัตรา 7.14 ลิตร/วินาที/คน ในกรณีของโรงเรียน ซึ่งการนำอากาศจากภายนอกเข้ามาในอัตรานี้จะพอเพียงในการคงระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ไม่เกิน 1,000 ppm อยู่ตลอดเวลา [3] โดยมีการศึกษาวิจัยในประเทศนอร์เวย์ที่พบว่าหากนักเรียนได้รับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในความเข้มข้นที่มากกว่า 1,500 ppm นักเรียนนั้นมีอาการปวดศีรษะ วิงเวียน รู้สึกหนักศีรษะ หดแรงแรง และไม่มีสมาธิ อันส่งผลต่อประสิทธิภาพการเรียนรู้เป็นอย่างมีนัยสำคัญ โดยหากความเข้มข้นนั้นเพิ่มขึ้นไปอีกเป็น 1,500-4,000 ppm พบว่านักเรียนมีอาการระคายเคือง จมูก น้ำมูก น้ำตาไหล ไอ ซึ่งเป็นอาการระคายเคืองของระบบทางเดินหายใจส่วนต้น [4] การตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นที่นิยมในการประเมินประสิทธิภาพของการระบายอากาศโดยทั่วไป

สำหรับประเทศไทยแล้ว การศึกษาการระบายอากาศโดยการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในห้องเรียนของสถาบันการศึกษานั้นมีอยู่น้อยมาก การศึกษานี้จึงสนใจที่จะตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องเรียนขนาดความจุ 200 คน ของอาคารเรียนในกลุ่มสุขศาสตร์ สังคมศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ในมหาวิทยาลัยว่ามีมากน้อยเพียงใด ความเข้มข้นที่พบสามารถประเมินประสิทธิภาพของการระบายอากาศ อันเป็นการเอื้ออำนวยต่อความสามารถในการเรียนรู้ การสร้างสมาธิ และความจำของนักศึกษาที่มาเรียนได้ ซึ่งหากระบบระบายอากาศไม่มีประสิทธิภาพจะทำให้เกิดความรู้สึกอึดอัด ไม่สบาย ง่วงซึม ขาดสมาธิในการเรียนรู้ หรือหากอากาศในห้องนั้นมีสารปนเปื้อนที่เป็นอันตรายหรือกระทั่งเชื้อก่อโรค ก็อาจเกิดการแพร่

กระจายจนเป็นอันตรายต่อสุขภาพได้โดยง่าย โดยในการศึกษานี้มีการคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องเพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ ASHRAE ที่กำหนดไว้ที่ $6-20 \text{ h}^{-1}$ ด้วย [5] ซึ่งอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศยิ่งมาก หมายถึงยิ่งมีการเจือจางหรือถ่ายเทอากาศภายในห้องได้ดียิ่งขึ้น ผลการศึกษาที่ได้สามารถใช้เป็นต้นแบบให้กับการศึกษาอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกัน อันนำไปสู่การพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพการระบายอากาศให้มีความเหมาะสมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

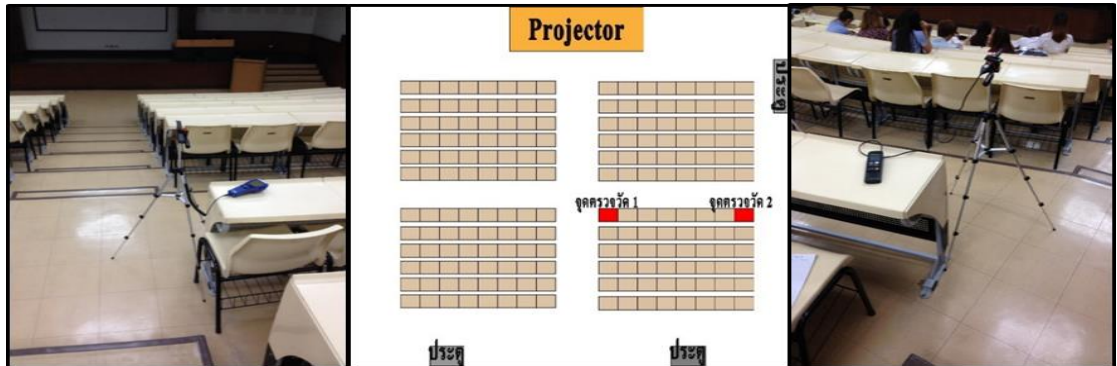
การศึกษานี้ใช้เครื่องวัด TSI Q-TRAK Indoor Air Quality Meter model 9555 ใช้หัววัด (probe) model 982 ที่มีช่วงของการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0-5,000 ppm มีค่าความถูกต้อง (accuracy) ± 50 ppm และ Testo Model 535 ที่มีช่วงของการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0-9,999 ppm มีค่าความถูกต้อง ± 75 ppm โดยทั้งคู่เป็นเครื่องมือชนิด non-dispersive infrared analyzer ใช้วัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียนทุก 5 นาที พร้อม ๆ กัน โดยอุปกรณ์ทั้งสองผ่านการสอบเทียบ (calibrate) การตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1,000 ppm จากบริษัทตัวแทนจำหน่ายก่อนการใช้งาน

การตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กระทำภายในห้องเรียนขนาดความจุ 200 คน จำนวน 3 ห้อง ในอาคารกลุ่มสุขศาสตร์ (รูปที่ 1) กลุ่มสังคมศาสตร์ (รูปที่ 2) และกลุ่มวิทยาศาสตร์ (รูปที่ 3) อย่างน้อยห้องละ 3 จุด ในช่วงเดือนพฤศจิกายน 2557 ถึง มีนาคม 2558 ในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน โดยแต่ละห้องตรวจวัด 2 จุด ที่ระดับความสูง 1.1-1.5 เมตร ซึ่งเป็นระดับของการหายใจ (breathing zone) และมี

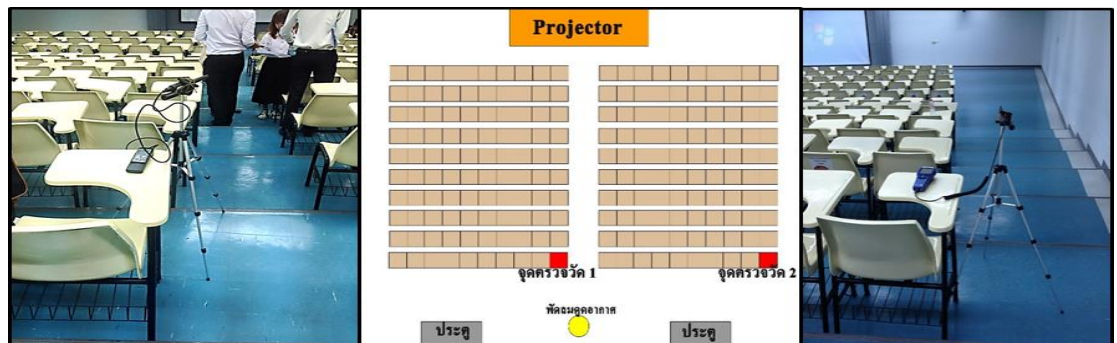
การนับจำนวนคนภายในห้องไปพร้อม ๆ กัน

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้นำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐาน ASHRAE ที่กำหนดให้อาคารที่มีผู้ใช้งานควรมีระดับ

