

## การพัฒนาระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับห้องปรับอากาศ

บุญยสิริ บุญเป็ง<sup>1\*</sup> กฤษดา ยิ่งขยัน<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ต.ช้างเผือก อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50300

อุเทน บุญเลียม<sup>3</sup>

บริษัทเห็นเนออี้ อินโนเวชั่น จำกัด อุทยานวิทยาศาสตร์ ภาคเหนือ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 50100

และ ชวโรจน์ ใจสิน<sup>4</sup>

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

\* Corresponding Author: p\_boonpeng@hotmail.com

<sup>1</sup> อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>2</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

<sup>3</sup> กรรมการผู้จัดการ

<sup>4</sup> รองศาสตราจารย์ วิทยาลัยพลังงานทดแทน

### ข้อมูลบทความ

### บทคัดย่อ

#### ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 15 กรกฎาคม 2564

แก้ไข : 8 พฤษภาคม 2565

ตอบรับ : 18 พฤษภาคม 2565

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.12

#### คำสำคัญ :

การควบคุมแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์สำหรับห้องปรับ

อากาศ / การระบายอากาศ /

คุณภาพอากาศในอาคาร

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับห้องปรับอากาศ ด้วยเงื่อนไขการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันไดตามช่วงปริมาณแก๊ส รวมถึงการศึกษ้อัตราการสะสมของแก๊สและอัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศ ผลการควบคุมปริมาณแก๊สในห้องปรับอากาศ ซึ่งมีการสะสมของแก๊สที่อัตรา 25.92 ppm/min เป็นเวลา 120 นาที ด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นที่พัฒนาขึ้น โดยใช้เงื่อนไขการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันได ซึ่งระบบระบายอากาศเริ่มทำงานที่ปริมาณแก๊ส 1,000 ppm ทำให้ได้ปริมาณแก๊สเฉลี่ยในช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่ 60-120 นาที เท่ากับ 1,528.2 ppm และใช้กำลังจริงรวมเท่ากับ 4.07 kWh ซึ่งเป็นการใช้กำลังจริงรวมเพิ่มขึ้น 1.39 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการทดลองที่ไม่มีการระบายอากาศ เมื่อปรับลดเงื่อนไขการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันได โดยให้ระบบระบายอากาศเริ่มทำงานที่ปริมาณแก๊ส 750 ppm ทำให้ได้ปริมาณแก๊สเฉลี่ยเท่ากับ 1,362 ppm และใช้กำลังจริงรวมเท่ากับ 4.19 kWh ซึ่งเพิ่มขึ้น 1.43 เท่า สุดท้ายเมื่อให้ระบบระบายอากาศทำงานโดยใช้อัตราการระบายอากาศสูงสุดตลอดระยะเวลาของการทดลอง ส่งผลให้ได้ปริมาณแก๊สเฉลี่ยเท่ากับ 919 ppm และใช้กำลังจริงรวมสูงสุดเท่ากับ 6.98 kWh ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 2.4 เท่า ในกรณีกิจกรรมที่สามารถยอมรับปริมาณแก๊สภายในห้องให้อยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1,500 ppm สามารถใช้เงื่อนไขการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันได ซึ่งจะส่งผลให้ประหยัดการใช้กำลังไฟฟ้าได้ประมาณ 40%

## Development of Carbon Dioxide Concentration Control System for an Air-Conditioned Room

Poonyasiri Boonpeng<sup>1\*</sup>, Krisda Yingkayun<sup>2</sup>,

Rajamangala University of Technology Lanna, Chang Phueak, Muang, Chiang Mai 50300

Uten Boonliam<sup>3</sup>

Tenergy Innovation Co., Ltd., Science and Technology Park, Mueang, Chiang Mai 50100

and Chawaroj Jaisin<sup>4</sup>

Maejo University, Nong Han, San Sai, Chiang Mai 50290

\* Corresponding Author: p\_boonpeng@hotmail.com

<sup>1</sup> Lecturer, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering.

<sup>3</sup> Managing Director.

<sup>4</sup> Associate Professor, School of Renewable Energy.

### Article Info

#### Article History:

Received: July 15, 2021

Revised: May 8, 2022

Accepted: May 18, 2022

DOI : 10.14456/kmuttrd.2022.12

**Keywords :** Carbon Dioxide Concentration Control for an Air-conditioned Room / Ventilation / Indoor Air Quality

### Abstract

The research aimed to develop a carbon dioxide concentration control system for an air-conditioned room by using step control conditions for ventilation rate according to the CO<sub>2</sub> level. In addition, the accumulation of CO<sub>2</sub> and ventilation rate of the ventilation system were systematically investigated. In the case when the control system started at the CO<sub>2</sub> concentration of 1,000 ppm and the accumulation of CO<sub>2</sub> concentration was 25.92 ppm/min for 120 min, the average concentration over the period of 60-120 min turned out to be 1,528.2 ppm. At such conditions, the consumption of total real power was 4.07 kWh, which was 1.39 times compared to the case with no ventilation. When the step control condition of the control system changed to start at the concentration of 750 ppm, the average concentration of 1,362 ppm and the power consumption of 4.19 kWh were noted; this represented an increase in the power consumption of 1.43 times. Finally, when using the maximum ventilation rate for 120 min, the average concentration of 919 ppm and the power consumption of 6.98 kWh were noted; the power consumption increased with 2.4 times. In the case where the CO<sub>2</sub> level of around 1,500 ppm could be accepted, operation of control system with step control condition for ventilation led to the saving of the power consumption of approximately 40%.

## 1. บทนำ

ระบบปรับอากาศสำหรับห้องบรรยายและห้องสำนักงานในประเทศไทย ส่วนใหญ่เป็นระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split-type air conditioning unit) เนื่องจากเป็นระบบปรับอากาศที่ติดตั้งและใช้งานง่าย เหมาะสมสำหรับอาคารเรียนหรืออาคารสำนักงานที่แบ่งพื้นที่ออกเป็นห้องขนาดเล็กหลาย ๆ ห้อง หรือเหมาะสมสำหรับอาคารเก่า ซึ่งมีข้อจำกัดในการติดตั้งระบบปรับอากาศชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม ระบบปรับอากาศแบบดังกล่าวไม่มีระบบการเติมอากาศหรือแลกเปลี่ยนอากาศจากภายนอก มีเพียงแต่การติดตั้งพัดลมระบายอากาศเพื่อระบายอากาศออกไปยังภายนอกห้อง ในขณะที่ขณะเดียวกันการเติมอากาศใหม่เข้ามาในห้องอาศัยการแทรกซึมของอากาศผ่านรูรั่วตามขอบประตูหน้าต่าง หรือผ่านการเปิด-ปิดประตู และการใช้งานห้องในลักษณะดังกล่าวไม่ค่อยได้คำนึงถึงเรื่องการระบายอากาศซึ่งพบรายงานการระบายอากาศที่ไม่เพียงพอและทำให้เกิดการสะสมของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงในห้องบรรยาย โดยปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตรงกับจำนวนผู้ใช้ห้อง [1-2] นอกจากนี้ ยังพบปัญหาที่คล้ายคลึงกันเกี่ยวกับการระบายอากาศในห้องเรียนแบบปรับอากาศ ที่โรงเรียนมัธยมทางตอนเหนือของประเทศอิตาลี [3]

ตามกฎกระทรวงมหาดไทย ฉบับที่ 33 (พ.ศ.2535) และฉบับที่ 39 (พ.ศ.2537) ที่ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 ได้กำหนดอัตราการระบายอากาศขั้นต่ำของห้องบรรยายและห้องสำนักงานไว้ที่ 7 เท่าของปริมาตรของห้องใน 1 ชั่วโมง ในลักษณะเดียวกันกฎหมายควบคุมอาคารของกระทรวงสิ่งแวดล้อมประเทศฟินแลนด์ ได้กำหนดอัตราการระบายอากาศไว้ที่ 8 ลิตรต่อวินาทีต่อคน [4] รวมทั้งสมาคมวิศวกรการทำความร้อน ความเย็น และการปรับอากาศแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) ได้กำหนดมาตรฐาน ASHRAE 62.1 ซึ่งกำหนดอัตราการระบายอากาศสำหรับพื้นที่สำนักงานไว้ที่ 7.5 ลิตรต่อวินาทีต่อคน [5] วัตถุประสงค์ของการกำหนดอัตราการระบายอากาศดังกล่าวคือเพื่อปรับปรุงหรือควบคุมคุณภาพอากาศภายในห้องหรืออาคาร (Indoor Air Quality) ไว้ในระดับที่ยอมรับได้ หากมีอัตราการระบายอากาศ

ที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน อาจทำให้ปริมาณมลพิษทางอากาศภายในห้องหรืออาคารสะสมและเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการทำงานและสุขภาพอนามัย มลพิษทางอากาศภายในห้องหรืออาคารดังกล่าวได้แก่ แบคทีเรีย ไวรัส ซึ่งอาจมาจากสัตว์เลี้ยง แก๊สและไอระเหยต่าง ๆ ซึ่งปลดปล่อยจากผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอาคาร และฝุ่นละอองขนาดเล็กที่มาจากการใช้งานเครื่องถ่ายเอกสาร รวมถึงปริมาณแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากระบบหายใจของมนุษย์ [6-7] ซึ่งสามารถเป็นตัวบ่งชี้แทนสิ่งปลดปล่อยทางชีวภาพที่ออกมาจากร่างกายมนุษย์ (Bioeffluents) ในภาคผนวกของมาตรฐาน ASHRAE 62.1 ได้อธิบายถึงความเชื่อมโยงระหว่างอัตราการระบายอากาศภายนอกต่อคน และระดับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัว (Steady-state levels) ซึ่งในการอธิบายดังกล่าวได้อภิปรายถึงปริมาณอัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคน และปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายนอกเมื่อใช้อัตราการระบายอากาศที่ 7.5 ลิตรต่อวินาทีต่อคน จะนำไปสู่ปริมาณความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะคงตัวในห้องประมาณ 1,000 ppm [5, 8]

ปริมาณความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศภายในอาคารระดับต่าง ๆ ที่สามารถสะสมและส่งผลต่อกระบวนการทำงานของอวัยวะในร่างกาย ประสิทธิภาพการทำงาน และอาการทางสุขภาพ สามารถสรุปได้ดังนี้ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกินกว่า 500 ppm ส่งผลให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือดเพิ่มสูงขึ้น เพิ่มอัตราการเต้นของหัวใจ เปลี่ยนแปลงความผันแปรของอัตราการเต้นของหัวใจ ความดันโลหิตเพิ่มขึ้น และเพิ่มการไหลเวียนโลหิตไปยังอวัยวะส่วนปลาย [9-10] เกินกว่า 1,000 ppm เริ่มมีอาการปวดศีรษะ วิงเวียน รู้สึกหนักศีรษะ หดแรง ส่งผลต่อความสามารถทางด้านรู้คิด (Cognitive performance) เช่น การตัดสินใจ การแก้ไขปัญหา อันส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเรียนหรือการทำงาน [11-12] สูงกว่า 1,500 ppm อาจทำให้เกิดการระคายเคืองระบบทางเดินหายใจส่วนต้น จึงถือได้ว่าเป็นระดับที่เริ่มมีผลต่อสุขภาพ [13] ในกรณีผลกระทบต่อกระบวนการทำงานของอวัยวะในร่างกายและอาการทางสุขภาพ จากการสัมผัสกับความเข้มข้นของแก๊สในปริมาณที่สูงกว่า 5,000-100,000 ppm แสดงดังตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ผลการสัมผัสกับปริมาณความเข้มข้นของ CO<sub>2</sub> ที่อยู่ในอากาศภายในอาคาร สำหรับปริมาณสูงกว่า 5,000 ppm