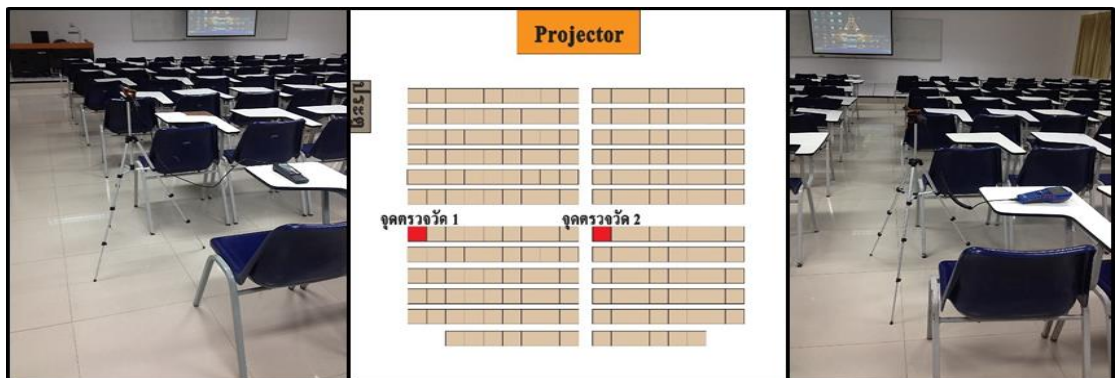
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกิน 1,000 ppm ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่แสดงถึงการระบายอากาศที่พอเพียงกับจำนวนคนภายในห้อง ส่วนอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) คำนวณจากสมการที่ 1



รูปที่ 1 จุดตรวจวัดในห้องเรียน อาคารเรียนกลุ่มสุขศาสตร์



รูปที่ 2 จุดตรวจวัดในห้องเรียน อาคารเรียนกลุ่มสังคมศาสตร์



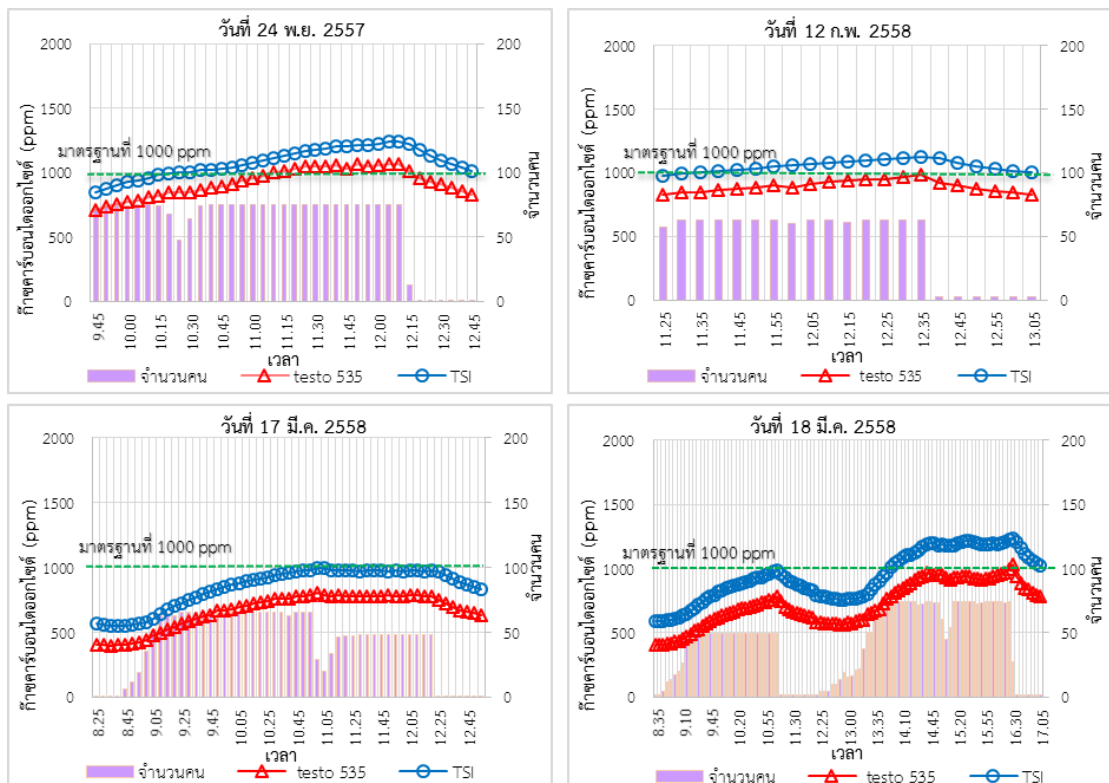
รูปที่ 3 จุดตรวจวัดในห้องเรียน อาคารเรียนกลุ่มวิทยาศาสตร์

$$ACH = [\ln \left(\frac{C_o}{C_i} \right)] / t \quad (1)$$

โดย C_o มาจากความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุดท้ายที่ยังคงมีผู้เรียนอยู่ในห้อง; C_i คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใด ๆ หลังผู้เรียนออกไปจากห้อง; t คือ จำนวนชั่วโมง

หลังผู้เรียนออกไปจากห้อง [3]

ค่า ACH ที่คำนวณได้นำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน ASHRAE ที่กำหนดให้อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศต่อชั่วโมงสำหรับห้องเรียนไม่ควรน้อยกว่า 6 ACH [5]



รูปที่ 4 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และจำนวนคนในห้องเรียนอาคารกลุ่มสุขศาสตร์

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

3.1 ห้องเรียนในอาคารกลุ่มสุขศาสตร์

จากการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียนของอาคารเรียนในกลุ่มสุขศาสตร์ทุก ๆ 5 นาที ด้วยอุปกรณ์ TSI (จุดที่ 1 ตำแหน่งกลางห้อง) และ Testo 535 (จุดที่ 2 ตำแหน่งริมห้อง ข้างทางเดิน) และนับจำนวนคนภายในห้องไปพร้อม ๆ กัน ทั้งหมด 4 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4 โดยกราฟแท่งหมายถึงจำนวนคน กราฟเส้นหมายถึง

ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เครื่องวัด TSI และ Testo 535

จากรูปที่ 4 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียนครั้งที่ 1 (24 พ.ย. 2557) เริ่มที่เวลา 09:45 น. มีค่า 705-848 ppm (จากอุปกรณ์ 2 เครื่อง) และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาที่ผ่านไปจนเกินเกณฑ์มาตรฐาน 1,000 ppm หลังจากเริ่มเรียนไปแล้ว 40 นาที สำหรับอุปกรณ์ TSI ที่วัด ณ ตำแหน่งกลางห้อง จนกระทั่งเวลา 12:10 น. ก่อนเลิก

ชั้นเรียนความเข้มข้นของก๊าซวัดได้สูงสุดที่ 1,066-1,243 ppm จำนวนคนเฉลี่ยในห้อง 73 คน โดยระหว่างเวลา 10:20-10:30 น. มีการพัก 10 นาที นักศึกษาส่วนหนึ่งออกไปจากห้องแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่อย่างใด เมื่อเลิกเรียนที่เวลา 12:15 น. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มลดลงอย่างชัดเจนหลังนักศึกษาออกไปจากห้องจนหมด ในครั้งที่ 2 (12 ก.พ. 2558) เริ่มตรวจวัดที่เวลา 11:25 น. พบความเข้มข้นของก๊าซเริ่มต้นที่ 823-978 ppm และภายในเวลา 1 ชั่วโมง 10 นาที ความเข้มข้นของก๊าซเพิ่มขึ้นได้อีก 145-156 ppm ทั้งที่จำนวนคนคงที่เฉลี่ย 62 คน เมื่อเลิกชั้นเรียนจึงเห็นการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อนักศึกษาออกไปจากห้อง โดยการศึกษาครั้งที่ 1 และ 2 เริ่มตรวจวัดในขณะที่มีนักศึกษานั่งรออยู่ในห้องเรียนแล้ว ความเข้มข้นเริ่มต้นจึงเข้าใกล้ 1,000 ppm ในการศึกษาครั้งที่ 3 (17 มี.ค. 2558) จึงเริ่มตรวจวัดให้ไวขึ้นในขณะที่ยังไม่มีนักศึกษาโดยเริ่มที่เวลา 08:25 น. พบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 405-565 ppm จากนั้นเมื่อนักศึกษาเริ่มทยอยเข้ามาในห้อง ความเข้มข้นจึงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จาก 439-577 ppm ที่เวลา 09:00 น. เพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่าตัวเป็น 806-994 ppm ที่เวลา 11:00 น. จำนวนคนภายในห้องตั้งแต่เวลา 09:10 น. ถึง 10:55 น. เฉลี่ย 65 คน หลังเลิกเรียน นักศึกษาทยอยออกจากห้อง แต่มีนักศึกษาชุดใหม่เข้ามาทดแทนเพื่อเรียนวิชาใหม่ โดยเริ่มเรียนที่เวลา 11:15 น. จำนวนคนชุดใหม่นั้นเฉลี่ยอยู่ที่ 48 คน แม้ว่าจำนวนคนในช่วงที่ 2 จะน้อยกว่าช่วงแรก แต่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับคงที่ต่อเนื่องมาจากช่วงแรกไม่ได้ลดลงตามจำนวนคน แสดงว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการสะสมตัวอยู่ในห้องไม่มีการระบายออก และเมื่อชั้นเรียนเลิกในเวลา 12:25 น. จึงค่อย ๆ เห็นการลดลงของก๊าซ

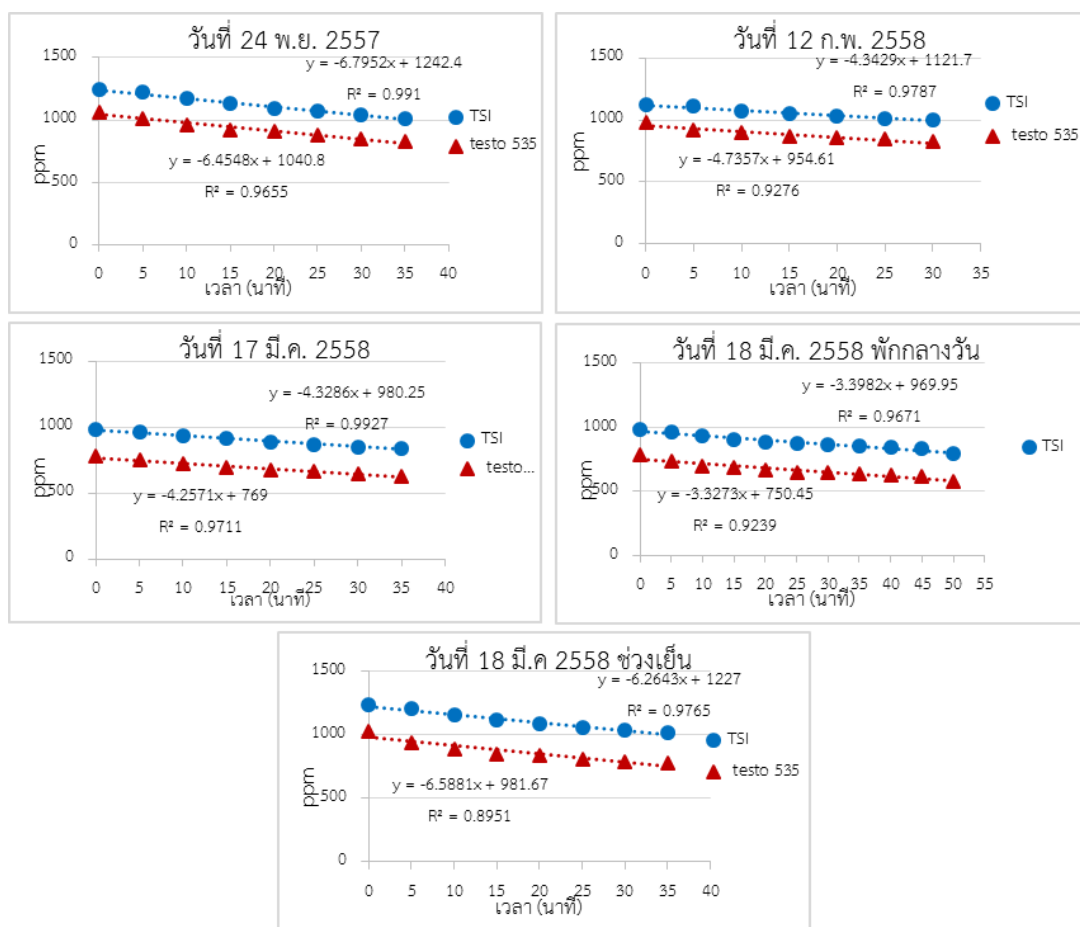
คาร์บอนไดออกไซด์

ในการศึกษาครั้งที่ 4 (18 มี.ค. 2558) เริ่มเวลา 08:35 น. ก่อนนักศึกษาเข้าห้องเรียนและสิ้นสุดในตอนเย็นที่เวลา 17:05 น. ในช่วงเช้าพบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 408-594 ppm มีนักศึกษาในชั้นเรียนเฉลี่ย 49 คน ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อย ๆ เพิ่มความเข้มข้นขึ้นจนไปสูงสุดที่เวลา 11:10 น. ที่ 782-984 ppm ซึ่งไม่เกินมาตรฐาน ASHRAE โดยเป็นไปได้ว่าจำนวนคนภายในห้องมีน้อยกว่าครั้งอื่น ๆ ที่ตรวจวัดและยังไม่มี การสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก่อนหน้า จากนั้นเป็นเวลาพักกลางวันซึ่งไม่มีชั้นเรียน ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงลดลงมาอยู่ในช่วง 563-759 ppm ในช่วงบ่ายมีการเรียนการสอนอีกครั้งที่เวลา 13:30 น. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงกลับมาเพิ่มขึ้นใหม่ในช่วงบ่ายซึ่งมีนักศึกษาเฉลี่ย 74 คน โดยความเข้มข้นสูงสุดนั้นพบที่เวลา 16:30 น. ก่อนเลิกเรียนเล็กน้อย โดยพบ 1,031-1,239 ppm และเมื่อเลิกชั้นเรียน นักศึกษาออกจากห้อง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงลดลงอีกครั้ง ในกรณีของเครื่อง TSI นั้นพบว่าตลอดช่วงบ่ายความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกินค่ามาตรฐานอยู่ตลอดเวลา โดยความแตกต่างของตัวเลขที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดทั้งสองนั้น มีทั้งความเป็นไปได้ว่ามาจากจุดตรวจวัดที่ต่างตำแหน่งกันและมาจากความคลาดเคลื่อนของตัวอุปกรณ์เอง แต่ยากที่จะบอกได้ว่าอุปกรณ์ชิ้นใดเที่ยงตรงมากกว่ากันเนื่องจากในการสอบเทียบความเที่ยงตรง (calibration) ตัวแทนจำหน่ายเครื่องมือนั้นสอบเทียบที่ความเข้มข้น 1,000 ppm เพียงจุดเดียว ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองนั้นวัดได้ตรงกันที่จุดดังกล่าว