ปริมาณความเข้มข้น CO <sub>2</sub>	ผลต่อกระบวนการทำงานของอวัยวะในร่างกาย ประสิทธิภาพการทำงาน และอาการทางสุขภาพ
สูงกว่า 5,000 ppm	ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือดสูงขึ้น เกิดภาวะการคั่งของคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือด (Hypercarbia) อาจทำให้ปวดศีรษะ เสียต่อการหมดสติชั่วคราว และหากนานเกิน 8 ชั่วโมง อาจเสียชีวิตได้ [2] (ระดับปริมาณแก๊สที่ 5,000 ppm เป็นปริมาณที่อนุญาตสำหรับการทำงานในระยะเวลายังไม่เกิน 8 ชั่วโมง ที่ทำงานติดต่อกันใน 1 วัน ตามมาตรฐานของสำนักงานบริหารความปลอดภัยและอาชีวอนามัยแห่งชาติ (Occupational Safety and Health Administration) ประเทศสหรัฐอเมริกา [14])
สูงกว่า 10,000 ppm	อัตราการหายใจเพิ่มสูงขึ้น เกิดภาวะเลือดเป็นกรดจากระบบหายใจ ระบบเผาผลาญอาหารของร่างกายผิดปกติ (ส่งผลให้แคลเซียมในเลือดหรือฟอสฟอรัสในปัสสาวะลดลง) เพิ่มการไหลเวียนของโลหิตในสมอง และเพิ่มอัตราการหายใจเพื่อขับคาร์บอนไดออกไซด์ออก
สูงกว่า 30,000 ppm	กระบวนการหายใจที่มีการต้านการหายใจเข้าและหายใจออก ส่งผลให้สมรรถภาพการทำงานลดลง
สูงกว่า 50,000 ppm	ส่งผลต่ออาการทางสุขภาพ ได้แก่ เวียนศีรษะ ปวดศีรษะ สับสน และหายใจลำบาก
80,000-100,000 ppm	ส่งผลต่ออาการทางสุขภาพมากยิ่งขึ้น ได้แก่ อาการปวดศีรษะอย่างรุนแรง เวียนศีรษะ สับสน หายใจลำบาก ร่างกายขับเหงื่อ และการมองเห็นพร่ามัว
สูงกว่า 100,000 ppm	หายใจลำบาก ตามด้วยอาการอาเจียน สับสน ความดันโลหิตสูง และอาการหมดสติ (ปริมาณความเข้มข้นของแก๊ส ในช่วง 10,000-100,000 ppm ใช้เอกสารอ้างอิง [15-16])

ด้วยหลักการและเหตุผลดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการพัฒนาระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับห้องปรับอากาศ เพื่อนำไปทดลองและศึกษาถึงพฤติกรรมกรมการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการระบายอากาศ และเงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศตามปริมาณความเข้มข้นของแก๊สที่สามารถ

ควบคุมหรือรักษาระดับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องปรับอากาศให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ และไม่มีผลกระทบด้านการบริโภคพลังงานที่สูงเกินความจำเป็น ระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับห้องปรับอากาศ ประกอบไปด้วยส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics control module) และระบบระบายอากาศ (Ventilation system) ซึ่งประกอบด้วยส่วนควบคุมพัลล

ระบายอากาศ (Ventilation fan control module) จำนวน 4 ชุด การทำงานของระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เริ่มต้นจากส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่รับอินพุตซึ่งเป็นปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาจากเซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณแก๊ส ประมวลผล และกำหนดอัตราการระบายอากาศตามช่วงปริมาณความเข้มข้นของแก๊สส่งให้ระบบระบายอากาศเพื่อดำเนินการระบายอากาศ

## 2. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนา ระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปทดลองและศึกษาพฤติกรรมการสะสมของแก๊ส ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแก๊สตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราการระบายอากาศ และเงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศตามความเข้มข้นของแก๊ส ให้เป็นไปตามหลักการและเหตุผลที่ได้กล่าวมาในตอนต้น รวมทั้งควรพัฒนาให้เป็นระบบที่สามารถติดตั้งร่วมกับห้องปรับอากาศ ซึ่งมีระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนและพัดลมระบายอากาศติดตั้งอยู่ได้โดยง่าย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้แบ่งขั้นตอนของการดำเนินการวิจัยเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

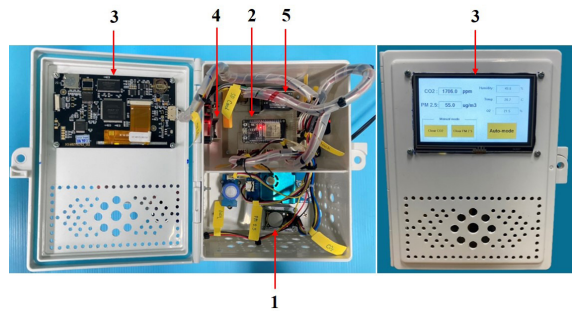
### ขั้นตอนที่ 1 การออกแบบและการสร้างระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยนี้ได้ใช้ห้องบรรยาย 101 ของอาคารอิเล็กทรอนิกส์ 3 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ล้านนา สำหรับติดตั้งระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งห้องบรรยายดังกล่าวมีขนาด 8.3 x 20.1 x 2.8 เมตร และมีขนาดความจุสูงสุดที่ 147 คน อีกทั้งมีเครื่องปรับอากาศขนาด 25,000 บีทียู ติดตั้งอยู่จำนวน 3 เครื่อง และมีช่องกระจกเดิมที่สามารถติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดประมาณ 8 นิ้ว ได้จำนวน 4 เครื่อง ด้วยลักษณะของห้องดังกล่าว การออกแบบและการสร้างระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถอธิบายโดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

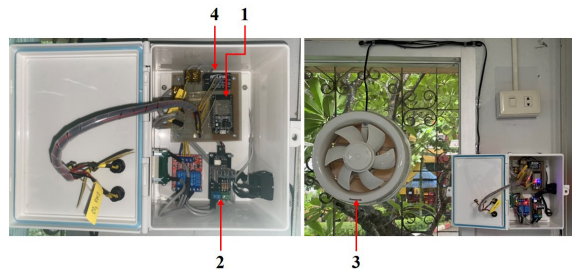
1.1 โครงสร้างส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์และระบบระบายอากาศ

โครงสร้างส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์แสดงดังรูปที่ 1(ก) ทางผู้วิจัยขออธิบายเฉพาะบางรายละเอียดของ

โครงสร้างที่สำคัญสำหรับการทดลองควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งรายละเอียดโครงสร้างดังกล่าวประกอบด้วย



(ก) ส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์



(ข) ส่วนควบคุมพัดลมระบายอากาศของระบบระบายอากาศ

### รูปที่ 1 โครงสร้างระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1) โมดูลเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของบริษัท Gas Sensing Solutions (GSS) รุ่น CoZiR®-LP-5000 ซึ่งสามารถตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณแก๊สอยู่ในช่วง 0-5,000 ppm การตรวจวัดปริมาณแก๊สดังกล่าวใช้เทคนิค Solid-state non-dispersive infrared (NDIR) absorption มีค่าความถูกต้องเป็น  $\pm 50$  ppm ของปริมาณแก๊สที่ตรวจวัดได้ ค่าตอบสนองทางเวลาอยู่ในช่วง 30 วินาที ถึง 3 นาที และโมดูลเซนเซอร์ดังกล่าวมีโปรแกรมสำหรับการสอบเทียบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถสอบเทียบปริมาณแก๊สภายใต้สภาพแวดล้อมโดยรอบในอากาศบริสุทธิ์ (ในงานวิจัยนี้ใช้ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยรอบในอากาศบริสุทธิ์ในการสอบเทียบเท่ากับ 400 ppm)

2) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 3) จอแสดงผล

LCD แบบหน้าจอสัมผัส ขนาด 4.3 นิ้ว รุ่น Nextion NX4827043 4) โมดูล Micro SD Card และ 5) โมดูลแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 3 W รุ่น Hi-Link HLK-PM01

โครงสร้างระบบระบายอากาศในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยส่วนควบคุมพัดลมระบายอากาศจำนวน 4 ชุด ซึ่งส่วนควบคุมพัดลมระบายอากาศแสดงดังรูปที่ 1(ข) และมีรายละเอียดโครงสร้างประกอบไปด้วย

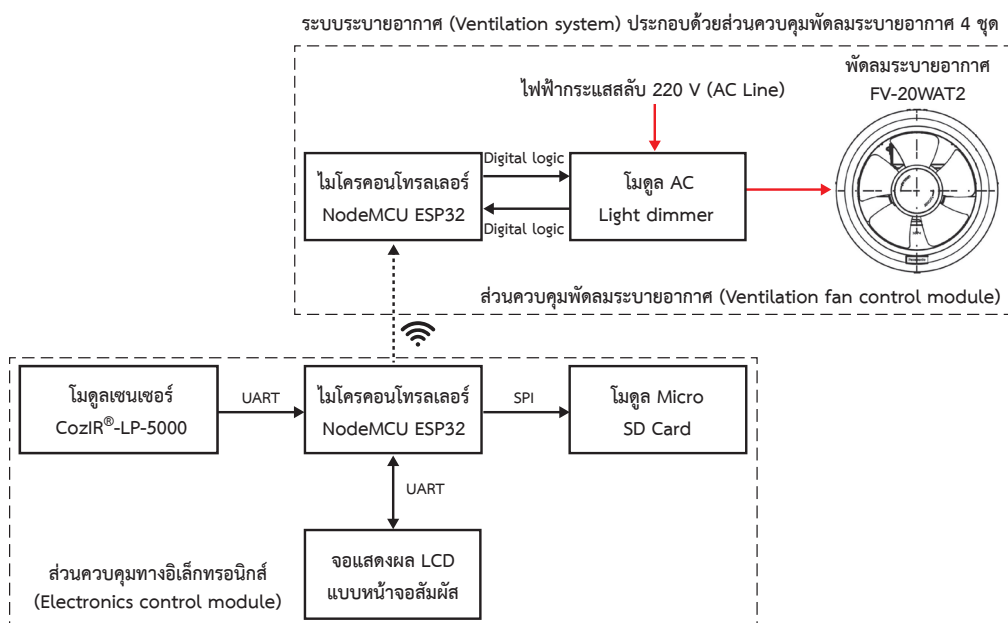
- 1) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32
- 2) โมดูล AC light dimmer เป็นโมดูลที่ถูกใช้สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายอากาศ โดยการใช้เทคนิค Leading edge phase dimming ร่วมกับ Zero crossing 3) พัดลมระบายอากาศ Panasonic รุ่น FV-20WAT2 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางใบพัดขนาด 206 mm ให้ปริมาตรอากาศ (Air volume) หรืออัตราการระบายอากาศของพัดลม (Fan ventilation rate) ด้วยอัตรา 224 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (ft<sup>3</sup>/min) หรือ 105.7 ลิตรต่อวินาที (L/s) และใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ 15 วัตต์ (W) และ 4) โมดูลแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 3 W รุ่น Hi-Link HLK-PM01 ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้กำหนดอัตราการระบายอากาศสำหรับห้องบรรยายไว้ที่ 7 ลิตรต่อวินาทีต่อคน ซึ่งขนาดของพัดลมระบายอากาศในระบบระบายอากาศ

(พัดลมระบายอากาศ 4 ตัว) ที่ให้อัตราการระบายอากาศเป็น 423 L/s จะครอบคลุมจำนวนผู้ใช้งานห้องประมาณ 60 คน

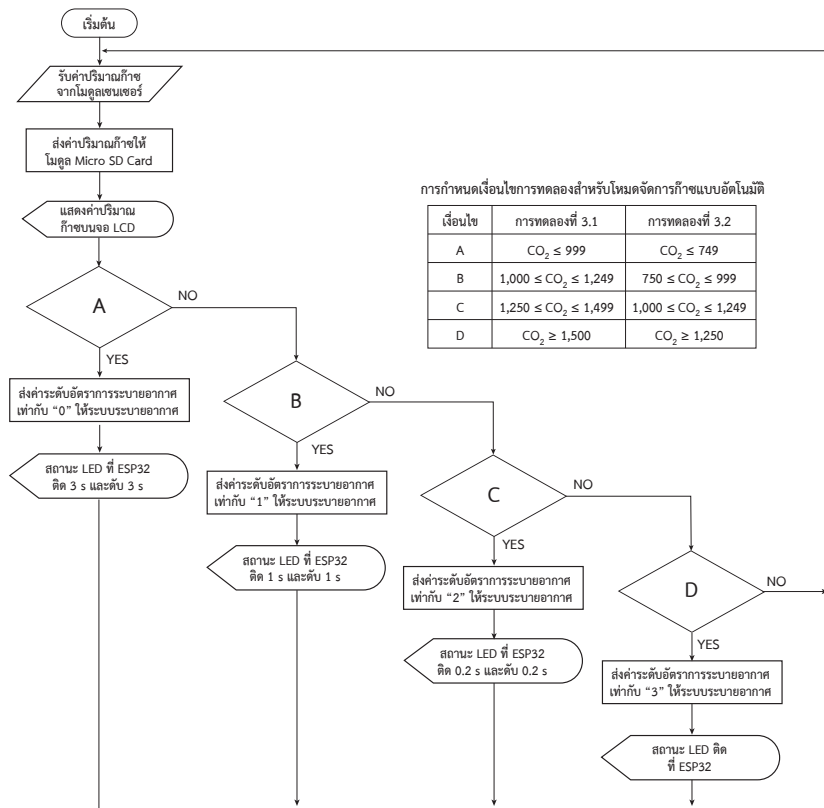
1.2 บล็อกไดอะแกรมฮาร์ดแวร์และโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

บล็อกไดอะแกรมของส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์ของระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2 ซึ่งสามารถอธิบายหน้าที่ของทั้ง 2 ส่วนได้ดังนี้

- 1) ส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่โดยเริ่มต้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ NodeMCU ESP32 รับค่าจากโมดูลเซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นส่งข้อมูลแก๊สไปยังจอแสดงผล LCD เพื่อแสดงปริมาณแก๊ส และโมดูล Micro SD Card เพื่อบันทึกปริมาณแก๊สลง Micro SD Card เมื่อผู้ใช้กดหน้าจอ LCD เพื่อเลือกโหมดจัดการแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบอัตโนมัติ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลปริมาณระดับความเข้มข้นของแก๊ส เพื่อกำหนดระดับอัตราการระบายอากาศของพัดลมระบายอากาศ และส่งค่าระดับอัตราการระบายอากาศดังกล่าวไปยังส่วนควบคุมพัดลมระบายอากาศทั้ง 4 ชุด โดยผ่านระบบเครือข่ายไร้สาย Wi-Fi



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

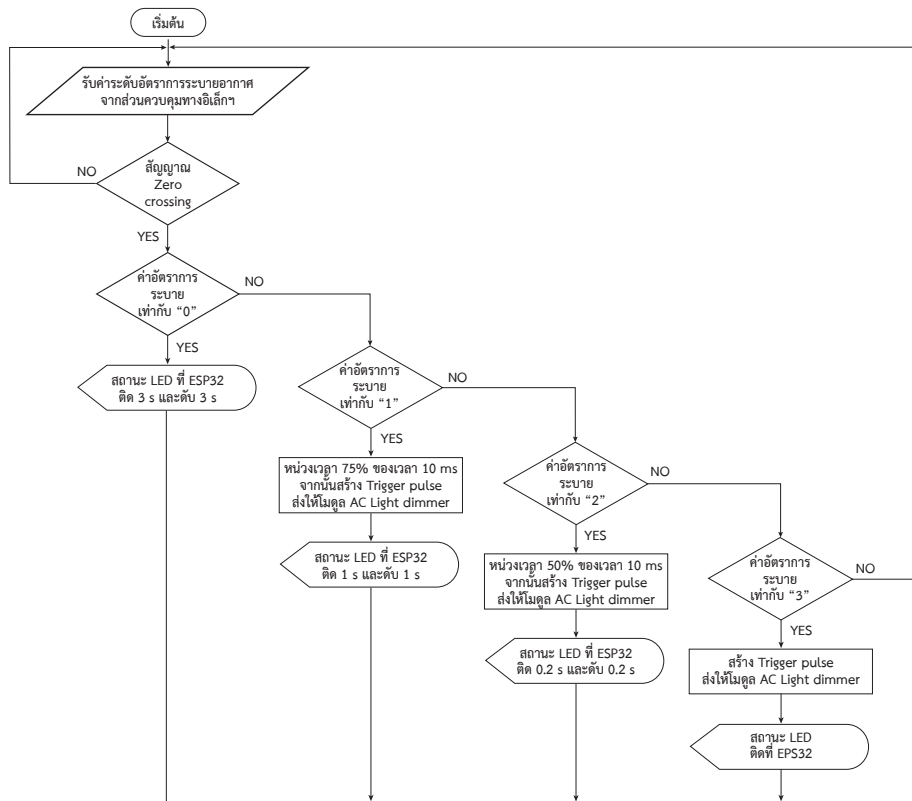


(ก) ผังการทำงานโปรแกรมของส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ในโหมดจัดการแก๊สแบบอัตโนมัติ  
รูปที่ 3 ผังการทำงานโปรแกรมระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2) ส่วนควบคุมพัลส์ระบายอากาศ ทำหน้าที่โดยเริ่มต้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์รับข้อมูลระดับอัตราการระบายอากาศจากส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลเพื่อสร้างสัญญาณ Trigger pulse ที่มีการกำหนดค่าช่วงเวลาตามระดับอัตราการระบายอากาศ และส่งสัญญาณ Trigger pulse ไปยังโมดูล AC light dimmer ตามจังหวะของสัญญาณ Zero crossing ซึ่งได้รับมาจากโมดูล AC light dimmer และโมดูล AC light dimmer จะนำสัญญาณ Trigger pulse ดังกล่าวไปกำหนดปริมาณกำลังไฟฟ้าให้กับพัลส์ระบายอากาศต่อไป

โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถอธิบายได้จากแผนผังแสดงขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งผู้วิจัยขอกล่าวถึงเฉพาะในโหมดของการจัดการแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบอัตโนมัติ การทำงานโปรแกรมในส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์แสดงดังรูปที่ 3(ก) เริ่มจากการรับค่า

ปริมาณแก๊สจากโมดูลเซนเซอร์ ส่งค่าปริมาณแก๊สบันทึกลงใน Micro SD Card แสดงผลปริมาณแก๊สบนจอแสดงผล LCD จากนั้นโปรแกรมจะนำเข้าสู่การตรวจสอบปริมาณแก๊สเพื่อกำหนดระดับอัตราการระบายอากาศและส่งไปให้ระบบระบายอากาศดังนี้ ถ้าปริมาณแก๊สอยู่ในช่วงปริมาณความเข้มข้น A โปรแกรมจะทำการส่งค่าระดับอัตราการระบายอากาศระดับศูนย์ไปยังระบบระบายอากาศ ผ่านทางระบบเครือข่ายไร้สาย Wi-Fi และแสดงสถานะไฟ ติด : ดับ เป็นเวลา 3 : 3 วินาที ที่ LED บนบอร์ด ESP32 ถ้าปริมาณแก๊สอยู่ในช่วงปริมาณความเข้มข้น B โปรแกรมจะทำการส่งค่าระดับอัตราการระบายอากาศระดับหนึ่งไปยังระบบระบายอากาศ และแสดงสถานะไฟที่ LED ติด : ดับ เป็นเวลา 1 : 1 วินาที ถ้าปริมาณแก๊สอยู่ในช่วงปริมาณความเข้มข้น C โปรแกรมจะทำการส่งค่าระดับอัตราการระบายอากาศระดับสองไปยังระบบระบายอากาศ และแสดงสถานะไฟที่ LED ติด : ดับ เป็นเวลา 0.2 : 0.2 วินาที และถ้าปริมาณแก๊สอยู่ใน



(ข) ผังการทำงานโปรแกรมของส่วนควบคุมพัดลมระบายอากาศ  
รูปที่ 3 ผังการทำงานโปรแกรมระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ช่วงปริมาณความเข้มข้น D โปรแกรมจะทำการส่งค่าระดับอัตราการระบายอากาศระดับสามไปยังระบบระบายอากาศ และแสดงสถานะไฟที่ LED เป็นสว่างตลอดเวลา การแสดงสถานะไฟที่ LED บนบอร์ด ESP32 ตามเงื่อนไขของปริมาณแก๊สในช่องต่าง ๆ ของทั้งส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์และระบบระบายอากาศนั้น ก็เพื่อให้สามารถตรวจสอบการสื่อสารข้อมูลระหว่างทั้งสองส่วนดังกล่าวได้ง่าย การกำหนดช่วงปริมาณแก๊สในแต่ละเงื่อนไขสำหรับสองการทดลอง ผู้วิจัยจะขอเข้าไปอธิบายในขั้นตอนการออกแบบการทดลองควบคุมระดับแก๊สในห้องบรรยาย ส่วนการทำงานโปรแกรมของส่วนควบคุมพัดลมระบายอากาศแสดงดังรูปที่ 3(ข) ซึ่งเริ่มจากการรับค่าระดับอัตราการระบายอากาศจากส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ ตรวจสอบสัญญาณ Zero crossing จากโมดูล AC light dimmer ถ้าพบสัญญาณ Zero crossing โปรแกรมจะนำเข้าสู่ขั้นตอนการตรวจสอบค่าอัตราการระบายอากาศ และช่วงเวลาตามเงื่อนไขของค่าอัตราการระบายอากาศ จาก