เมื่อนำความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าสุดท้ายก่อนที่นักศึกษาจะออกจาก

ห้องเรียนมาพล็อตกราฟใหม่ สามารถแสดงการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องได้ดังรูปที่ 5

จากนั้นคำนวณอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 5 การลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียน อาคารกลุ่มสุขศาสตร์

ตารางที่ 1 อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ของห้องเรียน อาคารกลุ่มสุขศาสตร์

จุดตรวจวัด	24 พ.ย. 57	12 ก.พ. 58	17 มี.ค. 58	18 มี.ค. 58 เที่ยง	18 มี.ค. 58 เย็น	เฉลี่ย
จุดที่ 1 (TSI) กลางห้อง	0.36	0.25	0.29	0.23	0.34	0.29±0.06
จุดที่ 2 (Testo 535) ริมห้อง	0.42	0.32	0.37	0.30	0.46	0.37±0.07

จากตารางพบว่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศเฉลี่ยจากการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ 2 เครื่องเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.29-0.37 ACH ซึ่งไม่ถึงเกณฑ์

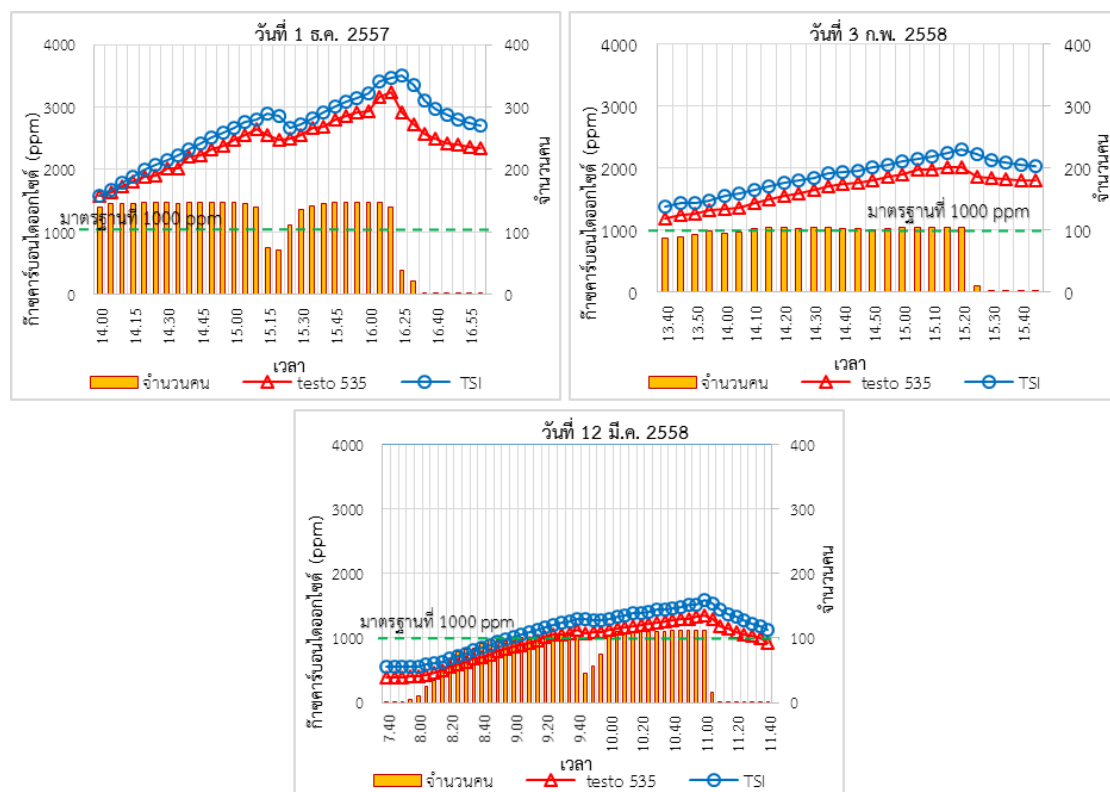
มาตรฐานของ ASHRAE ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 6 ACH แสดงให้เห็นว่าการระบายอากาศของห้องเรียนยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะเจือจางก๊าซคาร์บอนได-

ออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการหายใจของผู้เรียนภายในห้องได้ ห้องเรียนมีขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 17 เมตร และสูง 5 เมตร โดยประมาณ ระบบจ่ายอากาศของห้องเรียนเป็นแบบทอลมส่งอากาศมาที่หัวจ่ายกระจายอยู่บนเพดานห้อง และมีจุดดูดอากาศออกอยู่บนเพดานห้องเช่นเดียวกัน โดยจุดดูดอากาศออกมีเพียงแถวเดียวบริเวณกลางห้อง ซึ่งชัดเจนว่าไม่เพียงพอ การสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรากฏสะท้อนถึงความเป็นไปได้ที่สารมลพิษอื่น ๆ หรือเชื้อก่อโรคอื่น ๆ จะสามารถสะสมตัวอยู่ในห้องได้เป็นเวลานานจนก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ที่อยู่ในห้องได้ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ทดลองวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายนอกห้องเรียน ทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 35 นาที พบว่าความเข้มข้น

ของก๊าซจากเครื่องมือ TSI เฉลี่ย 674 ppm และจากเครื่อง Testo 535 เฉลี่ย 384 ppm (แตกต่างกัน 290 ppm โดยไม่สามารถระบุได้ว่าเครื่องมือใดเที่ยงตรงมากกว่ากัน) โดยตลอดเวลาที่ตรวจวัดนั้น ระดับความเข้มข้นของก๊าซค่อนข้างจะคงที่ (ไม่ได้แสดงรูป) จึงชัดเจนว่าความเข้มข้นที่พบภายในห้องเรียนนั้นมาจากลมหายใจของผู้ที่อยู่ในห้อง

3.2 ห้องเรียนในอาคารกลุ่มสังคมศาสตร์

การตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียนของอาคารเรียนในกลุ่มสังคมศาสตร์ กระทำทั้งหมด 3 ครั้ง มีการสลับอุปกรณ์ Testo 535 ไปไว้จุดที่ 1 (กลางห้อง) และอุปกรณ์ TSI ไปไว้จุดที่ 2 (ริมห้อง ข้างทางเดิน) และนับจำนวนคนภายในห้อง ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และจำนวนคนในห้องเรียน อาคารเรียนกลุ่มสังคมศาสตร์