นั้นสร้างสัญญาณ Trigger pulse ส่งให้กับโมดูล AC light dimmer ดังนั้นขั้นตอนการตรวจสอบค่าอัตราการระบายอากาศของโปรแกรมเพื่อกำหนดค่าช่วงเวลาในการส่งสัญญาณ Trigger pulse สามารถอธิบายได้ดังนี้ กรณีค่าอัตราการระบายอากาศเท่ากับศูนย์ โปรแกรมจะไม่สร้างสัญญาณ Trigger pulse กรณีค่าอัตราการระบายอากาศเท่ากับหนึ่ง โปรแกรมจะช่วงเวลาเป็น 75% ของเวลา 10 ms (เวลาครึ่งรูปคลื่นของสัญญาณไซนูซอยด์ที่มีค่าความถี่ 50 Hz) จากนั้นส่งสัญญาณ Trigger pulse กรณีค่าอัตราการระบายอากาศเท่ากับสอง โปรแกรมจะช่วงเวลาเป็น 50% ของเวลา 10 ms ก่อนส่งสัญญาณ Trigger pulse และกรณีค่าอัตราการระบายอากาศเท่ากับสาม โปรแกรมจะสร้างสัญญาณ Trigger pulse และส่งในทันที การหนดช่วงเวลาการส่งสัญญาณ Trigger pulse ตามค่าอัตราการระบายอากาศดังกล่าว เพื่อให้โมดูล AC light dimmer กำหนดปริมาณกำลังไฟฟ้าให้กับพัดลมระบายอากาศเป็น 0% 15% 50% และ 100% ของ 15 W ปริมาณ



กำลังไฟฟ้าที่ 15% เป็นปริมาณเริ่มต้นที่ทำให้พัดลมระบายอากาศเริ่มทำงาน ส่งผลให้ได้อัตราการระบายอากาศต่อพัดลมหนึ่งตัวเป็น 81.5 L/s และของระบบระบายอากาศเป็น 326 L/s ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ 50% จะได้อัตราการระบายอากาศต่อพัดลมหนึ่งตัวเป็น 95 L/s และส่งผลให้อัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศเป็น 380 L/s รวมทั้งปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ 100% จะให้อัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศเป็น 423 L/s การดำเนินการดังกล่าวเป็นความพยายามของผู้วิจัย ที่ต้องการแบ่งช่วงอัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศทั้งสามระดับ ให้มีระยะห่างของแต่ละช่วงใกล้เคียงกัน สำหรับระยะเวลาในการทำงานของโปรแกรมในส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์และระบบระบายอากาศนั้น จะใช้ระยะเวลาในการทำงานของโปรแกรมประมาณรอบละ 30 วินาที

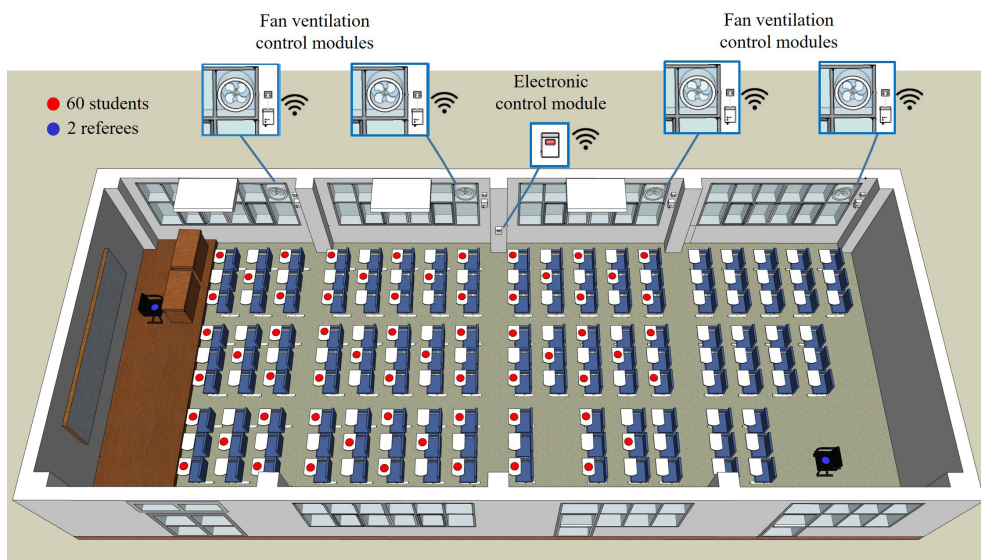
## ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบตรวจวัดปริมาณแก๊สและการระบายอากาศด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

หลังจากขั้นตอนการออกแบบและสร้างระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผู้วิจัยจึงได้นำระบบดังกล่าวไปติดตั้ง ณ ห้องบรรยาย 101 อาคารอิเล็กทรอนิกส์ 3 ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งส่วนควบคุมทาง

อิเล็กทรอนิกส์ (ติดตั้งสูงจากพื้นห้อง 110 เซนติเมตร) และระบบระบายอากาศแสดงดังรูปที่ 4 และได้ออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบการตรวจวัดปริมาณแก๊สสำหรับส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ และการทดลองการระบายอากาศสำหรับระบบระบายอากาศดังนี้ (ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปรับอากาศทั้ง 3 เครื่องไว้ให้คงที่ในทุกการทดลอง เช่น การตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศไว้ที่ 25°C กำหนดทิศทางลมให้อยู่ในทิศทางเดียวกัน และกำหนดระดับความเร็วลมของเครื่องปรับอากาศให้อยู่ในระดับเดียว ซึ่งได้วัดค่าความเร็วลมที่หน้าช่องลมของเครื่องปรับอากาศได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.56 เมตรต่อวินาที)

### 2.1 ทดสอบตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การทดสอบตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องบรรยายด้วยส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อสังเกตพฤติกรรมและการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาพแวดล้อมที่เป็นปกติหรือสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งมีการทำกิจกรรมของนักศึกษาภายในห้องบรรยาย รวมถึงการใช้แหล่งกำเนิดแก๊สทดแทนในกรณีที่ไม่สามารถจัดกิจกรรมของนักศึกษาได้ ดังนั้นจึงได้ดำเนินการออกแบบการทดลองออกเป็น 2 ส่วนดังนี้



รูปที่ 4 ผังห้องบรรยาย 101 อาคารอิเล็กทรอนิกส์ 3 และตำแหน่งติดตั้งระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1) ทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในการ สอบกลางภาคเรียนของ 2 รายวิชาทฤษฎี ซึ่งรายวิชาแรกมี จำนวนผู้ใช้ห้องสอบทั้งหมด 50 คน และ 62 เป็นจำนวนผู้ใช้ ห้องสอบของรายวิชาที่สอง ตำแหน่งที่นั่งหรือวิธีการจัดที่นั่ง ของผู้ใช้ห้องสอบแสดงดังรูปที่ 4 ทั้งนี้ในการสอบของแต่ละ รายวิชานั้นได้ใช้เวลาสำหรับการสอบเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และกรรมการคุมสอบได้กำหนดให้ผู้เข้าสอบสามารถออก นอกห้องสอบได้ภายหลังจากเริ่มการสอบไปแล้วเป็นเวลา 120 นาที

2) ทดลองตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สในห้องบรรยาย ในสภาวะการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากถังบรรจุ แก๊สที่มีขนาดความจุ 40 ลิตร ซึ่งได้ควบคุมการปล่อยแก๊ส ด้วยอัตรา 15 ลิตรต่อนาที (L/min) ที่ความดันถึง 30-40 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{kg/cm}^2$ ) และปล่อยแก๊สเป็น เวลา 120 นาที (ผู้วิจัยได้ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จาก ถังบรรจุแก๊สเป็นแหล่งกำเนิดแก๊ส ทดแทนแก๊สคาร์บอนได- ออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหายใจของมนุษย์ เนื่องจาก ในสถานการณ์ที่มีการระบาดของไวรัสโคโรนาเกิดขึ้นใน ระลอกใหม่ จะทำให้การดำเนินการทดลองในสภาพแวดล้อม ที่มีการรวมตัวกันของนักศึกษาเป็นจำนวนมากเพื่อทำ กิจกรรมในห้องปรับอากาศ มีความเสี่ยงที่สูงต่อการติดเชื้อ ไวรัส)

## 2.2 ทดสอบการระบายอากาศของระบบระบาย อากาศ

การทดสอบการระบายอากาศในห้องบรรยายด้วย ระบบระบายอากาศนั้น เพื่อสังเกตพฤติกรรมหรือการ เปลี่ยนแปลงของระดับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในห้อง บรรยาย ในช่วงปริมาณความเข้มข้นของแก๊สประมาณ 3,000-1,000 ppm เมื่อได้ดำเนินการเปลี่ยนอัตราการระบาย อากาศของระบบระบายอากาศด้วยอัตรา 326 380 และ 423 ลิตรต่อวินาที (L/s)

ค่าอัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศ ซึ่งใช้กล่าวอ้างในงานวิจัยนี้ ได้มาจากการนำค่าอัตราการ ระบายอากาศของพัดลม 3 ระดับ (ซึ่งได้จากการเปลี่ยนแปลง ค่าช่วงเวลาของการส่งสัญญาณ Trigger pulse ที่ป้อนให้ กับโมดูล AC light dimmer ดังที่ได้กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 1) ไปคำนวณหาอัตราร้อยละโดยเทียบกับอัตราการระบาย

อากาศของพัดลมในระดับที่สามซึ่งไม่มีค่าช่วงเวลาของการ ส่งสัญญาณ Trigger pulse จากนั้นนำค่าอัตราร้อยละที่ได้ ดังกล่าวไปเป็นค่าปรับแก้ โดยนำไปคูณกับค่าอัตราการ ระบายอากาศของพัดลมซึ่งนำมาจากข้อมูลจำเพาะของ ผลิตภัณฑ์ที่เท่ากับ 105.7 L/s เพื่อให้ได้อัตราการระบาย อากาศของพัดลมในระดับต่าง ๆ สำหรับส่วนควบคุมพัดลม ระบายอากาศ 1 ชุด ทั้งนี้ค่าอัตราการระบายอากาศของ พัดลม 3 ระดับนั้น ได้คำนวณมาจากค่าความเร็วลมเฉลี่ย ซึ่งวัดความเร็วลมครอบคลุมทุกตำแหน่งที่ผิวหน้าตัดของ พัดลมด้วยเครื่องวัดความเร็วลมแบบใบพัด อย่างไรก็ตาม เทคนิคการวัดความเร็วลมที่ผิวหน้าตัดดังกล่าว อาจได้ ปริมาณความเร็วลมที่คลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากวิธีการวัด เช่น การไม่ตั้งฉากระหว่างทิศทางการไหลและเครื่อง มือวัด การกำหนดระยะห่างระหว่างพัดลมระบายอากาศและ เครื่องมือวัดสำหรับการวัดแต่ละครั้งที่ไม่เท่ากัน ขนาดของ พื้นที่หน้าตัดของเครื่องมือวัดที่เล็กกว่าท่อทางออกของพัดลม ระบายอากาศ รวมถึงค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดแบบ ใบพัด หากต้องการจะลดค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวลง ควรเลือกใช้การวัดความเร็วลมด้วยเทคนิคแบบ Pitot tube หรือการวัดอัตราการไหลด้วยเทคนิคแบบ Nozzle

## ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบการทดลองควบคุม ปริมาณแก๊สภายในห้องด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์

การออกแบบการทดลองควบคุมระดับแก๊สด้วย ระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อ ศึกษาและเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ในห้องบรรยาย ภายใต้การเปลี่ยนแปลง เงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศตามปริมาณ ความเข้มข้นของแก๊ส รวมถึงการเปรียบเทียบปริมาณการใช้ กำลังไฟฟ้าในแต่ละการทดลอง ซึ่งปริมาณดังกล่าวเกิดจากการ ทำงานของระบบเครื่องปรับอากาศ และระบบควบคุมความ เข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งนี้การทดลองได้กำหนด หรือพยายามควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ให้คงที่หรือใกล้เคียงกันใน ทุก ๆ การทดลอง เช่น ค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปรับ อากาศทั้งสามเครื่อง (ดังที่ได้กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 2) สภาพ อากาศภายนอกและภายในห้องบรรยาย ช่วงเวลาสำหรับการ

ทดลอง ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตอนเริ่มต้นการทดลอง และอัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากถังบรรจุแก๊สด้วยอัตรา 15 L/min ที่ความดันถึง 30-40 kg/cm<sup>2</sup> ดังนั้นจึงได้ดำเนินการออกแบบการทดลองออกเป็น 3 การทดลองดังนี้

3.1 ทดลองควบคุมระดับแก๊สในห้องบรรยายด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยใช้เงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันไดตามช่วงความเข้มข้นของแก๊สแสดงดังตารางที่ 2 ในแถวการทดลองที่ 3.1

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 ผลการทดสอบตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในห้องบรรยาย สำหรับกิจกรรมการสอบของ 2 รายวิชาทฤษฎีพบว่า ในกรณีรายวิชาแรกซึ่งมีผู้ใช้ห้องสอบจำนวน 50 คน และใช้เวลา 150 นาที สำหรับการแสดงข้อมูล (เนื่องจากหลังช่วงเวลาดังกล่าวได้มีนักศึกษาออกจากห้องสอบไปเป็นจำนวนมาก การทดลองนี้จึงได้เลือกแสดงข้อมูลเพียงช่วงเวลา 0 ถึง 150 นาที) เกิดการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นใน

ตารางที่ 2 เงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันไดตามช่วงความเข้มข้นของแก๊ส

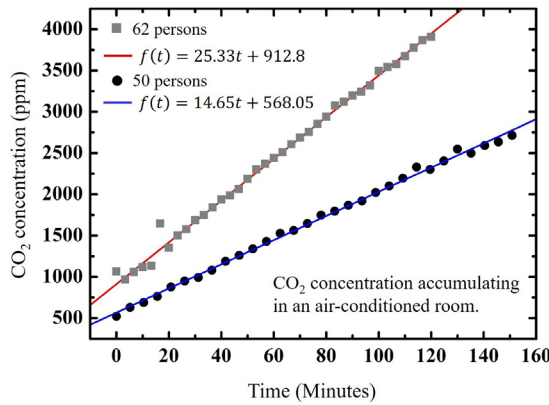
ช่วงปริมาณความเข้มข้นของแก๊ส (ppm)		อัตราการระบายอากาศ (L/s)
การทดลองที่ 3.1	การทดลองที่ 3.2	
$CO_2 \leq 999$	$CO_2 \leq 749$	0
$1,000 \leq CO_2 \leq 1,249$	$750 \leq CO_2 \leq 999$	326
$1,250 \leq CO_2 \leq 1,499$	$1,000 \leq CO_2 \leq 1,249$	380
$CO_2 \geq 1,500$	$CO_2 \geq 1,250$	423

3.2 ทดลองควบคุมระดับแก๊สในห้องบรรยายด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยใช้เงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันได แสดงดังตารางที่ 2 ในแถวการทดลองที่ 3.2

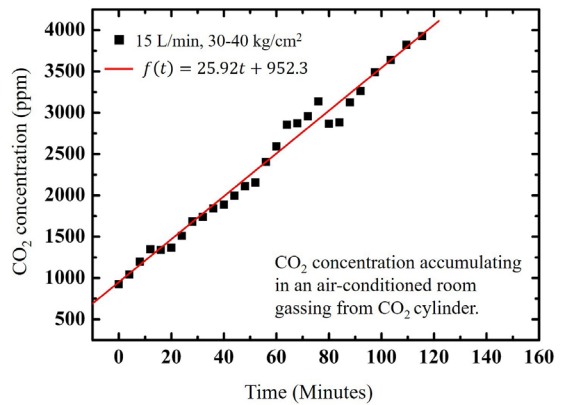
3.3 ทดลองควบคุมระดับแก๊สด้วยการกำหนดให้ระบบระบายอากาศทำงานด้วยอัตราการระบายอากาศคงที่เท่ากับ 423 L/s เป็นระยะเวลา 120 นาที

การตรวจวัดปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าสำหรับการทดลองที่ 3.1 3.2 และ 3.3 รวมถึงการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สในห้องด้วยการปล่อยแก๊สออกจากถังบรรจุแก๊สดังที่ได้กล่าวไว้ในขั้นตอนที่ 2.1 นั้น ถูกตรวจวัดด้วยมิเตอร์วัดกำลังไฟฟ้าของบริษัท Easton Europe รุ่น SDM120CTM และแสดงปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้าในรูปแบบของกำลังจริงรวม (Total real power) ซึ่งมีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh)

ห้องบรรยายได้ถึง 2,262 ppm ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของแก๊สในตอนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 524 ppm และได้เพิ่มขึ้นจนถึง 2,786 ppm การเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5(ก) ด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีดำ พฤติกรรมการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีนี้สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น  $f(t) = 14.65t + 568.05$  แสดงดังรูปที่ 5(ก) ด้วยเส้นทึบสีน้ำเงิน และความชันของฟังก์ชันดังกล่าวได้แสดงอัตราการสะสมของแก๊สเท่ากับ 14.65 ppm/min สำหรับกรณีรายวิชาที่สองซึ่งมีผู้ใช้ห้องจำนวน 62 คน และใช้เวลา 120 นาที สำหรับการแสดงข้อมูล เกิดการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในห้องบรรยายได้เท่ากับ 2,844 ppm ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของแก๊สในตอนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1,066 ppm และได้เพิ่มขึ้นจนถึง 3,910 ppm การเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 5(ก) ด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีเทา พฤติกรรมการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีนี้สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น



(ก) ผู้ใช้ห้องจำนวน 50 คน และ 62 คน



(ข) ถังแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งปล่อยแก๊ส ด้วยอัตรา 15 L/min

รูปที่ 5 การสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องบรรยายจากแห่งกำเนิดแก๊ส

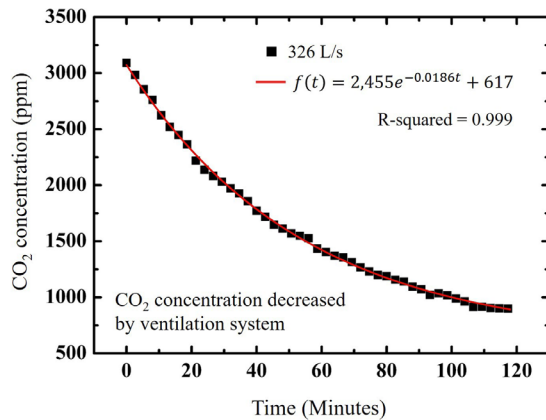
$f(t)=25.33t+912.8$  แสดงดังรูปที่ 5(ก) ด้วยเส้นทึบสีแดง และความชันของฟังก์ชันดังกล่าวได้แสดงถึงอัตราการสะสมของแก๊สเป็น 25.33 ppm/min ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นและสะสมภายในห้องบรรยายสำหรับกิจกรรมการสอบของ 2 รายวิชานั้น เกิดขึ้นมาจากกระบวนการหายใจของมนุษย์ ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนแก๊สออกซิเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างอากาศและสิ่งมีชีวิต เพื่อใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์เนื้อเยื่อ [17-18] ดังนั้นอัตราการสะสมของแก๊สจึงมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับจำนวนผู้ใช้ห้อง และมีลักษณะของการสะสมเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นในกรณีสำหรับห้องซึ่งไม่มีการระบายอากาศ [19] อย่างไรก็ตามความพยายามในการอธิบายเปรียบเทียบระดับอัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อคนต่อเวลาของทั้ง 2 การทดลองนั้นคงเป็นไปได้ยาก เนื่องอัตราการหายใจมีผลโดยตรงต่ออัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าว และมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการหายใจ เช่น พยาธิสภาพของร่างกาย [20] และลักษณะของกิจกรรมที่ทำอยู่ในขณะนั้น

การทดลองตรวจวัดความเข้มข้นของแก๊สในห้องบรรยาย ในสภาวะการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากถังบรรจุแก๊สด้วยอัตรา 15 L/min เป็นเวลา 120 นาทีพบว่าระดับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงเริ่มต้นมีปริมาณเท่ากับ 925 ppm และได้เกิดการสะสมเพิ่มขึ้นจนถึง 4,060 ppm แสดงดังรูปที่ 5(ข) ด้วยสัญลักษณ์

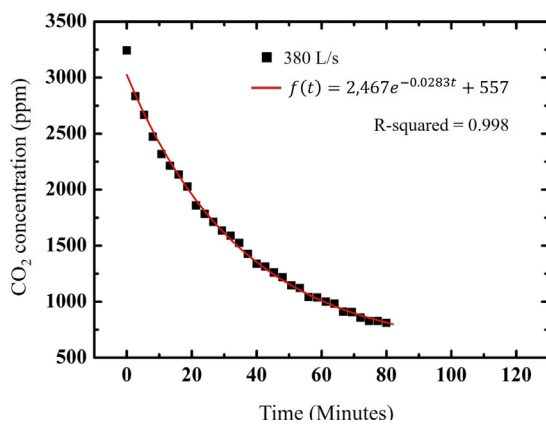
สี่เหลี่ยมสีดำ ด้วยเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้เกิดการสะสมของแก๊สขึ้นภายในห้องบรรยายทั้งหมดเท่ากับ 3,135 ppm พฤติกรรมการเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีนี้สามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น  $f(t)=25.92t+952.3$  แสดงดังรูปที่ 5(ข) ด้วยเส้นทึบสีแดง และความชันของฟังก์ชันดังกล่าวแสดงถึงอัตราการสะสมของแก๊สเท่ากับ 25.92 ppm/min อัตราการสะสมของแก๊สดังกล่าว มีค่าใกล้เคียงกันกับอัตราการสะสมของแก๊สจากผลการทดลองในกรณีที่มีผู้ใช้ห้องบรรยาย จำนวน 62 คน (นักศึกษา 60 คน และกรรมการคุมสอบ 2 คน) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกเงื่อนไขของการปล่อยแก๊สออกจากถังบรรจุในการทดลองนี้ มาเป็นแหล่งกำเนิดแก๊สทดแทนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหายใจของมนุษย์ สำหรับการทดลองควบคุมระดับแก๊สในห้องบรรยาย ด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป เนื่องจากจำนวนนักศึกษา 60 คน เป็นเกณฑ์จำนวนการรับนักศึกษาในชั้นปีที่ 1 ของหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มทร.ล้านนา รวมถึงสถานการณ์การระบาดของไวรัสโคโรนา ดังที่ได้อธิบายไว้ในขั้นตอนที่ 2.1