จากรูปที่ 6 พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียนอาคารกลุ่มสังคมศาสตร์ ครั้งที่ 1 (1 ธ.ค. 2557) ที่เวลาเริ่มต้น 14:00 น. นั้นเกินค่ามาตรฐาน ASHRAE อยู่แล้ว (1,569-1,586 ppm) โดยค่าที่ตรวจวัดได้ค่อนข้างใกล้เคียงกันระหว่างเครื่องมือ 2 เครื่อง ภายในห้องมีนักเรียนนั่งรอเรียนอยู่ 147 คน จากนั้นในช่วงเวลา 15:15-15:25 น. มีการพักและนักเรียนออกไปนอกห้องครึ่งหนึ่งของชั้นเรียน จึงเห็นการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ชัดเจน ก่อนจะกลับมาเพิ่มความเข้มข้นขึ้นใหม่ในช่วงที่ 2 ซึ่งถึงแม้ว่าจำนวนคนภายในห้องในช่วงที่สองจะเท่ากับช่วงแรก แต่ความเข้มข้นของก๊าซนั้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงสุดที่ 3,242-3,458 ppm ก่อนเลิกชั้นเรียน แล้วจึงลดลงเมื่อมีนักเรียนออกไปจากห้อง ส่วนการศึกษาครั้งที่ 2 (3 ก.พ. 2558) กระทำในช่วงบ่ายเช่นเดิมโดยมีนักเรียนอยู่ภายในห้องเฉลี่ย 104 คน ความเข้มข้นเริ่มต้นอยู่ที่ 1,192-1,370 ppm ซึ่งเกินมาตรฐาน ASHRAE อีกเช่นกัน อาจเป็นเพราะมีการเรียนการสอนมาก่อนหน้าที่จะไปตรวจวัด จึงมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตกค้างอยู่ แต่นับจากเวลา 13:40 น. เป็นต้นไปจนถึง 15:20 น. แม้ว่าจำนวนคนจะคงที่แต่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนสูงสุดที่ 2,022-2,298 ppm ก่อนจะลดลงเมื่อนักเรียนออกไปจากห้องหลังเลิกชั้นเรียน ส่วนในการตรวจวัดครั้งที่ 3 (12 มี.ค. 2558) เป็นการตรวจวัดตั้งแต่เช้ายังไม่มีนักเรียนเข้าชั้นเรียน ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงอยู่ที่ 395-561 ppm ซึ่งชัดเจนว่าค่าที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ TSI นั้น

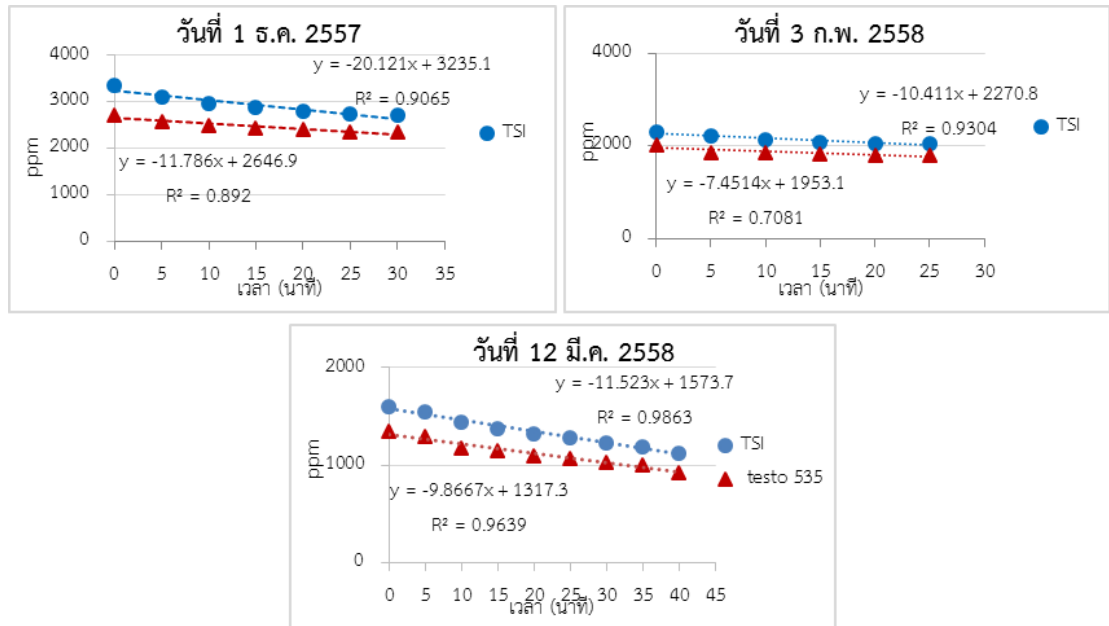
สูงเกินอุปกรณ์ Testo 535 เนื่องจากไม่มีปัจจัยเรื่องจำนวนคนในจุดตรวจวัดที่ต่างกันเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อมีนักศึกษาทยอยเข้ามาในห้องเรียน ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป โดยมีการลดความเข้มข้นลงเล็กน้อยในช่วงพักที่เวลา 09:45 น. ซึ่งนับจากเวลา 08:00 น. เป็นต้นไป การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จาก 414-565 ppm จนไปเกินค่ามาตรฐานจากอุปกรณ์ทั้ง 2 เครื่อง (1,065-1,163 ppm) ใช้เวลาเพียง 1 ชั่วโมง 20 นาที จากนั้นความเข้มข้นได้เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงสุดที่ 1,350-1,592 ppm จำนวนคนเฉลี่ยในห้องหลังพักอยู่ที่ 112 คน แม้ว่าจำนวนคนในการศึกษาครั้งที่ 3 นี้จะมากกว่าในครั้งที่ 2 แต่ความเข้มข้นของก๊าซนั้นกลับน้อยกว่า ซึ่งน่าจะมาจากช่วงเวลาที่ตรวจวัดในครั้งที่ 3 นั้นเริ่มตั้งแต่เช้าที่ยังไม่มีการสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้อง ขณะที่การศึกษาในครั้งที่ 2 เริ่มในช่วงบ่าย จึงมีการสะสมของก๊าซมาก่อนหน้าแล้ว ความเข้มข้นของก๊าซในระหว่างการเรียนการสอนจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

เมื่อนำค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าสุดท้ายมาพล็อตกราฟใหม่เพื่อแสดงการลดลงตามสภาพการระบายอากาศของห้องเรียนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 และแสดงอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศได้ดังตารางที่ 2

จากตารางพบว่า การแลกเปลี่ยนอากาศของห้องเรียนในอาคารกลุ่มสังคมศาสตร์ไม่ถึงเกณฑ์มาตรฐานของ ASHRAE ที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 6 ACH เช่นกัน โดยในแต่ละวันที่ตรวจวัดมีอัตราการแลกเปลี่ยน

ตารางที่ 2 อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศ (ACH) ของห้องเรียน อาคารกลุ่มสังคมศาสตร์

จุดตรวจวัด	1 ธ.ค. 2557	3 ก.พ. 2558	12 มี.ค. 2558	เฉลี่ย
จุดที่ 1 (Testo 535) กลางห้อง	0.29	0.24	0.53	0.35±0.15
จุดที่ 2 (TSI) ริมห้อง	0.41	0.29	0.52	0.41±0.11



รูปที่ 7 การลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียน อาคารกลุ่มสังคมศาสตร์