3.2 ผลการทดสอบการระบายอากาศของระบบระบายอากาศ

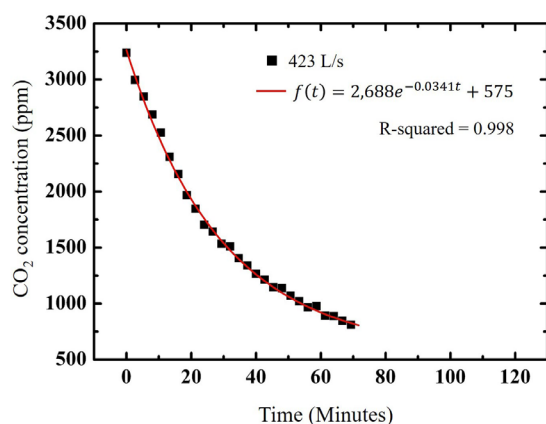
การทดสอบการระบายอากาศในห้องบรรยายด้วยระบบระบายอากาศ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงของระดับ



(ก) 326 L/s



(ข) 380 L/s



(ค) 423 L/s

รูปที่ 6 อัตราการลดลงของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องด้วยการเปลี่ยนแปลงอัตราการระบายอากาศ

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงปริมาณแก๊สประมาณ 3,000-1,000 ppm เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศด้วยอัตรา 326 380 และ 423 L/s พบว่าในกรณีอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 326 L/s ระบบระบายอากาศใช้เวลา 100.7 นาที สำหรับการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องจาก 3,000 ppm จนถึง 1,000 ppm แสดงดังรูปที่ 6(ก) ด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีดำ และเมื่อจำลองพฤติกรรมของอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวด้วยฟังก์ชัน Exponential decay จะได้  $f(t) = 2,455e^{-0.0186t} + 617$  แสดงดังรูปที่ 6(ก) ด้วยเส้นทึบสีแดง ในกรณีอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 380 L/s ระบบระบายอากาศได้ใช้เวลา 59.3 นาที เพื่อลดปริมาณแก๊สจาก 3,000 ppm จนถึง 1,000 ppm แสดงดังรูปที่ 6(ข) ด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีดำ และทำการจำลองผลของอัตราการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวด้วยฟังก์ชัน Exponential decay จะได้  $f(t) = 2,467e^{-0.0283t} + 557$  แสดงดังรูปที่ 6(ข) ด้วยเส้นทึบสีแดง และในกรณีสุดท้ายที่ใช้อัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศเท่ากับ 423 L/s ระบบระบายอากาศได้ใช้เวลา 52.7 นาที สำหรับการปรับปรุงระดับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องบรรยายจากระดับความเข้มข้น 3,000 ppm ลดลงจนถึง 1,000 ppm แสดงดังรูปที่ 6(ค) ด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีดำ และเมื่อจำลองพฤติกรรมการลดลงของแก๊ส ด้วยฟังก์ชัน Exponential decay จะได้  $f(t) = 2,688e^{-0.0341t} + 575$  แสดงดังรูปที่ 6(ค) ด้วยเส้นทึบสีแดง ผู้วิจัยได้สังเกตพฤติกรรมการลดลงของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากผลการทดลองทั้ง 3 กรณีร่วมกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่น พบว่ามีลักษณะคล้ายฟังก์ชัน Exponential decay [3, 19, 21] จึงได้เลือกใช้ฟังก์ชันดังกล่าวเป็นแบบจำลองพฤติกรรมการณ์การลดลงของแก๊สเปรียบเทียบกับผลการทดลอง และมีสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination) หรือ R-squared ของผลการจำลองพฤติกรรมทั้ง 3 กรณี เป็น 0.999 0.998 และ 0.998 แสดงดังรูปที่ 6(ก) 6(ข) และ 6(ค) ตามลำดับ สัมประสิทธิ์การกำหนดของผลการจำลองพฤติกรรมทั้ง 3 กรณีนั้น มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมหรือความแม่นยำที่สูงเมื่อใช้ฟังก์ชัน Exponential decay เป็นแบบจำลองพฤติกรรมเปรียบเทียบกับผลการทดลอง อีกทั้งการจำลองพฤติกรรมของอัตราการลดลงของแก๊สด้วยฟังก์ชัน

ดังกล่าว พบความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง ระหว่างอัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศ และขนาดของเลขชี้กำลังของฟังก์ชัน Exponential decay พฤติกรรมการลดลงของแก๊สที่ได้อธิบายด้วยฟังก์ชัน Exponential decay นั้น เป็นผลมาจากในกระบวนการระบายอากาศของห้องจะประกอบด้วย การเติมอากาศใหม่ ที่เป็นอากาศภายนอกห้องเข้ามาแทนที่อากาศในห้องอยู่ตลอดเวลา (โดยอาศัยการแทรกซึมของอากาศผ่านรูรั่วตามขอบประตูหรือหน้าต่าง) ซึ่งอากาศใหม่ที่เติมเข้ามาในห้องนั้น มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนผสมอยู่ประมาณ 400 ppm ดังนั้นพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องบรรยายสำหรับกระบวนการระบายอากาศนั้น จะมีลักษณะลดลงและถูกรื้อเข้าหาปริมาณ 400 ppm อย่างไรก็ตามอัตราการเปลี่ยนแปลงหรือลดลงของปริมาณความเข้มข้นของแก๊สในห้องบรรยาย ด้วยอัตราการระบายอากาศในระดับต่าง ๆ ตามผลการทดลองนั้น อาจมีอัตราที่เปลี่ยนแปลงได้ตามลักษณะการทรุดโทรมหรือชำรุดของขอบประตูหรือหน้าต่างภายในห้องบรรยาย ซึ่งการทรุดโทรมดังกล่าวอาจทำให้เกิดรูรั่วภายในห้องเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้อัตราการเติมอากาศใหม่เข้ามาในห้องนั้นเปลี่ยนแปลงไป

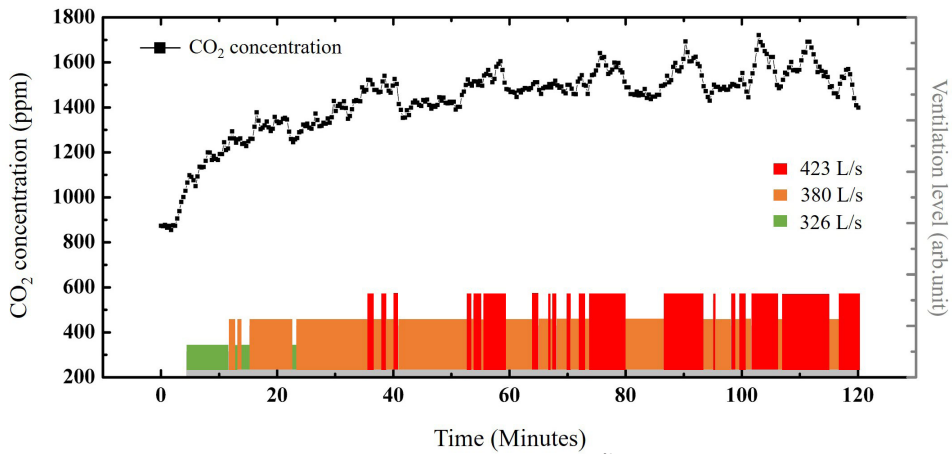
### 3.3 ผลการทดลองควบคุมปริมาณแก๊สภายในห้องด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

การทดลองควบคุมระดับแก๊สในห้องบรรยาย ด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นระยะเวลา 120 นาที โดยปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออก

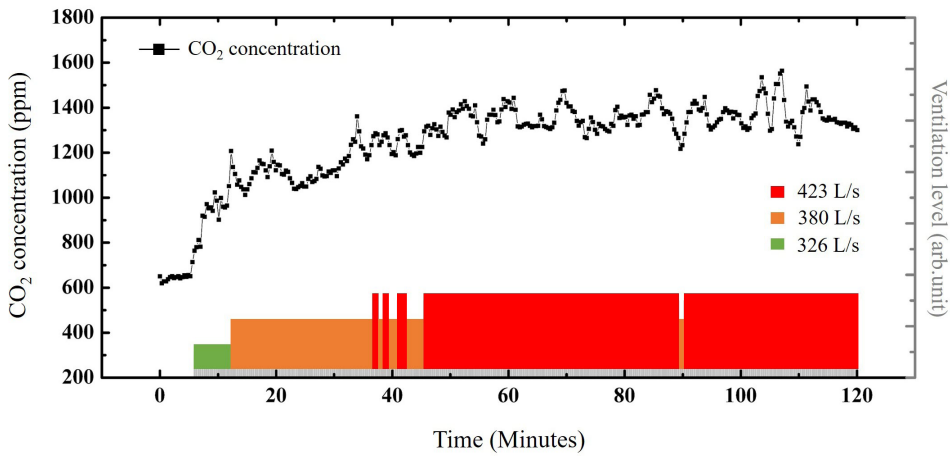
จากถังบรรจุแก๊สด้วยอัตราคงที่ ซึ่งทำให้เกิดอัตราการสะสมของแก๊สเท่ากับ 25.92 ppm/min และใช้เงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันไดตามช่วงปริมาณความเข้มข้นของแก๊ส แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับการทดลองที่ 3.1 ดังนี้ ในช่วงปริมาณแก๊สที่น้อยกว่า 1,000 ppm ระบบได้กำหนดให้อัตราการระบายอากาศเป็น 0 L/s ช่วงปริมาณแก๊ส 1,000-1,249 ppm อัตราการระบายอากาศเพิ่มเป็น 326 L/s ช่วง 1,250-1,499 ppm อัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้นเท่ากับ 380 L/s และปริมาณแก๊สที่มากกว่า 1,499 ppm ระบบควบคุมความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ จะกำหนดให้อัตราการระบายอากาศเป็น 423 L/s ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถควบคุมปริมาณแก๊สภายในห้องให้ไม่เกินปริมาณ 1,721 ppm และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณอยู่ในช่วง 1,399-1,721 ppm สำหรับช่วงเวลาตั้งแต่ 60-120 นาที โดยในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณแก๊สเฉลี่ยเท่ากับ 1,528.2 ppm พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สภายในห้องแสดงดังรูปที่ 7(ก) ด้วยเส้นทึบสีดำน่วมกับสัญลักษณ์สี่เหลี่ยม และการเปลี่ยนแปลงระดับของอัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศแบบขั้นบันไดตามช่วงปริมาณแก๊สที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 7(ก) ด้วยแทบสีเขียวเป็นอัตราการระบายอากาศเท่ากับ 326 L/s แทบสีส้มเป็น 380 L/s และแทบสีแดงเป็น 423 L/s รวมทั้งในการทดลองนี้ได้ใช้กำลังจริงรวมไปทั้งหมดเท่ากับ 4.07 kWh แสดงดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** กำลังจริงรวมจากการทดลองควบคุมปริมาณแก๊สในห้องด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