เปลี่ยนอากาศแตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะการเปิดประตูหลังเลิกเรียนในแต่ละครั้ง เช่น เปิดแล้วปิดในทันที หรือเปิดทิ้งไว้จนกว่านักศึกษาจะออกจากห้องจนหมด ภายในห้องเรียนใช้ระบบปรับอากาศแบบมีท่อส่งลมจ่ายมาที่หัวจ่ายบนเพดานห้องซึ่งกระจายอยู่ทั่วห้อง และมีพัดลมดูดอากาศชนิดใบพัดหมุนอยู่บริเวณด้านหลังห้อง 1 ตัว ทางด้านหน้าของห้องที่มีอุปกรณ์ projector มีขนาดกว้าง 17 เมตร ด้านหลังห้องซึ่งมีประตูเข้า-ออก 2 ประตู มีขนาดกว้าง 10 เมตร ห้องยาว 19 เมตร และสูง 4 เมตร โดยประมาณ ชัดเจนว่าการระบายอากาศภายในห้องไม่เพียงพอที่จะเจือจางระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ในเกณฑ์ความเข้มข้น 1,000 ppm ตามที่ต้องการได้ และจากการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายนอกห้องเรียนทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 25 นาที พบว่าความเข้มข้นของก๊าซจากเครื่องมือ TSI เฉลี่ย 682 ppm และจากเครื่องมือ Testo 535 เฉลี่ย 420 ppm (แตกต่างกัน 262 ppm โดยไม่สามารถระบุ

ได้ว่าเครื่องมือใดเที่ยงตรงมากกว่ากัน) โดยตลอด 25 นาที ที่ตรวจวัดนั้น ระดับความเข้มข้นของก๊าซค่อนข้างคงที่ (ไม่ได้แสดงรูป) จึงชัดเจนว่าความเข้มข้นที่พบภายในห้องเรียนนั้นมาจากลมหายใจของผู้ที่อยู่ในห้อง

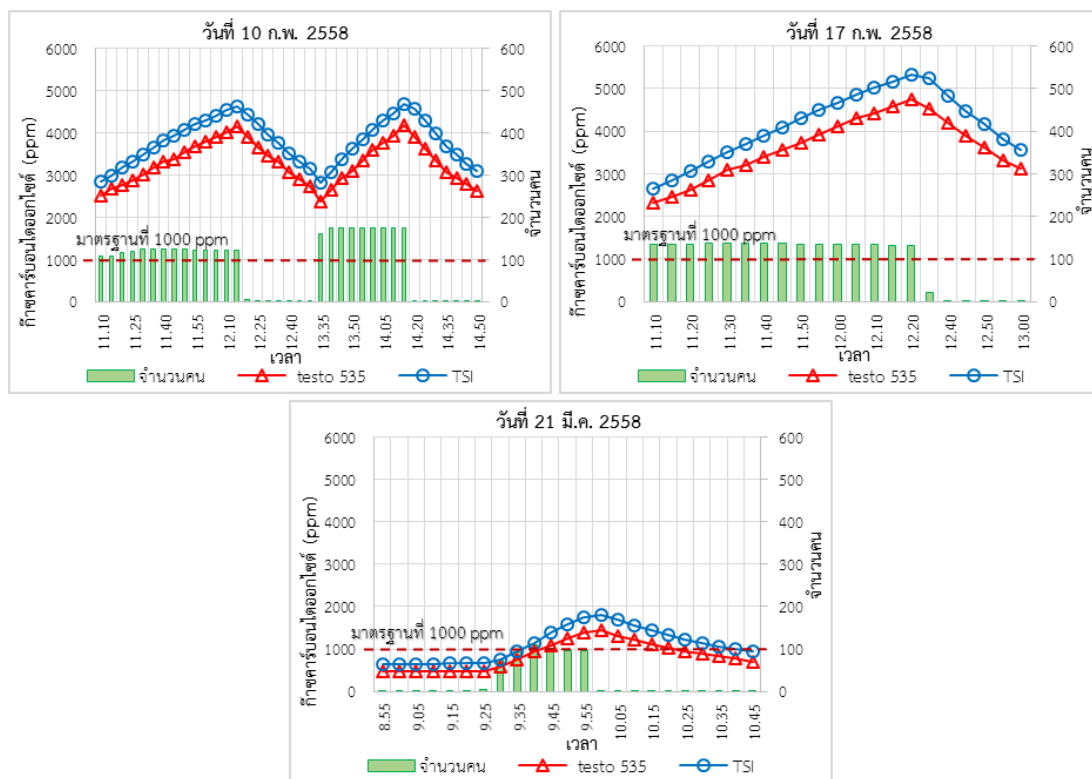
3.3 ห้องเรียนในอาคารกลุ่มวิทยาศาสตร์

ผลการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในอาคารบรรยายเรียนรวมของกลุ่มวิทยาศาสตร์ด้วยอุปกรณ์ Testo 535 (จุดที่ 1 ริมห้อง ข้างทางเดิน) และ TSI (จุดที่ 2 กลางห้อง) และจำนวนคนภายในห้อง จำนวน 3 ชั่วโมง แสดงได้ดังรูปที่ 8

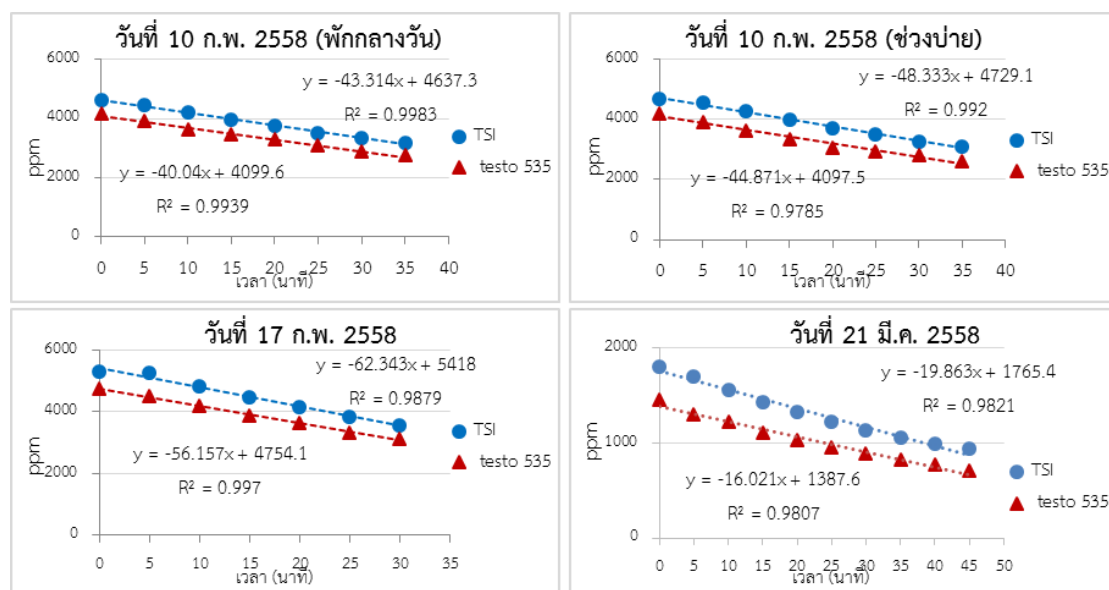
จากรูปที่ 8 พบว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องบรรยายรวมอาคารกลุ่มวิทยาศาสตร์ ครั้งที่ 1 (10 ก.พ. 2558) เริ่มต้นที่เวลา 11:10 น. อยู่ที่ 2,503-2,839 ppm ซึ่งเกินค่ามาตรฐาน 1,000 ppm อยู่แล้ว ภายในห้องมีนักศึกษาเฉลี่ย 124 คน ความเข้มข้นของก๊าซนั้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนสูงสุดที่ 4,151-4,639 ppm ที่เวลา 12:15 น. โดยใช้เวลาเพียง