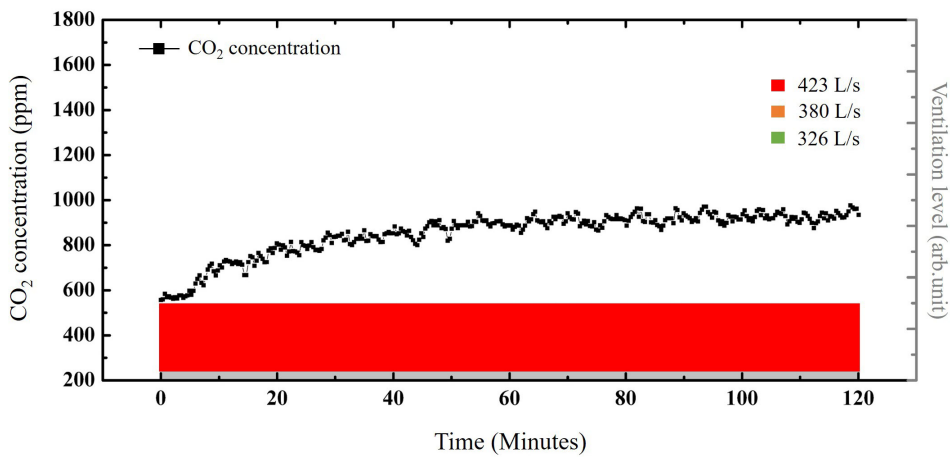
การทดลอง/เงื่อนไขสำหรับการทดลอง	กำลังจริงรวม (kWh)
การทดลองที่ 2.1 (ไม่มีการระบายอากาศ)	2.93
การทดลองที่ 3.1 (ระบบระบายอากาศเริ่มทำงานที่ 1,000 ppm)	4.07
การทดลองที่ 3.2 (ระบบระบายอากาศเริ่มทำงานที่ 750 ppm)	4.19
การทดลองที่ 3.3 (ระบบระบายอากาศทำงานด้วยอัตรา 423 L/s)	6.98



(ก) เงื่อนไขสำหรับควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันไดตามการทดลองที่ 3.1



(ข) เงื่อนไขสำหรับควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันไดตามการทดลองที่ 3.2



(ค) อัตราการระบายอากาศคงที่ 423 L/s

รูปที่ 7 ปริมาณแก๊สภายในห้อง ซึ่งถูกควบคุมด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ

การทดลองควบคุมระดับแก๊สในห้องบรรยายด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และใช้เงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันได แสดงดังตารางที่ 2 สำหรับการทดลองที่ 3.2 ดังนี้ ในช่วงปริมาณแก๊สที่น้อยกว่า 750 ppm ระบบได้กำหนดให้อัตราการระบายอากาศเป็น 0 L/s ช่วงปริมาณแก๊ส 750-999 ppm อัตราการระบายอากาศเพิ่มเป็น 326 L/s ช่วง 1,000-1,249 ppm อัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้นเท่ากับ 380 L/s และช่วงปริมาณแก๊สที่มากกว่า 1,249 ppm ระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะกำหนดให้อัตราการระบายอากาศเป็น 423 L/s ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถควบคุมปริมาณแก๊สภายในห้องบรรยายให้ไม่เกินปริมาณ 1,564 ppm และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณอยู่ในช่วง 1,217-1,564 ppm สำหรับช่วงเวลาตั้งแต่ 60-120 นาที โดยในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณแก๊สเฉลี่ยเท่ากับ 1,362 ppm พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สภายในห้องบรรยายแสดงดังรูปที่ 7(ข) ด้วยเส้นทึบสีดำร่วมกับสัญลักษณ์สี่เหลี่ยม และการเปลี่ยนแปลงระดับของอัตราการระบายอากาศตามช่วงปริมาณแก๊สที่ใช้ในการทดลองนี้แสดงดังรูปที่ 7(ข) ซึ่งใช้แท่งสีเขียว สีส้ม และสีแดง เพื่อแสดงอัตราการระบายอากาศเป็น 326 L/s 380 L/s และ 423 L/s ตามลำดับ รวมทั้งในการทดลองนี้ได้ใช้กำลังจริงรวมไปทั้งหมดเท่ากับ 4.19 kWh แสดงดังตารางที่ 3

การทดลองควบคุมระดับแก๊สในห้องบรรยายด้วยการกำหนดให้ระบบระบายอากาศทำงานด้วยอัตราการระบายอากาศคงที่เท่ากับ 423 L/s ตลอดระยะเวลาการทดลอง ภายใต้สภาวะการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากถังบรรจุแก๊สด้วยอัตราการที่ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถควบคุมปริมาณแก๊สภายในห้องบรรยายให้ไม่เกินปริมาณ 976 ppm และมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณอยู่ในช่วง 855-976 ppm สำหรับช่วงเวลาตั้งแต่ 60-120 นาที โดยในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณแก๊สเฉลี่ยเท่ากับ 919 ppm พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแก๊สในห้องบรรยายแสดงดังรูปที่ 7(ค) และในการทดลองนี้ได้ใช้กำลังจริงรวมไปทั้งหมดเท่ากับ 6.98 kWh แสดงดังตารางที่ 3 ในกรณีผลการ

ทดลองนี้ซึ่งใช้อัตราการระบายอากาศระดับสูงสุด และสามารถควบคุมให้มีปริมาณแก๊สเฉลี่ยไม่เกิน 1,000 ppm นั้น เป็นการแสดงถึงความเหมาะสมของอัตราการระบายอากาศของระบบระบายอากาศที่ใช้เพื่อควบคุมปริมาณแก๊สในห้อง ซึ่งมีการสะสมของแก๊สด้วยอัตรา 25.92 ppm/min อย่างไรก็ตามความเหมาะสมของอัตราการระบายอากาศดังกล่าวขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงลักษณะต่าง ๆ ของห้อง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการสะสมของแก๊สในห้อง (แสดงดังรูปที่ 5(ข)) และลักษณะพฤติกรรมลดของแก๊ส ที่ใช้อัตราการระบายอากาศสูงสุดของระบบระบายอากาศ (แสดงดังรูปที่ 6(ค)) นั้นเปลี่ยนแปลงไป ปัจจัยที่จะส่งผลในการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้แก่ ปริมาตรของห้อง ขนาดของรูรั่วภายในห้อง ฯลฯ ซึ่งมีความน่าสนใจและผู้วิจัยจะทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

การเปรียบเทียบปริมาณแก๊สเฉลี่ยในช่วงเวลา 60-120 นาที จากทั้ง 3 การทดลอง (การนำค่าเฉลี่ยของปริมาณแก๊สในช่วงเวลาตั้งแต่ 60-120 นาที มาเป็นปริมาณสำหรับการเปรียบเทียบนั้น ผู้วิจัยต้องการแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการควบคุมปริมาณแก๊สของระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากการปล่อยแก๊สด้วยอัตราคงที่มาเป็นระยะเวลา 60 นาที รวมทั้งในช่วงเวลาดังกล่าวระดับแก๊สอยู่ในสภาวะคงตัว [19]) พบว่าภายใต้เงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศของการทดลองที่ 3.1 ทำให้ได้ปริมาณแก๊สเฉลี่ยเท่ากับ 1,528.2 ppm ซึ่งเป็นปริมาณความเข้มข้นของแก๊สที่เริ่มส่งผลกระทบต่อสุขภาพ และในการทดลองนี้ได้ใช้กำลังจริงรวมเท่ากับ 4.07 kWh ซึ่งเป็นการใช้กำลังจริงรวมเพิ่มขึ้น 1.39 เท่า เมื่อเทียบกับ 2.93 kWh ซึ่งเป็นกำลังจริงรวมของการทดลองที่ 2.1 (เป็นการทดลองที่ไม่มีการระบายอากาศและส่งผลให้ปริมาณแก๊สสะสมเพิ่มสูงขึ้นจนถึงประมาณ 4,000 ppm) สำหรับผลการทดลองที่ 3.2 ได้ปริมาณแก๊สเฉลี่ยเท่ากับ 1,362 ppm ซึ่งเป็นระดับของแก๊ส ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน การทดลองนี้ได้ใช้กำลังจริงรวมเท่ากับ 4.19 kWh ซึ่งเป็นการใช้กำลังจริงรวมที่เพิ่มขึ้น 1.43 เท่า และสำหรับผลการทดลองที่ 3.3 ซึ่งใช้อัตราการระบายอากาศระดับสูงสุดตลอดระยะเวลาของการทดลอง ส่งผลให้ได้ปริมาณแก๊สเฉลี่ยเท่ากับ 919 ppm ซึ่งเป็นปริมาณความเข้มข้นของแก๊สที่ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงาน อย่างไรก็ตามในการทดลอง



นี้ใช้กำลังจริงรวมสูงที่สุดเท่ากับ 6.98 kWh ซึ่งเป็นการใช้กำลังจริงรวมที่เพิ่มขึ้นถึง 2.4 เท่า ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ใช้เพิ่มขึ้นดังกล่าวมีเหตุผลที่เหมาะสม หากจะพิจารณาในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และลดความเสี่ยงต่อการเกิดอาการทางสุขภาพของผู้ใช้งานห้อง [22] ปริมาณกำลังจริงรวมที่ได้ถูกใช้ไปในแต่ละการทดลองนั้น ขึ้นอยู่กับการทำงานของระบบเครื่องปรับอากาศ และระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมอัตราการระบายอากาศตามช่วงปริมาณแก๊ส และที่สำคัญในการทดลองที่ใช้อัตราการระบายอากาศในระดับที่สูงซึ่งส่งผลให้อัตราการเติมอากาศใหม่เข้ามาในห้องนั้นสูงขึ้นตามไปด้วย อากาศที่ได้เติมเข้ามาในห้องบรรายนั้น เป็นอากาศที่มีอุณหภูมิเท่ากับอากาศภายนอกห้อง และสูงกว่าอุณหภูมิในห้องบรราย ด้วยเหตุการณีนี้นักประดิษฐ์ดังกล่าวจึงทำให้ระบบปรับอากาศต้องทำงานเพิ่มมากขึ้น เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในห้องบรราย และส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มปริมาณการใช้กำลังจริงรวม

การพิจารณาถึงลักษณะของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้นในห้องบรราย ในกรณีของกิจกรรมที่ต้องการประสิทธิภาพการทำงานที่สูง เช่น กิจกรรมการสอบ หรือเป็นกิจกรรมที่ต้องจัดขึ้นภายใต้สถานการณ์ที่ต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น ในสถานการณ์แพร่ระบาดของเชื้อไวรัสซึ่งอัตราการระบายอากาศที่สูงสามารถลดความเสี่ยงในการติดเชื้อได้ [23] ควรเลือกกำหนดอัตราการระบายอากาศให้อยู่ในระดับที่สูง เพื่อควบคุมปริมาณแก๊สในห้องบรรายให้มีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการใช้งานน้อยกว่า 1,000 ppm ดังเงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศตามการทดลองที่ 3.3 อย่างไรก็ตามในลักษณะของกิจกรรมที่ต้องการประสิทธิภาพการทำงานในระดับปานกลาง และสามารถกำหนดให้มีช่วงเวลาพักกิจกรรมได้บ้าง เช่น กิจกรรมการเรียนการสอน ก็สามารถเลือกกำหนดเงื่อนไขสำหรับการควบคุมอัตราการระบายอากาศตามการทดลองที่ 3.1 หรือ 3.2 โดยจะส่งผลทำให้ปริมาณแก๊สเฉลี่ยในห้องยังอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลต่อสุขภาพ รวมทั้งยังสามารถประหยัดการใช้กำลังไฟฟ้าในกิจกรรมดังกล่าวได้ประมาณ 40% เมื่อเปรียบเทียบกับผลการใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าของการทดลองที่ 3.3 สอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ซึ่งได้พบว่าการกำหนดเงื่อนไข

ระดับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องให้กับชุดควบคุมอัตราการไหลอากาศตามความเข้มข้นของแก๊ส เพื่อควบคุมปริมาณความเข้มข้นของแก๊สในห้องให้มีระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมกับกิจกรรมนั้น จะส่งผลที่ดีทั้งในด้านคุณภาพอากาศและการประหยัดพลังงาน [24]

#### 4. สรุปผลการวิจัย

การควบคุมปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในห้องปรับอากาศ ด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมอัตราการระบายอากาศที่เหมาะสม เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลในด้านการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และลดความเสี่ยงต่อการเกิดอาการทางสุขภาพของผู้ใช้งานห้อง ซึ่งคุ้มค่าและมีเหตุผลสำหรับการใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ผลของการควบคุมปริมาณแก๊สในห้องบรราย ซึ่งภายในห้องมีสถานะการสะสมของแก๊สที่อัตรา 25.92 ppm/min เป็นเวลา 120 นาที ด้วยระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้อัตราการระบายอากาศสูงสุด ส่งผลให้ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สภายในห้องบรรายอยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1,000 ppm ซึ่งปริมาณแก๊สควรจะสะสมและเพิ่มสูงขึ้นถึงประมาณ 4,000 ppm ในกรณีที่ไม่มีอัตราการระบายอากาศ อย่างไรก็ตามสำหรับกระบวนการควบคุมดังกล่าวใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 2.4 เท่า และในกรณีที่สามารถยอมรับปริมาณแก๊สภายในห้องบรรายให้อยู่ในระดับที่ไม่เกิน 1,500 ppm ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของการทำงานบ้าง ในลักษณะดังกล่าวสามารถกำหนดเงื่อนไขการควบคุมอัตราการระบายอากาศแบบขั้นบันไดตามช่วงปริมาณแก๊ส ซึ่งจะส่งผลให้ประหยัดการใช้กำลังไฟฟ้าสำหรับการควบคุมปริมาณแก๊สได้ประมาณ 40%

การพัฒนาาระบบควบคุมความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อการรักษาปริมาณแก๊สภายในห้องให้อยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลเสียต่อสุขภาพ และลดการใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าให้ได้มากขึ้น ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนาระบบในเบื้องต้นดังนี้ การพัฒนาระบบระบายอากาศให้มีช่วงอัตราการระบายอากาศที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อให้ส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์สามารถกำหนดอัตราการระบายอากาศให้มีความแม่นยำหรือความเหมาะสมกับอัตราการการเปลี่ยนแปลงของแก๊สในห้องได้

มากยิ่งขึ้น การพัฒนาเพิ่มช่วงอัตราการระบายอากาศดังกล่าว จะส่งผลถึงความเหมาะสมของอัตราการเติมอากาศใหม่ เข้ามาในห้อง และทำให้ประหยัดปริมาณการใช้กำลังไฟฟ้า สำหรับการทำงานของระบบปรับอากาศได้มากขึ้น การพัฒนา เพิ่มเติมฟังก์ชันการใช้งานในส่วนควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ระบบดำเนินการระบายอากาศและควบคุมปริมาณ แก๊สภายในห้อง ให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าก่อนเริ่มเปิดระบบปรับ อากาศ การดำเนินการดังกล่าวจะช่วยประหยัดปริมาณการ ใช้กำลังไฟฟ้าสำหรับการทำงานของระบบปรับอากาศได้อีก เช่นกัน

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ แพทย์หญิงสุภารัตน์ ศุภกิจ เจริญ สำหรับการสนับสนุนให้คำปรึกษาด้านพยาธิสรีรวิทยา อาจารย์ศรีธร อุคำ และอาจารย์โชคมงคล นาดี สำหรับการ สนับสนุนให้คำปรึกษาด้านเทคนิค นายณรงค์ฤทธิ์ ทาสิงห์คานางสาวณัฐชยา ภัทรวีรานนท์ และนายรัชชานนท์ แก้วเตจ๊ะ ที่สนับสนุนการปฏิบัติการด้านเทคนิค สาขาวิชาวิศวกรรม ไฟฟ้า สาขาวิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ที่เอื้อเพื่อสถานที่ ทำงานวิจัยและเก็บข้อมูล

## 6. เอกสารอ้างอิง

1. Kanjanakrajang, A. and Chuaybamroong, P., 2017, "Measurements of Carbon Dioxide to Determine the Ventilation Effectiveness in the Classroom," *Thai Science and Technology Journal*, 25 (6), pp. 960-974. (In Thai)
2. Chindapol, S., 2019, "Indoor Environmental Quality in a Classroom: Faculty of Architecture, Chiang Mai University," *The Journal of Architectural/Planning Research and Studies*, 16 (1), pp. 93-105. (In Thai)
3. Schibuola, L., Scarpa, M. and Tambani, C., 2016, "Natural Ventilation Level Assessment in a School Building by CO<sub>2</sub> Concentration Measures," *Energy Procedia*, 101, pp. 257-264.
4. Ministry of the Environment Housing and Building Department, 2003, Indoor Climate and Ventilation of Buildings Regulations and Guidelines 2003, Decree of the Ministry of the Environment on the Indoor Climate and Ventilation of Buildings, Helsinki, pp. 33-38.
5. Persily, A., 2020, "Quit Blaming ASHRAE Standard 62.1 for 1000 ppm CO<sub>2</sub>," *Proceedings of the 16<sup>th</sup> Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate*, November 1-4, Korea, pp. ABS-0445.
6. Kesornthong, S., 2006, Sick Building Syndrome, 1<sup>st</sup> ed., Klaimor, Bangkok, 193 p. (In Thai)
7. Daisey, M.J., Angell, J.W. and Apte, M.G., 2003, "Indoor Air Quality, Ventilation and Health Symptoms in Schools: An Analysis of Existing Information," *Indoor Air*, 13, pp. 53-64.
8. ASHRAE, 2019, ANSI/ASHRAE Standard 62.1- 2019 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 87 p.
9. MacNaughton, P., Spengler, J., Vallarino, J., Santanam, S., Satish, U. and Allen, J., 2016, "Environmental Perceptions and Health before and after Rrelocation to a Green Building," *Building and Environment*, 104, pp. 138-144.
10. Vehviläinen, T., Lindholm, H., Rintamäki, H., Pääkkönen, R., Hirvonen, A., Niemi, O. and Vinha, J., 2016, "High Indoor CO<sub>2</sub> Concentrations in an Office Environment Increases the Transcutaneous CO<sub>2</sub> Level and Sleepiness during Cognitive Work," *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13, pp. 19-29.
11. Satish, U., Mendell, M.J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S. and Fisk, W.J., 2012, "Is CO<sub>2</sub> an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO<sub>2</sub> Concentrations on Human

Decision-Making Performance,” *Environmental Health Perspectives*, 120, pp. 1671–1677.

12. Allen, J.G., MacNaughton, P., Cedeno-Laurent, J.G., Cao, X., Flanigan, S., Vallarino, J., Rueda, F., Donnelly-McLay, D. and Spengler, J.D., 2018, “Airplane Pilot Flight Performance on 21 Maneuvers in a Flight Simulator under Varying Carbon Dioxide Concentrations,” *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 29, pp. 457–468.

13. Carreiro-Martins, P., Viegas, J., Papoila, A.L., Aelenei, D., Caires, I., Araújo-Martins, J., Gaspar-Marques, J., Cano, M.M., Mendes, A.S., Virella, D., Rosado-Pinto, J., Leiria-Pinto, P., Annesi-Maesano, I., Neuparth, N., 2014, “CO<sub>2</sub> Concentration in Day Care Centres is Related to Wheezing in Attending Children,” *European Journal of Pediatrics*, 173, pp. 1041–1049.

14. Centers for Disease Control and Prevention, Carbon dioxide Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH) [Online], Available: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/124389.html>. [27 June 2021]

15. Rice, S.A., 2003, “Health Effects of Acute and Prolonged CO<sub>2</sub> Exposure in Normal and Sensitive Populations,” *Proceedings of the Second Annual Conference on Carbon Sequestration*, 5-8 May 2003, Virginia, pp. RICE 2– RICE 7.

16. Azuma, K., Kagi, N., Yanagi, U. and Osawa, H., 2018, “Effects of Low-Level Inhalation Exposure to Carbon Dioxide in Indoor Environments: a Short Review on Human Health and Psychomotor Performance,” *Environment International*, 121, pp. 51-56.

17. Blanco, A. and Blanco, G., 2017, “Metabolism,” pp. 275-281, in Coulthurst, F. (Ed.), *Medical Biochemistry*, Academic Press, London.

18. Blanco, A. and Blanco, G., 2017, “Carbohydrate Metabolism,” pp. 283-323, in Coulthurst, F. (Ed.), *Medical Biochemistry*, Academic Press, London.

19. Batog, P. and Badura, M., 2013, “Dynamic of Changes in Carbon Dioxide Concentration in Bedrooms,” *Procedia Engineering*, 57, pp. 175-182.

20. Braun, S.R., 1990, “Respiratory Rate and Pattern,” *Clinical Methods, The History, Physical, and Laboratory Examinations*, pp. 226-323, in Walker, H.K, Hall, W.D and Hurst, J.W. (Eds.), Butterworths, Boston.

21. Huang, Q., Marzouk, T., Cirligeanu, R., Malmstrom, H., Eliav, E. and Ren, Y.F., 2021, “Ventilation Assessment by Carbon Dioxide Levels in Dental Treatment Rooms,” *Journal of Dental Research*, 100 (8), pp. 810-816.

22. Fisk, W.J., Black, D. and Brunner, G., 2012, “Changing Ventilation Rates in U.S. Offices: Implications for Health, Work Performance, Energy, and Associated Economics,” *Building and Environment*, 47, pp. 368-372.

23. Kurnitski, J., 2020, “Ventilation Rate and Room Size Effects on Infection Risk of COVID-19,” *REHVA European HVAC Journal*, 57, pp. 26-31.

24. Rachapradit, N., Poowaruttanawiwit, P. and Kosum, T., 2020, “Improvement of Indoor Air Quality with Ventilation During Nighttime in Bedrooms in Residential House,” *Journal of Industrial Education*, 14 (1), pp. 106-123. (In Thai)