1 ชั่วโมง 5 นาที ในการเพิ่มความเข้มข้นดังกล่าว จากนั้นจึงพักกลางวันตั้งแต่เวลา 12:20 น. ถึง 13:30 น. โดยที่นักศึกษาเปิดประตูห้องทิ้งไว้ จึงเห็นการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างชัดเจน ในช่วงบ่าย เริ่มเรียนที่เวลา 13:35 น. มีนักศึกษาเฉลี่ย 175 คน ซึ่งถึงแม้การเรียนการสอนจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ เพียง 40 นาที (13:35-14:15 น.) แต่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นกลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จาก 2,385-2,816 ppm ไปเป็น 4,185-4,672 ppm ซึ่งเกือบจะถึงค่าที่ยอมให้มีได้ในการทำงาน 8 ชั่วโมง (TLV, threshold limit value) ในงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ที่ 5,000 ppm โดย NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health), OSHA (Occupational Safety and Health Administration) และ ACGIH (American Con-

ference of Governmental Industrial Hygienist) ของสหรัฐอเมริกา [6] ก่อนที่ความเข้มข้นของก๊าซจะลดลงเมื่อนักศึกษาออกไปจากห้องเรียนเมื่อเวลา 14:20 น. ในการศึกษาครั้งที่ 2 (17 ก.พ. 2558) เริ่มที่เวลาเดิม คือ 11:10 น. พบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 2,310-2,641 ppm (มีนักศึกษาเฉลี่ย 175 คน) ภายในเวลา 1 ชั่วโมง 10 นาที ความเข้มข้นของก๊าซเพิ่มขึ้นเป็น 4,737-5,310 ppm ซึ่งเกินค่าที่ยอมให้มีได้ในงานอุตสาหกรรม หลังจากที่นักศึกษาออกจากห้องไปที่เวลา 12:35 น. ความเข้มข้นของก๊าซจึงลดลง สำหรับการศึกษาครั้งที่ 3 (21 มี.ค. 2558) เริ่มตรวจวัดตั้งแต่เวลา 08:55 น. ก่อนที่นักศึกษาจะเข้าชั้นเรียน ซึ่งชัดเจนว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน 1,000 ppm โดยพบอยู่ในช่วง 477-648 ppm



รูปที่ 8 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และจำนวนคนในห้องเรียน อาคารกลุ่มวิทยาศาสตร์



รูปที่ 9 การลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียน อาคารกลุ่มวิทยาศาสตร์

ตารางที่ 3 อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องเรียน อาคารกลุ่มวิทยาศาสตร์

จุดตรวจวัด	10 ก.พ. 2558 เที่ยง	10 ก.พ. 2558 บ่าย	17 ก.พ. 2558	21 มี.ค. 2558	เฉลี่ย
จุดที่ 1 (Testo 535) ริมห้อง	0.72	0.83	0.88	0.98	0.85±0.11
จุดที่ 2 (TSI) กลางห้อง	0.68	0.76	0.85	0.94	0.81±0.11

ในช่วงเข้ามีการเรียนการสอนเพียงช่วงสั้น ๆ จากเวลา 09:30 น. ถึง 09:55 น. เท่านั้น โดยมีนักศึกษาในห้องเรียนเฉลี่ย 96 คน พบว่าภายในเวลา 25 นาที ความเข้มข้นของก๊าซสามารถเพิ่มขึ้นได้ 876-1,066 ppm (ที่เวลา 10:00 น. มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1,455-1,811 ppm) ก่อนที่ความเข้มข้นนั้นจะลดลงเมื่อนักศึกษาออกไปจากห้องจนต่ำกว่า 1,000 ppm อีกครั้ง หลังจากผ่านไป 40 นาที เมื่อนำค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าสุดท้ายมาพล็อตกราฟใหม่ สามารถแสดงการลดลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องเรียนได้ดังรูปที่ 9 และแสดงอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศได้ดังตารางที่ 3

จากตารางพบว่าอัตราการแลกเปลี่ยนอากาศของห้องเรียนในอาคารกลุ่มวิทยาศาสตร์ แม้ว่าจะสูงกว่าห้องเรียนในอาคารกลุ่มสุสาสตร์และสังคมศาสตร์ แต่ก็ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะเจือจางก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากกระบวนการหายใจได้ ซึ่งจากการสำรวจสภาพภายในห้องเรียนพบว่าระบบปรับอากาศภายในห้องใช้เครื่องปรับอากาศแบบติดผนังจำนวน 6 เครื่อง มีพัดลมดูดอากาศแบบใบพัดหมุนอยู่ใต้เครื่องปรับอากาศจำนวน 6 เครื่อง เช่นกัน ห้องมีขนาดกว้าง 10 เมตร ยาว 14 เมตร สูง 3 เมตร โดยประมาณ ในระหว่างการเรียนการสอนไม่พบว่ามีเปิดพัดลมดูดอากาศจึง

น่าจะเป็นสาเหตุทำให้การสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีความเข้มข้นที่สูงมากกว่าห้องเรียนในอาคารอื่น โดยห้องเรียนไม่มีการเติมอากาศใหม่จากภายนอกเข้ามาเลย โอกาสที่จะเกิดการสะสมตัวหรือตกค้างของสารมลพิษหรือเชื้อก่อโรคอื่น ๆ ภายในห้องเรียนจึงมีสูงมากจนสร้างผลกระทบให้กับผู้เรียน-ผู้สอนได้ โดยจากการทดลองวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายนอกห้องเรียนทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที พบว่าความเข้มข้นของก๊าซจากเครื่องมือ TSI เฉลี่ย 636 ppm และจากเครื่อง Testo 535 เฉลี่ย 350 ppm (แตกต่างกัน 286 ppm โดยไม่สามารถระบุได้ว่าเครื่องมือใดเที่ยงตรงมากกว่ากัน) โดยระดับความเข้มข้นของก๊าซค่อนข้างจะคงที่ตลอดเวลาที่ตรวจวัด (ไม่ได้แสดงรูป) จึงชัดเจนว่าความเข้มข้นที่พบภายในห้องเรียนนั้นมาจากมลพิษของผู้ที่อยู่ภายในห้อง

สำหรับการศึกษาอื่น ๆ ในลักษณะเดียวกันในประเทศบราซิลมีการศึกษาคุณภาพอากาศภายในห้องเรียนของมหาวิทยาลัย 5 แห่ง ซึ่งตั้งอยู่ในเขตชานเมือง 4 แห่ง และในกลางเมือง 1 แห่ง โดยแบ่งเป็นห้องเรียนที่ใช้การระบายอากาศตามธรรมชาติและห้องเรียนที่ใช้เครื่องปรับอากาศจำนวนอย่างละ 15 ห้อง ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องนาน 2 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 09:00-11:00 น. พบว่าห้องที่ระบายอากาศตามธรรมชาติที่มีจำนวนนักศึกษาในห้องเฉลี่ย 29 คน มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 520.12 ± 37.25 ppm ขณะที่ห้องปรับอากาศที่มีจำนวนนักศึกษาเฉลี่ย 24 คน มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1433.62 ± 252.8 ppm โดยผู้วิจัยไม่สังเกตพบประสิทธิภาพของการเรียนลดลงในความเข้มข้นของก๊าซที่ระดับดังกล่าว แต่อภิปรายเพิ่มเติมว่าในกรณีที่มีความเข้มข้นของก๊าซสูงถึง 2,500 ppm พบว่าความสามารถในการตัดสินใจระหว่างการทำแบบทดสอบโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ลดลง โดย

คะแนนการทดสอบนั้นลดจากระดับ 9 มาเหลือระดับ 7 และหากความเข้มข้นของก๊าซนั้นเพิ่มเป็น 4,000 ppm พบว่ามีผลต่อการขาดสมาธิของผู้เรียน [7] ส่วนการศึกษาในประเทศอิตาลี มีการตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องเรียนของมหาวิทยาลัยจำนวน 2 ห้อง ซึ่งมีขนาดและลักษณะทางกายภาพที่ต่างกัน โดยห้องที่ 1 มีปริมาตรห้อง 1,320 ลูกบาศก์เมตร มีประตูทางเข้า 2 ประตู คือ ทางด้านข้างและด้านหลังของห้อง มีหน้าต่างทั้งทางด้านซ้ายและขวาของห้อง ระหว่างการศึกษานักเรียนนั้นเปิดอยู่ตลอดเวลา ห้องนี้สามารถจุนักศึกษาได้ 250 คน ห้องที่ 2 มีปริมาตร 475 ลูกบาศก์เมตร มีประตูทางเข้าประตูเดียวทางด้านหลังของห้อง มีหน้าต่างทางด้านซ้ายและขวาเช่นกัน แต่ในระหว่างการศึกษามีการเปิดหน้าต่างเพียงบางส่วนเท่านั้น ห้องนี้สามารถจุนักศึกษาได้ 90 คน ผลการศึกษาพบว่าห้องเรียนที่ 1 เมื่อมีนักศึกษาภายในห้อง 60 คน พบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 900 ppm ซึ่งยังไม่เกินค่ามาตรฐานของ ASHRAE แต่เมื่อนักศึกษาเพิ่มขึ้นเป็น 150 คน ความเข้มข้นของก๊าซนั้นเพิ่มเป็น 2,500-2,900 ppm ทั้ง ๆ ที่มีการระบายอากาศตามธรรมชาติจากการเปิดหน้าต่าง ขณะที่ห้องที่ 2 มีนักศึกษา 30 คน อยู่ตลอดเวลา พบความเข้มข้นของก๊าซ 1,600-1,900 ppm ทั้ง ๆ ที่มีการเปิดหน้าต่างเป็นบางส่วนด้วยเช่นกัน โดยผู้วิจัยสรุปว่าการระบายอากาศตามธรรมชาติเพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอต่อการเจือจางความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รวมถึงก๊าซมลพิษอื่น ๆ ที่อาจจะมียู่ภายในห้อง การสำรวจความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นประโยชน์ในการประเมินประสิทธิภาพของการระบายอากาศดังกล่าว [8] นอกจากนี้ยังมีการศึกษาในประเทศไทยที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT) ในห้องเรียนจำนวน

2 ห้อง ด้วยเช่นกัน แต่ละห้องมีปริมาตร 162 ลูกบาศก์เมตร ห้องที่ 1 เป็นห้องปรับอากาศที่ใช้ระบบศูนย์รวม (central air system) พบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 711 ± 272 ppm ในระหว่างตรวจวัดมีนักศึกษาภายในห้อง 135 ± 35 คน/ชั่วโมง ส่วนห้องที่ 2 ใช้เครื่องปรับอากาศแบบติดผนัง (split type) พบความเข้มข้นของก๊าซ $1,332 \pm 609$ ppm โดยมีนักศึกษาภายในห้อง 159 ± 19 คน/ชั่วโมง ซึ่งผู้วิจัยระบุว่าจำนวนนักศึกษาที่มากกว่าในห้องที่ 2 มีผลต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่า โดยไม่ได้อภิปรายถึงความแตกต่างของการใช้เครื่องปรับอากาศต่างชนิดกันแต่อย่างใด [9]

4. สรุป

ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเรียนที่ตรวจวัดมีการสะสมตัวขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาที่ผ่านไปแม้ว่าจำนวนผู้เรียนจะคงที่ แสดงว่าไม่มีการนำอากาศใหม่เข้ามาช่วยเจือจางความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไม่มีการระบายอากาศเสียออกไปจากห้อง จึงไม่สามารถควบคุมความเข้มข้นของก๊าซไม่ให้เกิน 1,000 ppm ตามมาตรฐานของ ASHRAE ได้ อัตราการแลกเปลี่ยนอากาศที่พบจึงต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 6 ACH เป็นอย่างมาก เมื่อไม่มีการนำอากาศใหม่เข้ามา และ/หรือ ดูดอากาศเสียออกไปจากห้อง จำนวนนักศึกษาภายในห้องจึงเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องเรียนโดยตรง การเรียนการสอนในช่วงเช้าจึงมีโอกาสดังกล่าว ความเข้มข้นของก๊าซภายในห้องจะต่ำกว่า 1,000 ppm ได้มากกว่าช่วงบ่าย เนื่องจากไม่มีการสะสมตัวของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากชั้นเรียนก่อนหน้านี้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้อำนวยการกองงานอาคารสถานที่ และคณาจารย์จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะนิติศาสตร์ และคณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาอนุญาตให้เข้าศึกษาในขณะที่มีการเรียนการสอน จนการศึกษานี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. รายการอ้างอิง

- [1] US EPA, 2016, The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality, Available Source: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/inside-story-guide-indoor-air-quality>, December 6, 2016.
- [2] Muscatello, N., McCarthy, A., Kielb, C., Hsu, W.H., Hwang, A.A. and Lin, S., 2015, Classroom conditions and CO₂ concentrations and teacher health symptom reporting in 10 New York State schools, Indoor Air 25: 157-167.
- [3] Godish, T., 2001. Indoor Environmental Quality, CRC Press LLC, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 480 p.
- [4] Myhrvold, A.N., Olsen, E. and Lauridsen, Ø., 1996, Indoor Environment in Schools – Pupils Health and Performance in Regard to CO₂ Concentrations, pp. 369-374, Proceedings of Indoor Air' 96: the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Nagoya, Japan.
- [5] The Engineering Tool Box, Air Change Rates for Typical Rooms and Buildings, Available Source: http://www.engineeringtoolbox.com/air-change-rate-room-d_867

- .html, December 8, 2016.
- [6] CDC-NIOSH 2016, Carbon dioxide, Available Source: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/6603.pdf>, December 8, 2016.
- [7] Jurado, S.R., Bankoff, A.D.P. and Sanchez, A., 2014, Indoor air quality in Brazilian Universities, Int. J. Environ. Res. Public Health. 11: 7081-7093.
- [8] Marchetti, N., Cavazzini, A., Pasti, L. and Catani, M., 2015, A Campus Sustainability Initiative: indoor Air Quality Monitoring in Classrooms, 2015 XVIII AISEM Annual Conference.
- [9] Klinmalee, A., Srimongkol, K. and Kim Oanh, N.T., 2009, Indoor air pollution levels in public buildings in Thailand and exposure assessment, Environ. Monit. Assess. 156: 581-594.